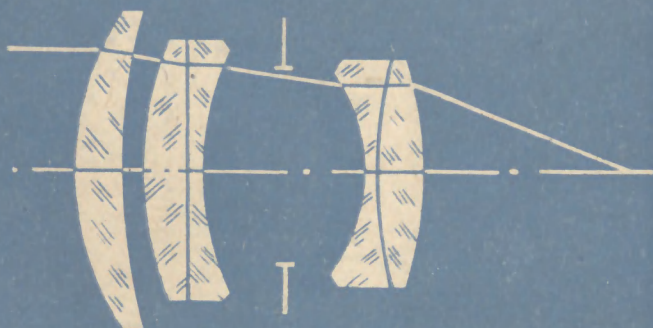




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



М.Д.МАЛЬЦЕВ

# РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



М. Д. МАЛЬЦЕВ

# РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1974

ГП5.8  
УДК 535.8:621.753.1.001.24

**Мальцев М. Д.**

**М 21** Расчет допусков на оптические детали. М., «Машиностроение», 1974.  
168 с. с ил. (Библиотека приборостроителя).

В книге изложены вопросы расчета допусков на геометрические размеры и оптические характеристики деталей и узлов приборов; рассмотрены характеристики материалов, применяемых для изготовления оптических деталей, и их влияние на качество изображения и технологический процесс; даны рекомендации по выбору соответствующих категорий стекла для изготовления конкретных оптических деталей, приведены примеры расчета.

Книга предназначена для инженерно-технических работников оптической промышленности. Она может быть также использована студентами приборостроительных вузов и техникумов.

Табл. 9, илл. 64, список лит. 14 назв.

**М** 31305-249  
038(01)—74

249-74

**6П5.8**

Рецензент канд. техн. наук *В. А. Перов*

© Издательство «Машиностроение», 1974 г.

**Михаил Дмитриевич Мальцев**

## **РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ**

Редактор издательства *Л. К. Тучкова*

Технический редактор *Ф. П. Мельниченко*

Корректор *И. М. Борейша*

---

Сдано в набор 13/VI 1974 г. Подписано к печати 2/IX 1974 г. Т-16125  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага типографская № 3 Усл. печ. л. 8,82 Уч.-изд. л. 11,5  
Тираж 10 000 экз. Заказ 1077 Цена 51 коп.

---

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

---

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Производство оптико-механических приборов в настоящее время становится серийным и крупносерийным, и в этих условиях правильное решение вопросов расчета и целесообразного назначения допусков на материал и изготовление оптических деталей приобретает особое значение. От правильного назначения допусков и выработки технических требований, помимо рентабельности, зависит также сама реальность освоения в серийном производстве новых оптических систем более высокого качества, требующих более строгого учета возможностей производства.

Несмотря на важность и актуальность проблемы, связанной с оценкой качества изображения и с расчетом допусков на оптические детали и системы, прежние исследования [2, 3, 11, 13] ограничивались лишь рассмотрением отдельных погрешностей оптических деталей, и только в последние годы расчету допусков было уделено серьезное внимание [4, 8, 10, 9, 7].

При написании книги автор ставил себе целью изложить методику расчета допусков на оптические детали и системы с применением простых формул, не требующих большой вычислительной работы.

Для решения поставленной задачи необходимо было рассмотреть особенности современного оптико-механического производства, критерии качества изображения, требования к оптической части приборов и оптическим деталям, а также широко применяемый в настоящее время метод изготовления высококачественных светосильных и широкоугольных фотообъектов, исключающий влияние на aberrации отклонений показателя преломления, дисперсии, радиусов преломных стекол и толщин линз.

Ряд свойств материалов, применяемых для изготовления оптических деталей, существенно влияет на качество изображения, поэтому важно было привести простые формулы для расчета допусков на отклонение показателя преломления, дисперсии, светопоглощения стекла и дать рекомендации по выбору его категории по оптической однородности, двойному лучепреломлению, бессвильности и пузырности, не поддающимся пока строгому расчету.

Точность изготовления оптических деталей особенно интересует цеховых работников. Поэтому в книге достаточно подробно рассмотрен расчет допусков на изготовление оптических деталей наиболее распространенных оптических систем, кроме того, рассмотрены допуски на пробные стекла, допустимые отклонения при подгонке под пробное стекло, допустимые отклонения поверхности от

правильной сферы, от плоскости отражающих поверхностей зеркал и призм, децентрировка поверхностей, а также допуски на углы призм. В книге дан анализ некоторых часто употребляемых оптических систем с целью выбора конструкций оправ, обеспечивающих более высокую точность центрировки. Приведены также формулы для определения изменения фокусного и вершинного фокусного расстояния и аберраций при изменении температуры и указаны комбинации стекол в двухлинзовых объективах, которые при выбранном материале оправы обеспечивают их нерасстраиваемость.

Достаточное внимание в книге уделено примерам расчета допусков на такие детали оптических приборов, как зеркала, призмы, светофильтры, защитные стекла, кроме того, рассмотрены вопросы выбора вида просветления (оптики), длины волны в максимуме пропускания и допуска на нее, выбора светофильтров в наблюдательных и контрольно-измерительных приборах, повышающих их разрешающую способность и точность измерений.

Автор надеется, что книга будет полезна не только специалистам оптико-механической промышленности, но и сотрудникам научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро, студентам техникумов и высших учебных заведений, связанных с исследованием и изготовлением оптических приборов.

Все замечания по содержанию книги направлять по адресу: Москва, Б-78, 1-й Басманный пер. д. 3, изд-во «Машиностроение».

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

### 1. Оптические характеристики

- $n_C, n_D, n_F$  — показатели преломления для спектральных линий Фраунгофера  $C, D, F$ ;  
 $n_F - n_C$  — средняя дисперсия;  
 $v$  — коэффициент средней дисперсии;  
 $\beta_C, \beta_D, \beta_F$  — приращение показателя преломления при изменении температуры на  $1^\circ$  для линий  $C, D, F$ ;  
 $V_t$  — термооптическая постоянная;  
 $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  
 $\lambda$  — длина световой волны;  
 $\lambda_{\text{пр}}$  — длина волны, определяющая условную границу пропускания светофильтра по спектру;  
 $\lambda_0, \lambda_{\text{max}}$  — длина волны, находящаяся в области минимального поглощения стекла светофильтра;  
 $D$  — оптическая плотность — логарифм величины, обратной пропусканию;  
 $\tau$  — коэффициент пропускания стекла оптической системы;  
 $\kappa_p$  — крутизна кривой оптической плотности стекла, разность оптических плотностей для длин волн  $\lambda_{\text{пр}}$  — 20 нм и  $\lambda_{\text{пр}}$ ;  
 $r, \rho$  — коэффициент отражения;  
 $\alpha$  — коэффициент светопоглощения;  
 $\varepsilon, \varphi$  — разрешающая способность — предел разрешения в угловой мере;  
 $R$  — то же в линейной мере (число линий на миллиметр).

### 2. Линейные величины

- $f'$  — второе или заднее фокусное расстояние;  
 $f$  — первое или переднее фокусное расстояние;  
 $\varphi'(\varphi)$  — оптическая сила — величина, обратная фокусному расстоянию;  
 $s_F$  — расстояние от первой поверхности системы до первого фокуса;  
 $s'_F$  — расстояние от последней поверхности системы до второго (заднего) фокуса;  
 $s(s')$  — расстояние от первой (последней) поверхности системы до предмета (изображения);

$\sigma(\sigma')$  — сходимость — обратная величина расстояния до предмета (изображения);  
 $\beta$  — линейное увеличение системы;  
 $\Gamma$  — увеличение зрительной трубы (видимое, угловое);  
 $\bar{\Gamma}$  — увеличение микроскопа, лупы;  
 $D_p(D_{p'})$  — диаметр входного (выходного) зрачка системы;  
 $0, 2A$  — относительное отверстие 1:  $f'/D_p$ ;  
 $n_{\text{зн}}$  — знаменатель относительного отверстия, диафрагменное число ( $f'/D_p$ );  
 $h_v, h_\mu$  — высота точки встречи луча с  $v$ -ой поверхностью, линзой;  
 $p, k$  — число поверхностей в системе;  
 $m$  — число деталей в системе;  
 $r, R$  — радиус кривизны поверхности;  
 $\rho$  — кривизна поверхности —  $1/r$ ;  
 $D$  — диаметр детали;  
 св.  $\varnothing$  — световой диаметр детали;  
 $l, d$  — длина хода луча в призме;  
 $d, l$  — расстояние между поверхностями в системе

### 3. Аберрации и другие погрешности изображения

$\delta s'$  — продольная сферическая аберрация;  
 $ds', ds'_{\text{хр}}$  — продольная хроматическая аберрация;  
 $l', dl', dl'_{\text{хр}}$  — поперечная аберрация соответственно;  
 $\delta z'$  — кружок нерезкости;  
 $x'_m(x'_s)$  — расстояние точки схождения лучей элементарного меридионального (сагиттального) пучка от плоскости параксиального изображения;  
 $t'_m(t'_s)$  — то же по главному лучу;  
 $x'_s - x'_m$ ,  $a$  — астигматическая разность;  
 $a_{\text{то}}$  — астигматизм для точки на оси;  
 $\epsilon, \epsilon'$  — параллакс в угловой мере в пространстве предметов и изображений;  
 $\Delta x, \Delta x'$  — то же в линейной мере;  
 $\sigma, \sigma'$  — то же в диоптрийной мере;  
 $\Delta x'$  — расфокусировка, смещение изображения из плоскости изображения;  
 $\omega$  — угол отклонения луча клином или призмой;  
 $d\omega, \Delta\omega_{\text{хр}}$  — хроматизм в угловой мере.

### 4. Допуски

$\Delta n_D$  — предельное отклонение показателя преломления;  
 $\Delta(n_F - n_C)$  — предельное отклонение средней дисперсии;  
 $N$  — предельное отклонение стрелки прогиба поверхности детали, выраженное числом интерференционных колец или полос;  
 $\Delta N$  — предельное отклонение формы поверхности от сферы или плоскости, выраженное разностью числа интерференционных колец или полос по двум взаимно перпендикулярным диаметрам с наибольшим и наименьшим числом колец;

- $f'_{\min}$  — наименьшее допустимое фокусное расстояние пластинок или призм как результат сферичности их поверхностей в мм или в м;
- $c$  — допускаемая общая децентрировка или децентрировка каждой поверхности (для линз) в мм или разность толщин по краю;
- $\theta$  — предельная клиновидность пластинки в минутах или секундах или разнотолщинность в мм;
- $\pi$  — предельная пирамидальность призмы в мин или с;
- $\delta$  — предельная разность равных по номиналу углов призмы (с цифровым индексом угла призмы) например, для прямоугольной призмы  $\delta 45^\circ$  в мин или с;
- $P$  — класс чистоты по точкам и царапинам на полированных поверхностях;
- $\Delta R$  — класс точности пробного стекла по ГОСТ 2786—62 или предельное отклонение радиуса поверхности в %.



## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА

Оптический прибор удовлетворяет техническим требованиям лишь в том случае, если соблюдены следующие условия:

1) расчетом и конструкцией предусмотрено и обеспечено выполнение всех требований, предъявляемых к прибору заказчиком и указанных в технических условиях;

2) отдельные детали, узлы прибора и весь прибор изготовлены в соответствии с чертежами и техническими условиями, т. е. размеры, качество обработки и материалов (особенно стекла) выдержаны в пределах допусков по чертежам и техническим условиям;

3) узлы прибора и весь прибор собраны и отъюстированы правильно. При этом, конечно, подразумевается, что контроль, испытания и последующая эксплуатация прибора производятся согласно техническим условиям и наставлению к пользованию.

Оптическую систему можно рассчитать и сконструировать так, что она практически не будет иметь погрешностей и приблизится к идеальной. Однако такая система не всегда нужна, так как аппарат, принимающий изображение (глаз, светочувствительные слои), не идеален, а наделен погрешностями и недостатками. Если все же требуется рассчитать, сконструировать и изготовить прибор, по качествам приближающийся к идеальному, то изготовление прибора значительно усложняется и встречает при современном состоянии технологии изготовления оптических деталей большие затруднения, и приходится идти на снижение требований к прибору. Поэтому стараются рассчитать и сконструировать прибор таким образом, чтобы он лишь удовлетворял требованиям принимающего аппарата. А так как изготовление прибора по многим причинам не может быть произведено совершенно точно, и, следовательно, детали, узлы и весь прибор будут иметь определенные отклонения от расчетных данных, то к производству необходимо предъявить требования, чтобы эти отклонения не вышли из наперед заданных границ — допусков на детали, узлы и весь прибор.

Допуски должны быть рассчитаны и назначены правильно, чтобы прибор, а также его детали и узлы, изготовленные по этим допускам, имели высокое качество. Если же деталь, узел и весь прибор изготовлены с отклонениями, превышающими допустимые, то они не соответствуют ТУ, имеют действительно низкое качество и должны быть забракованы или исправлены.

Завышенные допуски редко дают заметное улучшение характеристик прибора, особенно его оптической части, но они всегда ведут к его значительному удорожанию, излишней трате времени на

изготовление, требуют более квалифицированных рабочих и контролеров, излишне точного оборудования для изготовления и контроля, сужают производственные возможности предприятия. Отсюда следует необходимость назначения рациональных допусков, обеспечивающих хорошие качества изготавливаемых приборов и оптимальные затраты в производстве.

## **1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Общая теория оптических приборов полно и достаточно глубоко разработана советскими учеными чл.-корр. АН СССР Тудоровским А. И. и проф. Слюсаревым Г. Г., она получила дальнейшее развитие в трудах проф. Чуриловского В. Н., Фефилова Б. В., Яхонтова Е. Г., Русинова М. М. и Волосова Д. С. Это значительно облегчает правильное решение многих, часто довольно сложных вопросов прикладной оптики, возникающих во всех звеньях длинной цепи трудоемкого и сложного процесса изготовления оптико-механических приборов, что и способствовало интенсивному развитию отечественной оптико-механической промышленности, занявшей по ряду направлений первое место в мире. Рассчитаны и разработаны новые высококачественные оптические системы. Производство длиннофокусных, светосильных и широкоугольных оптических систем в настоящее время становится крупносерийным и массовым, требует учета экономики, строгого подхода к расчету допусков, технологичности конструкции и вопросам сборки и юстировки.

При подготовке современного производства рекомендуется выполнять следующие требования:

1. Технологическая группа должна участвовать в разработке конструкции прибора совместно с ведущим конструктором. Еще и в настоящее время технолог не участвует в разработке конструкции и обычно проверяет на технологичность конструкцию прибора после ее разработки, когда какие-либо серьезные изменения уже практически невозможны, а небольшие улучшения технологичности отдельных деталей не имеют большого значения.

2. При разработке конструкции прибора конструктор и технолог должны:

- а) обеспечить максимальную расчлененность конструкции на первичные сборочные единицы (узлы), что заметно облегчает и ускоряет изготовление деталей и сборку прибора. Желательно так разработать конструкцию отдельных сборочных единиц, чтобы они могли быть отдельно собраны, отъюстированы и проверены;

- б) обеспечить минимальное количество сложных и трудоемких операций по изготовлению деталей и сборке приборов посредством целесообразного назначения материала, конфигурации, размеров и допусков.

Целесообразным при сборке оказывается также использование и введение юстировки, например, регулировки и дополнительной обработки одной из деталей с целью выдерживания воздушных промежутков или центрировки, что позволит расширить допуски на ряд деталей. Следует выбирать такую форму и такой материал, чтобы можно было при изготовлении деталей воспользоваться высокопроизводительными способами (штамповкой, литьем под давлением);

в) правильно рассчитать допуски и сформулировать требования к деталям, сборочным единицам и прибору, исключить все необоснованные узкие допуски и ненужные требования, так как от величины допусков зависит метод изготовления деталей, выбор оборудования, приспособлений, режущего и мерительного инструмента.

Целесообразное значение допусков, т. е. назначения их в соответствии с расчетом, позволяет легко определить особенно важные детали и сборочные единицы, ошибки изготовления и установки которых заметно влияют на качество изображения и другие характеристики приборов, которые и должны быть точно выдержаны. Простановка узких допусков там, где они не нужны, дезориентирует специалиста и затрудняет быстрое определение причин, ухудшающих характеристики прибора, и выявление деталей и сборочных единиц, погрешности которых могут снизить качество прибора. Например, до последнего времени на толщины всех линз фотообъективов назначали допуск  $\pm 0,01 \div 0,02$  мм; на подгонку под пробное стекло всех поверхностей — допуски  $N=2 \div 3$ ,  $\Delta N = 0,2 \div 0,3$ ; применяли стекло по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  1-й категории. В этом случае при изготовлении оставалось неизвестным, какие же поверхности и толщины действительно требуют точного изготовления и каких же линз  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  должны быть выдержаны, чтобы не снизилось качество изображения. Часто низкое качество продукции имеет место потому, что указанные требования отсутствуют в чертеже на деталь и сборочную единицу. Чертежи на сборочные единицы и в настоящее время являются недостаточно четкими, по ним трудно работать, особенно впервые, а технологический процесс сборки разрабатывают с большим опозданием;

г) исключить доделочные и ручные операции, лишние сборки и разборки, обеспечить простоту регулировок. Ручные операции малопроизводительны, экономически невыгодны так же, как и операции в сборочном цехе по доделке деталей, которые изготовлены в механических цехах с отступлениями или просто недоделаны. Однако такие операции, как, например, подрезка опорных торцов оправ фотообъективов для выдерживания рабочего расстояния и промежуточных колец в аэрофотоаппаратах при их фокусировке, останутся необходимыми, выполняемыми при сборке фотообъектива или АФА.

При разработке конструкции опытного образца ведущий конструктор и технолог мало обращают внимания на отработку конструкции применительно к серийному производству, а при изготовлении опытных образцов не следят систематически за их изготовлением, сборкой и юстировкой и не отражают всех изменений и пожеланий в чертежах, не изживают недостатки в конструкции, которые могут стать совершенно нетерпимыми в серийном производстве; устранение их будет затруднено, так как документация утверждена, сконструированы и изготовлены приспособления и инструмент.

Выполнение указанных требований позволяет получить технологичную конструкцию. Светорассеяние в приборах оказывается особенно вредным при наблюдении и фотографировании малоконтрастных, недостаточно освещенных объектов. Заметно снижается контраст наблюдаемых объектов, затрудняется их обнаружение, падает разрешающая способность. В таких условиях важно также иметь возможно больший коэффициент пропускания. Поэтому при разработке конструкции, изготовлении чертежей следует целесооб-

разно назначать покрытия, правильно выбирать форму оправ и диафрагм. Опытные образцы необходимо подвергать контролю на пропускание и вредное светорассеяние. В современных приборах светорассеяние не должно быть больше 2—3%. В фотообъективах и простых зрительных трубах коэффициент пропускания составляет 80—85%.

В последнее время требования к качеству приборов значительно повысились. Их необходимо учитывать в конструкции прибора, технологическом процессе изготовления, расчете допусков и в методике контроля и испытаний. Важное место в общих требованиях к прибору и к рентабельности производства отводится и себестоимости прибора, что в большой степени зависит от технологичности конструкции.

## 2. СВОЙСТВА ПРИЕМНИКОВ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Основные требования к оптико-механическим приборам и к изготовлению оптических деталей предъявляют исходя из свойств приемника лучистой энергии, которым чаще всего бывают глаза человека и фотоэмульсия. Важной характеристикой глаза, и фотоэмульсии является предел разрешения (разрешающая способность) — угловая или линейная величина наименьшего расстояния между двумя точками или линиями, при котором прибор или приемник в конкретных условиях испытания или эксплуатации образует их еще раздельное изображение.

Предел разрешения глаза принимают равным  $1'$  при наблюдении точечных объектов, контрасте  $k=1$  (черные штрихи на белом фоне) и освещенности 50—200 лк. С понижением контраста разрешающая способность уменьшается: при  $k=0,5$   $\epsilon=2'$ ; при  $k=0,1$ ,  $\epsilon=3'$  и наблюдении в сумерки  $\epsilon$  падает до 3—5'. Нониусная острота зрения составляет  $10''$ ; двойное изображение тонких линий величиной в  $30''$  уже замечается глазом. Параллакс и астигматизм пучков лучей, падающих в глаз, величиной в 0,25—0,5 дптр и пирамидальность в 0,5 призмной диоптрии ( $\sim 18'$ ) безвредны, но уже замечаются глазом. Ширина аккомодации глаз наблюдателя средних лет составляет 5—6 дптр; кривизна изображения, равная половине этой величины, еще допустима. Угол резкого поля видения  $2^\circ$  представляет собой угловую величину желтого пятна глаза. Хроматизм изображения в  $1—3'$  мало заметен глазом. При бинокулярном зрении разность увеличений в обеих трубках в 5% незаметна и безвредна, а разность увеличений в 10—15% и разность наклонов изображения более  $30'$  уже разрушают стереоскопический эффект, появляется двойное изображения и глаза быстрее утомляются. Еще безвредно — глаза не устают, если при наблюдении в бинокулярную трубу вследствие непараллельности оптических осей труб оси глаз расходятся под углом не более  $30'$ , сходятся под углом не более  $1^\circ$  и пересекаются (скрещиваются) в вертикальной плоскости под углом не более  $20'$ . Менее всего глаза устают при желтом и белом освещении, затем по степени утомляемости глаз следует освещение зеленого, красного и фиолетового цвета.

Современные флюоресцирующие экраны имеют невысокую разрешающую способность 4—6 лин/мм (линий на миллиметр), а электроннооптические преобразователи — 30—40 лин/мм при пониженном контрасте изображения.

Разрешающая способность распространенных фотопленок — типа

кинонегатив КН, панхром Х — равна 65—80 лин/мм, мелкозернистых пленок — 100—140 лин/мм и позитивных несенсибилизированных пленок для репродукционных приборов — 150—200 лин/мм. Специальные эмульсии имеют предел разрешения более 500 лин/мм. Нерезкость изображения вследствие расфокусировки еще допустима и не снижает разрешающей способности, если кружки рассеяния при этом не превышают величины  $1/R$ , где  $R$  — число линий на миллиметр, разрешаемое фотообъективом [5]. Тогда глубина резкости  $\Delta x'$  в плоскости изображения для предмета на конечном расстоянии и для бесконечно удаленного предмета определяется соответственно по формулам

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f' + x'}{D_p} = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f'}{D_p} (1 - \beta);$$

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f'}{D_p}. \quad (1)$$

Глубина резкости реальных фотообъективов обычно больше на 10—20%. В формуле (1) обозначения общепринятые.

Требования к материалу и к изготовлению оптических деталей повышаются, если эти детали предназначаются для оптических систем с высокой разрешающей способностью, например, для репродукционных объективов, коллиматоров, наблюдательных труб с большим увеличением, а также для широкоугольных и светосильных фотообъективов вследствие особенностей их характеристик — большого поля зрения, строгих требований к дисторсии и малой глубины разности.

### 3. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Зрительные трубы совместно с глазом применяются для наблюдения удаленных предметов, а микроскопы — для рассматривания тонких подробностей объектов, поэтому отклонения их качества изображения от идеального в лучшем случае должны быть незаметными для глаза. Так как ни объектив, ни окуляр зрительной трубы (или микроскопа) не работают отдельно друг от друга и не работают отдельно от глаза, то и при контроле качества изображения и расчете допусков, например на объектив, необходимо исходить из фокусного расстояния окуляра или увеличения, с которым работает объектив. Это же относится и к объективу микроскопа. Качество изображения (особенно в центре поля) зрительной трубы или микроскопа зависит в основном от качества изображения объектива. Увеличение окуляра (а тем самым увеличение зрительной трубы или микроскопа) выбирают предельным, т. е. таким, при котором предел разрешения объектива после окуляра перед глазом в угловой мере не превышает предела разрешения глаза (45—60''). Это обстоятельство вынуждает стремиться получить максимальную разрешающую способность объективов, в пределе равную их дифракционной — идеальной разрешающей способности. Последняя имеет место в том случае, если объективы безабберационны, что в настоящее время получить практически невозможно. Поэтому считается вполне удовлетворительным, если aberrации объективов зрительных труб и микроскопов в волновой мере не превышают предела Релея ( $\lambda/4$ ), чему соответствует и критерий Штре-

ля, по которому следует, что изображение точки мало отличается от идеального, если не менее 80 % энергии концентрируется в ядре дифракционного изображения точки. Реальные оптические системы объективов зрительных труб и микроскопов в центре обычно удовлетворяют пределу Релея и критерию Штреля. Аберрации реальных объективов зрительных труб и микроскопов даже и в этом случае дают кружки рассеяния (нерезкости), уже заметные при наблюдении через окуляр с увеличением  $\Gamma = 15 \div 25\times$ . Например, если объектив зрительной трубы с относительным отверстием 1:6 идеального качества изображения имеет волновую аберрацию не более предела Релея, то ей соответствует [14] продольная сферическая аберрация на зоне ( $h=0,7 D_p/2$ )

$$\delta s'_k = \frac{n_{3H}^2 I_M}{17,5}; \quad (2)$$

$$\delta s'_k = \frac{6^2 \cdot 0,25}{17,5} = 0,5.$$

Кружок нерезкости, соответствующий этой продольной аберрации в наилучшей плоскости установки

$$dz' \approx \frac{0,7\delta s'_k}{5n_{3H}} = \frac{0,7 \cdot 0,5}{5 \cdot 6} \approx 0,01,$$

виден через окуляр (например, при  $f'_{ок} = 10,0$ ) под углом

$$\epsilon = \frac{dz'}{f'_{ок}} \rho = \frac{0,01}{10} \cdot 3438 = 3',4,$$

т. е. становится уже заметным. Теперь можно определить и глубину резкости объектива, в пределах которой смещение плоскости установки еще не вызовет нерезкости более чем

$$dz' = \frac{0,7\delta s'_k}{5n_{3H}},$$

т. е.

$$\Delta x' \approx n_{3H} dz' \approx \frac{ds'_k}{7} \approx 0,07,$$

а также и параллакс в диоптрийной мере  $\sigma'_{ок} = \frac{1000\Delta x'}{f'^2_{ок}}$

и в угловой мере  $\epsilon' = \frac{\sigma'_{ок} D_p}{0,35}$ . Из-за погрешностей изготовления можно допустить изменение аберраций не более чем на 10—15%, т. е. считать, что продольная сферическая аберрация в этом примере может изменяться на зоне зрачка не более чем на  $\pm 0,05$ — $0,07$  мм.

Продольный астигматизм  $a$  вследствие отклонения  $\Delta N$  поверхностей объектива от правильной сферы также вызывает волновую aberrацию [14]

$$l_m \approx \frac{114a}{n_{\text{эн}}^2}. \quad (3)$$

Если допустить изменение волновой aberrации не более одной третьей — пятой предела Релея из-за  $\Delta N$ , то можно определить

$$\text{допустимый астигматизм} \quad a_{\text{доп}} := \frac{l_{\text{мдоп}} n_{\text{эн}}^2}{114} = \frac{0,1 \div 0,05}{114} n_{\text{эн}}^2 \approx$$

$$\approx \frac{9 \div 4,5}{1000} n_{\text{эн}}^2, \quad \text{что для объектива с } n_{\text{эн}}=6 \text{ дает } a_{\text{доп}}=0,03 \div$$

$\div 0,015$  мм, который и может служить для расчета допуска  $\Delta N$  на искривление колец.

Подобные же основания и цифры можно привести и для оптической системы микроскопа, исходя из которых и следует производить расчет допусков на изготовление оптических деталей.

Фотографические объективы образуют изображение на фотопленке, имеющей определенную разрешающую способность, которая наряду с aberrациями фотообъектива (в результате расчета и погрешностей изготовления) определяет разрешающую способность системы фотообъектив — фотопленка. Приблизительно разрешающую способность этой системы определяют по известной формуле Истомина

$$\frac{1}{R_{\Phi}} = \frac{1}{R_{\text{в}}} + \frac{1}{R_{\text{сл}}},$$

где  $R_{\Phi}$ ,  $R_{\text{в}}$  и  $R_{\text{сл}}$  — разрешающая способность: фотографическая — системы, визуальная — фотообъектива и фотослоя. Однако для пространственных фотопленок с разрешающей способностью 65—75 линий/мм фотографическая разрешающая способность системы объектив — пленка для центра поля может определяться по формуле

$$R_{\Phi} = (1,5 \div 1,3)/dz',$$

где  $dz$  — диаметр кружка нерезкости в плоскости наилучшей установки, а коэффициент 1,5—1,3 учитывает распределение энергии по кружку нерезкости. Этим же величинам соответствуют и частотно-контрастные характеристики фотообъективов, если считать, что надежное разрешение двух линий (полос) имеет место для центра поля при контрасте  $k=0,5 \div 0,55$ , частотах 40—50 лин/мм и по полю при контрасте  $k=0,2 \div 0,25$ , частотах 20—25 лин/мм. Расфокусировка или глубина резкости, определяемая по формуле (1), подтверждается и частотно-контрастными характеристиками (ЧКХ). Например, при расфокусировке фотообъектива И50 с  $f'=52,4$ ; 1:3,5 на  $\Delta x'=\pm 0,1$  контраст снижается при  $R_{\Phi}=48$  с 0,52 до 0,2 (при  $R_{\Phi}=36$  с 0,6 до 0,3), т. е. разрешение этих частот еще возможно

[в пределах глубины резкости (1):  $\Delta x' = \frac{1}{45 \div 50} \cdot 3,5 \approx \pm 0,07$ ].

Хорошо согласуется с расчетом (с величиной aberrаций) и распо-

ложение плоскости наилучшего контраста для центра поля и для сагиттального и меридионального пучков по полю. Например, при определении ЧКХ у объектива И50 наилучшие плоскости установки совпадают для центра поля и сагиттального сечения, тогда как для меридионального сечения наилучшая плоскость отстоит на 0,35—0,40 мм (для  $\omega=15^\circ$ ), чему соответствует расчетная величина  $\delta s'_k \approx x'_s = -0,20$  и  $x'_m = 0,09$ ;  $x'_s - x'_m = -0,30$ . Поэтому при расчете допусков на параметры фотообъектива, по-видимому, можно принимать еще допустимым изменение аберрации как для центра поля, так и по полю, не более 1/5—1/10 глубины резкости, считая, что при этом качество изображения (разрешающая способность и ЧКХ) изменяется еще незаметно. При этом резонно допустить, что при изменении аберраций (вследствие погрешностей изготовления) для точки на оси аберрации для точек поля могут и не изменяться или считать, что изменение аберраций для точки на оси или точек по полю вызывает расхождение (нарушение совпадения) плоскостей наилучшей установки для центра поля и краев поля, и исходя из этого и вести расчет допусков.

#### 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРИБОРОВ

Технические условия (ТУ) должны содержать все не помещенные в чертежах необходимые технические требования на изготовление, приемку и испытание прибора и его частей.

Наиболее важными характеристиками телескопической системы — наблюдательной трубы, прицела, буссоли и т. п. являются ее увеличение, диаметр и удаление выходного зрачка, разрешающая способность, параллакс, установка шкалы диоптрий на 0, коэффициент светопропускания и светорассеяния (особенно в сложных системах), требования к которым и должны быть указаны в ТУ, а затем уже следуют общие требования.

На эксплуатационные качества прибора отклонение увеличения в пределах 3—5% практически не влияет, однако грубое отклонение увеличения укажет на недопустимые погрешности при его изготовлении (чаще оптических деталей), которые могут привести к снижению качества изображения и погрешностям в цене делений сетки. Обычно изменение увеличения нормируется только в минус, так как отклонения в плюс не ухудшают качеств прибора, что справедливо также и в отношении поля зрения (поле зрения оказывается в допуске, если фокусное расстояние объектива и световой диаметр оправы сетки или диафрагмы поля зрения находятся в допуске). Субъективная яркость изображения на сетчатке глаза, вооруженного прибором, пропорциональна квадрату диаметра выходного зрачка при наблюдении предметов конечных размеров (обычно  $D_p < D_{г.л.}$ ). Диаметр выходного зрачка из конструктивных соображений не может быть сделан достаточно большим, равным диаметру зрачка глаза (5—6 мм), поэтому отклонение его в минус за пределы допуска недопустимо, а отклонение в плюс обычно не нормируется.

При наблюдении зрачок глаза должен совпадать с выходным зрачком и все поле зрения может рассматриваться глазом без его смещения. Строже это условие должно выполняться в зрительных трубах с большим окулярным полем, а также и в биноклярных



трубах, где удаление выходного зрачка обеих зрительных труб должно быть одинаковым. Удаление выходного зрачка от последней поверхности окуляра обычно мало изменяется — отклонение фокусных расстояний (обычно небольшое) объектива, окуляра и оборачивающей системы слабо влияют на положение зрачка выхода, который может, однако, смещаться с оптической оси, иметь некруглую форму, особенно в призмённых системах. Допускается отклонение выходного зрачка от требуемой формы при условии, что диаметр круга, вписанного в контур зрачка, не меньше его минимального диаметра.

Разрешающая способность (предел разрешения) вместе с качеством изображения (которое обычно сравнивается с образцом и характеризуется контрастностью, наличием бликов, кайм, фона и т. п.) является важной характеристикой прибора.

Параллакс — несовпадение изображения предмета с сеткой, с маркой или линией раздела в дальномере затрудняет наблюдения из-за нерезкости изображения и вносит погрешность при измерениях углов или дальностей, так как при смещении глаза перпендикулярно оптической оси изображение предмета относительно штрихов сетки или линии раздела смещается.

Правильная установка шкалы диоптрий на нуль — погрешность не более 0,25 дптр (при  $D_p' \approx 3 \div 5$  мм) и отсутствие ошибок в шкале диоптрий — позволяет полностью компенсировать недостатки глаз (близорукость или дальнозоркость) и исключить быстрое утомление глаз, особенно при продолжительном наблюдении.

Светопропускание и светорассеяние имеют большое значение при наблюдении в неблагоприятных условиях освещения (пасмурная и туманная погода, раннее утро, вечер) и особенно в сложных приборах (дальномеры, перископы, прицелы), где поэтому больше факторов, вызывающих снижение коэффициента светопропускания и увеличения коэффициента вредного светорассеяния.

**Требования к фотообъективам и светофильтрам.** Важными характеристиками фотообъектива являются фокусное и рабочее расстояние; разрешающая способность; относительное отверстие; коэффициент пропускания и светорассеяния; неизменность его работоспособности и качества изображения при испытании на влияние вибрации и изменения температуры.

Важными характеристиками светофильтров являются спектральная характеристика стекла, минимальное фокусное расстояние, клиновидность и качество изображения. От качества изображения, спектральной характеристики, величины фокусного расстояния непосредственно зависит качество снимка, поэтому эти характеристики являются главными. Качество изображения и фокусное расстояние зависят от точности поверхностей светофильтра и от крепления светофильтра в его оправе (натяжения недопустимы). Клиновидность более 2—3' может проявиться в широкоугольных картографических фотообъективах, искажая изображение в пределах 0,02—0,03 мм. Отклонение  $\lambda_{np}$  в небольших пределах практически не сказывается на эксплуатационных свойствах светофильтра.

Отклонение фокусного расстояния при выполнении всех других требований к фотообъективу (в основном — к разрешающей способности и качеству изображения) может быть в отдельных случаях допущено и более 1%, так как оно не влияет на эксплуатационные качества объектива, т. е. масштаб изменяется незначительно, если фокусировка его постоянна (АФА) и не производится

по дальномеру или по постоянной шкале расстояний. Большое отклонение фокусного расстояния указывает на грубые отклонения в процессе изготовления объектива, что обычно и приводит к снижению качества изображения и поэтому не может быть допущено. Отклонение рабочего расстояния недопустимо для сменных, например, киносъемочных или любительских фотообъективов; для всех других выдерживание рабочего расстояния облегчает фокусировку фотоаппарата при его сборке — установке объектива на камеру. Разрешающая способность и качество изображения непосредственно характеризуют качество объектива и снимка, а поэтому являются наиболее важными: они указываются для центра поля и для нескольких точек (углов) поля при определенном светофилтре и эмульсии (пленке). Для широкоугольных картографических, репродукционных и специальных фотообъективов имеет важное значение дисторсия, величина которой обычно составляет не более 0,02 мм. Колебание коэффициента пропускания в небольших пределах ( $\pm 2 \div 3\%$ ) при налаженном производстве слабо влияет на выбор выдержек и экспонирование пленки; отклонение коэффициента пропускания и светорассеяния указывает на грубые нарушения технологического процесса изготовления деталей — просветления и их отделки. Желательно, чтобы все характеристики объектива оставались постоянными во всех разнообразных условиях эксплуатации (например, при  $t = \pm 60^\circ \text{C}$ ;  $H$  до 20 км и т. п.), что в настоящее время еще трудно обеспечить. Поэтому ограничиваются требованием, чтобы объектив выдерживал без разрушения или нарушения работоспособности испытание его на влияние температуры, например, для аэрофотообъективов от  $+50$  до  $-60^\circ \text{C}$  и вибрации с перегрузкой  $4g$  (транспортные). Если по ТУ требуется работа диафрагмы в таких условиях, то выбирают соответствующие материалы, посадки оправы и смазку. Разрешающую способность и качество изображения обычно проверяют в лабораторных условиях (при  $t = +20^\circ \text{C}$ ).

**Требования к микроскопам.** Важными характеристиками микроскопа являются его увеличение, апертура и разрешающая способность. В ТУ оговаривается увеличение микроскопа или отдельно увеличение (фокусное расстояние) объектива и окуляра и разрешающая способность объектива по природным препаратам, допустимой величине aberrаций или качеству изображения при сравнении с эталоном. Увеличение в отсчетных микроскопах юстируют для устранения рэна — несоответствия цены деления отсчетной и основной шкалы.

## 5. ЧЕРТЕЖИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Чертежи оптических деталей выпускают в соответствии с ГОСТ 2412—68 «Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий». Оптическую деталь вычерчивают в нескольких проекциях с указанием марки стекла или другого материала детали, размеров и допусков на них и качества обработки. Чаще всего для рабочих полированных поверхностей требуется 14-й класс чистоты и для нерабочих матовых 5 или 6-й (реже 7-й для деталей 2—3-го класса точности). На нормальном формате с бланком основной надписи (штампе), принятом для конструкторских чертежей, справа над штампом располагается таблица дополнительных требований, состоящая из трех частей: верхней (в ней указываются требования к

$N_{A.Б}$	3
$\Delta N_{A.Б}$	0,3
$C$	0,05
$P$	V
$f'$	79,67
$S_F$	- 78,83
$S'_F$	77,02
св. $\phi_A$	16,5
св. $\phi_Б$	16,5

1. Склеить бальзамом по инструкции ....
2.  $\otimes$  — просветл. 43Р по ТУ...,  $\lambda=520 \pm 30$  мм
- $\otimes$  — просветл. 44Р 43Р по ТУ...,  $\lambda=520 \pm 20$  мм
3. Предел разрешения  $\varepsilon \leq 8''$  4.\* Размер для справок
5. Покрытие матовых поверхностей Эм... по ТУ...

Перечень деталей					
Формат	Зона	Позиция	Обозначение	Наименование	Примечание
				Линза	
				Линза	
				Бальзамин	
				(Обозначение сборки)	
Изм	Кол.	№ докум.	Подпись	Дата	Объектив
Констр					
Провер.					
Технол.					
Н. контр.					
Рук. гр.					
Утверд					

Литера	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 1	Листов 1	
(Обозначение предприятия)		

Рис. 1. Пример выполнения чертежа склеенного объектива диоптрийной трубки

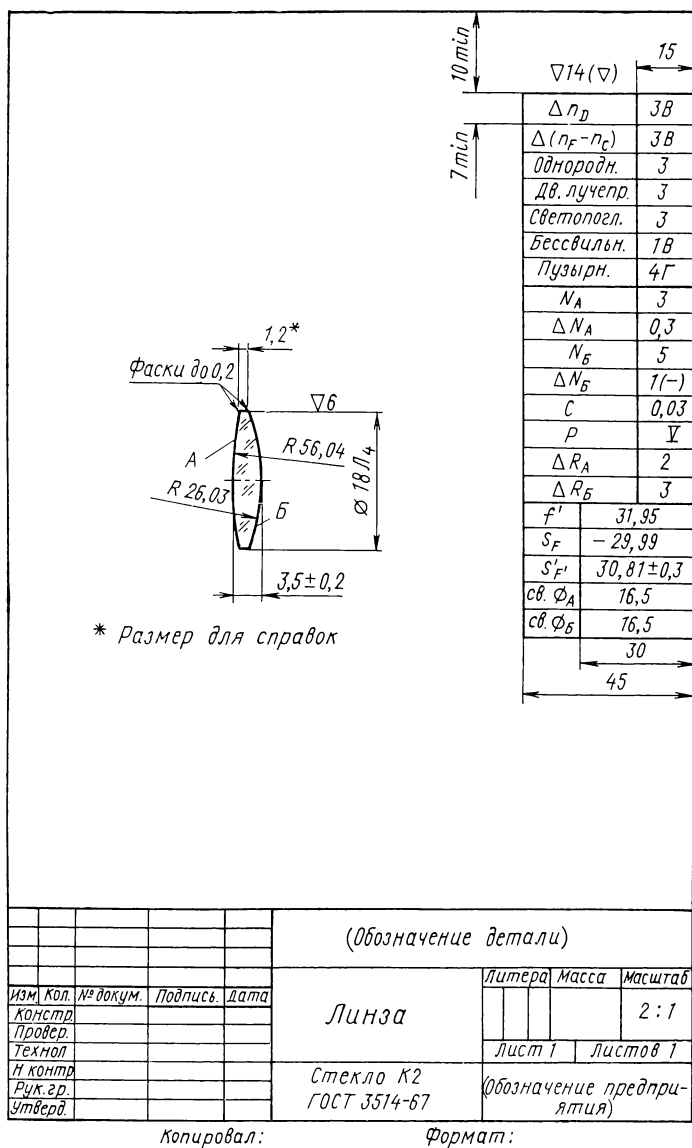


Рис. 2. Пример выполнения чертежа первой линзы склеенного объектива диоптрийной трубки

материалу), средней (требования к изготовлению) и нижней (расчетные данные) Допуски на фокусное или вершинное фокусное расстояние отдельных линз и склеенных блоков не следует указывать, так как при изготовлении линз является более важным выдерживание  $\Delta n_D$ ,  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta d$  и  $\Delta R$ , отклонения которых непосредственно влияют на качество изображения, особенно в длиннофокусных, широкоугольных, светосильных и репродукционных объективах. Точность измерения  $f'$ ,  $s_F$  и  $s_{F'}$  у отдельных линз из-за аберраций низкая (короткофокусные и отрицательные линзы с большой кривизной), к тому же  $f'$ ,  $s_F$  и  $s_{F'}$  вычислены для нулевых лучей.

Если весь диаметр детали значительно больше сечения пучка лучей, участвующего в образовании изображения точки, следует в чертежах указывать ограниченный диаметр детали, к которому и относятся заданные  $P$ ,  $N$  и  $\Delta N$ ; значительно облегчается изготовление детали и сохранение высокого качества изображения. Такими деталями являются светофильтры и защитные стекла, расположенные далеко от объектива, в том числе и перед объективами с переменным фокусным расстоянием, вторые компоненты телеобъективов, первая и последняя линзы объективов «Руссар» и «Орион», зеркала в сходящемся пучке лучей и проекционных системах.

На схеме оптики фотообъективов следует указывать основные характеристики — фокусное расстояние, относительное отверстие, поле зрения, предел разрешения, коэффициент светопропускания и на схеме оптики зрительной трубы — увеличение, поле зрения, предел разрешения, диаметр и удаление выходного зрачка, параллакс, коэффициент светопропускания и другие данные, которые зависят от конструкции и назначения прибора; в технических условиях следует делать ссылку на эти величины и приводить методику испытаний, что упрощает внесение изменений. На рис. 1 приведен пример выполнения чертежа двухлинзового склеенного объектива и на рис. 2 — положительной линзы склеенного объектива диоптрийной трубки.

## 6. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ДЕТАЛЯМ

Расчет оптической системы весьма сложен и трудоемок. Система может оказаться низкого качества не только из-за плохого изготовления, но и из-за того, что требования на оптические детали, указанные в чертежах, неправильны и не обеспечивают высокого качества изображения. В одной и той же системе (фотообъективе, окуляре, зрительной трубе, микроскопе) требования к различным деталям ее не могут быть одинаковыми, так как их назначение в зависимости от места в системе различно. Колебания допусков на разные детали одной и той же системы велики, и выставлять какие-то либо средние требования на все детали данной системы нельзя, так как это ведет, как правило, к ненужному ужесточению допусков на большое число деталей и затрудняется поиск погрешности, если система неудовлетворительна.

Требования к показателю преломления и средней дисперсии стекла. В настоящее время большинство оптических систем изготавливают с пересчетом их на оптические постоянные стекла, т. е.

производят дополнительный расчет системы и исправление аберраций на фактические значения показателя преломления и реже средней дисперсии, при этом для компенсации изменения аберраций вследствие отклонений показателя преломления и дисперсии несколько изменяют воздушные промежутки и толщины линз и, что труднее для производства, радиусы кривизны одной-двух поверхностей. При таком условии можно использовать стекло 1—3-й категории по  $\Delta n_D$  ( $\pm 0,0005 \div 0,0010$ ) и 2—3-й категории по  $\Delta(n_F - n_C)$  ( $\pm 0,00007 - 0,00010$ ) и даже грубее в опытном и мелкосерийном производстве высококачественных фотообъективов и объективов зрительных труб с большим увеличением.

В крупносерийном и массовом производстве с целью лучшего использования деталей одной партии, оставшихся некомплектными в процессе изготовления, в другой партии следует употреблять стекло 1—2-й категории по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ , при этом пересчет не требует изменения радиусов и толщин, а изменяются только некоторые воздушные промежутки. На вторые компоненты телеобъективов, линзы небольшой оптической силы, окуляры, призмы в сходящемся ходе лучей употребляют стекло 3—4-й категории по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ , а на пластинки — защитные стекла, сетки, выравнивающие стекла, зеркала, конденсоры, коллективы и призмы в параллельном ходе и афокальные мениски,  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  не нормируются. Большинство любительских фотообъективов и кино-съемочных объективов можно изготавливать без пересчета на фактические  $n_D$  и  $n_F - n_C$ , если на некоторые их детали использовать стекло нулевой категории по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ . Очевидно, что классы однородности А и Б в партии заготовок [ $(\Delta n_D = \pm 0,00005 \div \pm 0,0001$  и  $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0,00001$ ] следует ставить только в чертежах тех оптических систем (фотообъективы и объективы зрительных труб большого увеличения), которые пересчитываются на фактические значения  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$ , и поэтому в партии заготовок должны быть практически одни и те же  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ ; во всех других случаях в чертежах надо ставить класс В: отклонения  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$  в партии заготовок должны быть в пределах указанной на чертеже категории. Соответствующий класс А или Б для каждой детали системы выбирают в зависимости от того, каким отклонением  $n_D$  или  $(n_F - n_C)$  в партии стекла можно пренебречь при пересчете системы, т. е. какими изменениями аберраций из-за отклонений  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$  отдельных заготовок в пределах классов А или Б можно пренебречь. Например, в чертежах линз первого компонента телеобъективов можно указывать класс А, тогда как для линз второго компонента можно вполне довольствоваться и классом Б. Такое же заключение справедливо и для объективов «Гелиос» соответственно для склеиваемых и наружных линз.

**Требования к оптической однородности стекла.** Стекло 1-й категории (предел разрешения и дифракционное изображение точки такие же, как и у идеальной системы) следует назначать только для объективов высокоточных интерференционных, астрономических и геодезических приборов, коллиматоров, микроскопов, т. е. визуальных приборов с высокой разрешающей способностью и качеством изображения (не допускаются даже незначительные искажения дифракционного изображения). Стекло 2—3-й категории по однородности следует применять для объективов точных зрительных труб, прицелов, визиров, репродукционных приборов,

имеющих высокую разрешающую способность и качество изображения.

Для обычных фотообъективов, предназначенных для получения изображения на пленке с пределом разрешения 70—80 линий/мм, следует употреблять стекло 3—4-й категории, т. е. допускать снижение предела разрешения на 10—20% по сравнению с идеальной системой, разрешающей визуально 400—700 линий/мм. Для вторых компонентов телеобъективов, менисков широкоугольных объективов, деталей, близко расположенных от плоскостей изображения (узкие пучки лучей — коллективы, сетки, призмы), и линз окуляров можно применять стекло по однородности 4—5-й категории, а для сеток, выравнивающих стекол однородность не нормируется. Для защитных стекол, призм, светофильтров употребляют стекло с такой же однородностью, как у деталей, около которых они расположены. Это относится также и к другим требованиям к стеклу [кроме  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ ].

**Требования к двойному лучепреломлению стекла.** Большие напряжения в стекле вследствие неравномерного охлаждения при отжиге грубее 5-й категории (разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей более 50 нм на 1 см толщины стекла) могут вызвать появление трещин и выколок при обработке оптических деталей и деформацию поверхностей деталей в процессе обработки и с течением времени. Однако форма деталей также плохо сохраняется и при отсутствии натяжений. По-видимому, стекло 1-й категории по двойному лучепреломлению можно использовать только для интерференционных и астрономических приборов с большим ходом лучей в стекле, чтобы разность хода не превосходила предела Рэлея — четверти длины волны. У объективов высокоточных зрительных труб, коллиматоров, репродукционных микроскопов и зеркал стекло деталей должно быть 2—3-й категории по двойному лучепреломлению, у фотообъективов 3—4-й категории; конденсоры, окуляры простых приборов, лупы изготовляют из стекла 4—5-й категории по двойному лучепреломлению.

**Требования к стеклу по светопоглощению.** В сложных системах с большим числом поверхностей, граничащих с воздухом, и сравнительно небольшой длиной хода луча в стекле (20—50 мм) основные потери света происходят за счет отражения от преломляющих поверхностей и поглощения отражающими поверхностями. Поэтому в таких системах, а также и для тонких деталей целесообразно применять стекло 000, 00, 0 и 1-й категорий (коэффициент светопоглощения 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8%), а следует применять стекло 2—3-й категории (коэффициент светопоглощения 1—1,5%). Для деталей с большим ходом лучей в стекле (призмы, линзы астрономических, фотографических и других приборов) следует использовать стекло 00, 0 и 1-й категорий по светопоглощению.

**Требования к бесшвиности стекла.** Для линз объективов и других деталей, расположенных далеко от плоскости изображения, тонкие, резкие нитевидные или в виде точек свили допустимы, так как их площадь мала и они не могут повлиять заметным образом на качество изображения, но они недопустимы для деталей, расположенных вблизи или в плоскости изображения, так как они видны или влияют на изображение отдельных точек предмета. На объективы интерференционных, астрономических, коллиматорных приборов и микроскопов с предельной разрешающей способностью и качеством изображения необходимо применять стекло

1-й категории по бесствиальности класса В (просмотр в одном указанном направлении), однако тонкие свиля допускаются; особенно вредны потоки свилей, захватывающие большие объемы стекла.

Стекло для окуляров, конденсоров, выравнивающих стекол может иметь свиля 2-й категории. Тяжелые кроны, баритовые и тяжелые флинты сложны по составу и более засвилены, чем стекло других марок.

**Требования к беспузырности стекла.** Стекло деталей, расположенных вблизи или в плоскости изображения, должно быть беспузырным — 1,1а, 2, 3-й категорий (призмы, коллективы, выравнивающие стекла больших размеров при обычном пределе разрешения фотоэмульсий, диапозитивные пластинки). Особенно строгие требования (1,1а категории) предъявляют к пузырности сеток, лимбов, заготовок мир коллиматоров, которые рассматриваются с большим увеличением или деления на которых имеют предельную толщину 0,003—0,005 мм.

Пузыри в стекле объективов всех оптических систем какого-либо заметного влияния на качество изображения не оказывают, и поэтому, например, в любительских фотообъективах и объективах зрительных труб типа бинокля и геодезических приборов допускается пузырность 5—7 категорий (диаметр наибольшего пузыря 0,5—1,0 мм) и классы пузырности Г, Д, Е (300, 1000, 3000 пузырей на 1 кг стекла). В объективах зрительных труб и фотообъективах большего диаметра пузыри допускаются 7—9-й категорий (диаметр пузырей 2—3 мм) и грубее. Если подсчитать возможную площадь пузырей, она, как правило, оказывается менее 0,1% площади входного зрачка, к тому же пузыри предельного размера встречаются редко.

К стеклу светофильтров предъявляются такие же требования, как указанные выше (кроме требований по показателю преломления и дисперсии). Для всех приборов, как правило, по спектральной характеристике можно использовать стекло 2—3-й категории (стекло 2-й категории применяют для аэрофотоаппаратуры и других подобных приборов).

**Требования к пробным стеклам и подгонке под пробное стекло.** Отклонение поверхностей оптических деталей от заданного радиуса и от правильной сферы проверяют пробным стеклом при наложении его на контролируемую поверхность: отклонению в одно интерференционное кольцо или полосу соответствует стрелка в 0,25—0,28 мкм при длине волны света  $\lambda = 500 \div 560$  нм.

Изменение радиуса и кривизны поверхности пропорционально числу колец, наблюдаемых при наложении пробного стекла на проверяемую поверхность, и обратно пропорционально квадрату ее диаметра. Таким образом, изменение кривизны остается постоянным, одинаковым для всех поверхностей, если имеет место одно и то же число колец, отнесенное к одному и тому же диаметру пробного стекла или детали. Если встречаются поверхности различного диаметра, то при том же самом допустимом изменении кривизны на эти поверхности должны назначаться числа колец  $N$ , пропорциональные квадратам диаметров. На поверхности объективов, граничащей с воздухом, обычным допуском является  $N = 3 \div 5$ ,  $\Delta N = 0,3 \div 0,5$ . Для их контроля используют пробные стекла 2-го класса.

Более узкими эти допуски должны быть для внутренних поверхностей двухлинзовых несклеенных объективов или первого



компонента объективов типа «Телемар» и сферических зеркал в зеркально-линзовых объективах ( $N=1\div 2$ ;  $\Delta N=0,2\div 0,03$ ;  $\Delta R=1$  класс) и более грубыми — для склеиваемых поверхностей кроновых линз. Допуски на подгонку под пробное стекло должны быть узкими также для плоских отражающих поверхностей зеркал и призм, расположенных перед объективами зрительных труб или фотообъективами или за ними, но далеко от плоскостей изображения. Только для таких поверхностей и следует назначать допуск на пробное стекло по 1-му классу. Отражающие поверхности призм Довэ и призм с крышей необходимо изготовлять точно; для них часто  $N=0,2\div 0,5$ ;  $\Delta N=0,05\div 0,1$ ; для прямоугольных призм с одной или двумя отражающими гранями и плоских зеркал  $N=0,5\div 1$ ;  $\Delta N=0,2\div 0,3$ . Поверхности деталей, расположенных около плоскости предмета или изображения, не требуют узких допусков ( $N=-$ ;  $\Delta N=-$ ), и для их контроля применяют пробные стекла 3-го класса.

Допуск на пробное стекло, выраженный числом  $N_{пр}$ , интерференционных колец, как и на всякий мерительный инструмент, должен быть в 3—5 раз строже, чем допуск  $N$  на поверхность, проверяемую этим пробным стеклом.

**Требования к центрировке поверхностей.** Чувствительными к центрировке оказываются поверхности микрообъективов, светосильных, широкоугольных, репродукционных фотообъективов и первые компоненты телеобъективов, в том числе и труб с внутренней фокусировкой. Эти поверхности должны центрироваться с точностью 0,003—0,010 мм, что и обеспечивается при сборке методом автоколлимации или конструкцией оправы; линзы изготовляют с децентрировкой до 0,02—0,03 мм, с этой же точностью центрируют и линзы объективов зрительных труб. Для линз окуляров достаточно на центровку с точностью 0,03—0,05, для луп и конденсоров в 0,05—0,1 мм. Следует децентрировку понимать и проверять как косинус — разнотолщинность линз, что удобно для линз большого диаметра.

**Требования к клиновидности пластинок и углам призм.** Клинovidность светофильтров и защитных стекол вызывает отклонение линии визирования, оптической оси, коллимационную ошибку в геодезических приборах и кинофототеодолитах, окраску изображения (хроматизм) в длиннофокусных объективах АФА и зрительных труб и искажение изображения в широкоугольных топографических АФА. Обычно допуски на клиновидность рассчитывают.

Клинovidность светофильтров и защитных стекол в фотоаппаратах и киносъемочных камерах допускается 3—5', сеток 5—10', выравнивающих стекол — как разнотолщинность 0,03—0,05 мм. Углы призм изготовляют с погрешностью 3—5', и только угол между поверхностями крыши выдерживают с погрешностью не более 2—5—10" в зависимости от увеличения системы и места призмы.

**Требования к чистоте поверхностей.** ГОСТ 11141—65 даны рекомендации по выбору классов чистоты. Поверхности оптических деталей должны быть отполированы и не должны иметь точек и царапин, которые портят товарный вид продукции и мешают наблюдению, если они находятся в плоскости изображения: в последнем случае назначают классы чистоты I, I—10, I—20, I—40 (цифры 10, 20, 40 — фокусные расстояния окуляров, через которые рассматривают поверхности, выполненные по этому классу чистоты); класс I—0 — для поверхностей первой линзы широкоугольных

окуляр и микрообъектив с увеличением  $>10^{\times}$  (ширина царапин  $<0,004$  мм и диаметр точек  $<0,02$  мм). На поверхности, расположенные вблизи плоскостей изображения (поверхности линз окуляров, сетки коллиматоров, окулярные призмы, коллективы окуляров и объективы микроскопов с увеличением  $<10^{\times}$ ), назначают классы II—III. Класс IV назначают на линзы окуляров и наружные поверхности любительских фотообъективов, так как точки по классу V грубы (диаметр  $0,02—0,5$  мм) и портят товарный вид. Классы V—VII (царапины шириной  $0,03—0,1$  мм, точки диаметром  $0,5—2,0$  мм) назначают на фотообъективы, объективы зрительных труб и астрономических приборов; класс VII назначается на детали фотографических и астрономических объективов больших размеров ( $100—300$  мм), VIII — на такие же детали размером  $300—500$  мм и класс IX (царапины  $0,3$  мм и точки  $3$  мм) — на неотвешенные смотровые стекла размером  $300—500$  мм.

**Допуски на толщину линз и воздушные промежутки.** Отклонения толщин линз и воздушных промежутков влияя на качество изображения, изменяют аберрации, нарушают коррекцию оптических систем. Влияние это различно, поэтому и допуски должны быть различными. Толщины линз и воздушные промежутки в конденсорах выполняют с допуском  $0,2—0,5$  мм, в лупах и простых окулярах  $\pm 0,1 \div 0,2$  мм, в сложных окулярах  $0,05—0,1$  мм. В зрительных трубах толщину линз объективов выдерживают с погрешностью  $0,1—0,3$  мм, а воздушный промежуток в расклеенных объективах несколько точнее —  $\pm 0,03—0,05$  мм.

В фотообъективах—несветосильных и с небольшим полем зрения толщину и воздушные промежутки выдерживают с допуском  $0,05—0,1$  мм, линзы желательно комплектовать по толщине. В светосильных и широкоугольных фотообъективах при допуске на толщину линз  $\pm 0,05—0,1$  мм необходимо комплектовать линзы по толщине перед склейкой и сборкой для компенсации изменения аберраций, вызываемых отклонениями толщины линз, так как без комплектровки отклонения толщины отдельных линз в  $0,01—0,02$  мм уже заметно влияют на качество изображения. Воздушные промежутки надо выдерживать с погрешностью  $\pm 0,01—0,02$  мм, а некоторые из них еще точнее, в частности в широкоугольных и репродукционных объективах, а также и в высококачественных микрообъективах. В чертежах линз фотообъективов серийного производства следует указывать несимметричные допуски на толщину линз — в минус больше, чем в плюс, иначе большее число линз имеет отклонение толщины в плюс и комплектровка их перед склейкой и сборкой затрудняется.

**Допуски на диаметр линз.** На допуски и посадки линз имеется нормаль, в соответствии с ней и должны устанавливаться допуски.

В склеенной линзе центрирующей линзой является та, у которой толщина по краю больше. Для линз, требующих особо точной центровки, допускается расточка оправы по диаметру линзы: при необходимости выдерживания, например для температурной компенсации, определенного зазора его величину указывают в чертеже оправы. Если линзы лакируют, то до покрытия эмалью их изготовляют с посадкой  $X$  вместо  $D$  и посадкой  $L$  вместо  $X$  и на чертеже линзы указывают размер, например  $\varnothing 40 \frac{L \text{ до покрытия}}{X \text{ после покрытия}}$ .

Рекомендуется выдерживать толщину эмали  $0,005—0,01$  мм.

**Примерные рекомендуемые требования к мате**

№ позиции		1	2	2а	3
Наименование деталей		Объектив коллиматора, астрономи- ческой трубы	Объектив геодезической трубы		Сетка
			1 компо- нент	фокуси- рующая линза	
Требования к материалу	$\Delta n_D$	(1—3) А—Б	(1—3) Б	3В	—
	$\Delta (n_F - n_C)$	(1—2) Б—В	(1—2) А в	2В	—
	Однородность	1	2—3	4	—; 4
	Двойное луче- преломление	3	3	3	—; 4—5
	Свето- поглощение	0—3	0—2	2	3
	Бессвильность	1В	1В	1В	2В
	Пузырность	(7—9) Г, Д и грубее	(6—7) Г, Д	(4—5) Г, Д	1
Требования к изготовлению	$N_1$	$N_{1,4}=3$	$N_{1,4}=3$	5	Полировка на смоле или на сукне
	$\Delta N_1$	$\Delta N_{1,4}=0,3$	0,3	1	
	$N_2$	$N_{2,3}=1 \div 2$	1—2	5	
	$\Delta N_2$	$\Delta N_{2,3}=0,3$	0,3	1	
	$P$	VI; VII	V—VI	IV	1—10; 1—20 или 1—40 $\theta=10 \div 5'$ ,
	$C$	0,02	0,02	0,03	
	$\Delta R$	$\Delta R_{1,4}=2$ $\Delta R_{2,3}=1$	$\Delta R_1=2$ $\Delta R_{2,3}=1$	$\Delta R_4=3$	3; —  $\pm 0,1$
	$\Delta d$	$\pm 0,5—1$ и грубее	$\pm 0,2$	$\div 0,5$	
	$D$	$C_3; X_3$ и грубее	$X, D$	$L_4, X_4$	$X_3; X_4$

Линзы с повышенной точностью центрировки, закрепляемые закаткой (завальцовкой), если при этом центрировка их в оправе происходит при закатке или по «зайчику» (блику) или по автоколлимационной трубке, можно изготавливать с посадкой  $X_3$  или  $L_4$ ; получающийся зазор позволяет центрировать линзу. Такие посадки применяются также и для линз микроскопов и фотообъективов.

При автоколлимационной сборке, когда окончательную обработку посадочных мест оправы производят после закрепления линз в оправе в специальном патроне, позволяющем смещать и поворачивать блок до получения центрировки поверхностей, диаметры линз

Таблица 1

риалу и изготовлению оптических деталей

4	5	6	7	8
Окуляр Кельнера (коллектив)	Окуляр Кельнера (глазная линза)	Объектив бинокля	Призма бинокля	Конденсор
—	(3—4) В	(3—4) В	—; 4В	—
—	3В	(2—3) В	(2—3) В	—
—; 5 4—5	4—5 4	3—4 4	4; 5 4	— 4; 5
1—3	1—3	2—3	1	0—1
1В; 2В (2—3) В, Г	1В (3—4) В, Г	1В (6—7) Г, Д	1В (3—5) Г	2В (3—7) Г, Д
—; 5	5	3; 5	3	$N_{1,2}=10$
—; 1	1	0,3; 1	0,3	$\Delta N_{1,2}=2$ или
5	5	—	0,5—1,5	полировка
1	1	—	0,2—0,3	на смоле
II—III	III—IV	V—VI	III—V	или на сукне
0,1—0,05	0,05	0,03—0,05	III—V	III—VI
—; 3	3	2—3	$\Delta 45^\circ-5'$ , $\pi-5'$	0,1—0,2
$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	0,1—0,2	1—2	3
$X_3; X_4$	$X_3, X_4$	$X_3; L_4$	$\pm 0,5-1,0$	$\pm 0,3-0,5$
			—	$X_4; L_4$

также можно выдерживать с посадкой  $C_3$  или  $X_3$ . Еще грубее могут быть допуски на линзы, которые крепятся в оправе клеем и центрируются при склейке: центрировку их при круглении в оптической цехе можно производить грубо ( $C = 0,05 \div 0,1$ ).

Рекомендуемые требования к материалу и изготовлению некоторых деталей, наиболее часто применяемых в оптико-механических приборах, приведены в табл. 1. Требования, указанные в табл. 1, дополняют замечания к следующим позициям. 1, 2, 10, 11: обычно производится пересчет объективов на конкретные  $\Delta n_D$  и (реже)  $\Delta(n_F - n_C)$  партии стекла, поэтому указываются классы А или Б

№ позиции		9	10	11
Наименование деталей		Очковые линзы	Объектив «Юпитер-8»	Объектив «Руссар»
	$\Delta n_D$	—	(1—3) Б или —ОВ	(2÷3) Б
	$\Delta (n_F - n_C)$	—	(1—2) В	2В
Требования к материалу	Однородность	—; 5	4	4
	Двойное лучепреломление	—; 5	3—4	3—4
	Светопоглощение	2—3; —	1—2	1—2
	Бессвильность Пузырность	2В (3—5) Г	1В 5Г, Д, Е	1В (4—6) Г
Требования к изготовлению	$N_1$	—; 10	3—5	5—10
	$\Delta N_1$	—; 2 или полировка на сукне	0,3—0,5	0,5—1
	$N_2$		—	0,5—1
	$\Delta N_2$		—	0,2—0,3
	$P$	IV	IV—V	IV—V
	$C$	0,1—0,3 и более	0,02—0,01	0,01—0,005
	$\Delta R$	—; 3	2—3	2—3
	$\Delta d$	0,1—0,2	$\pm 0,05$ —0,1	$\pm 0,05$
	$D$	$L_4, X_4$	$X; Д; X_4; L_4$	$X; Д; X_4; L_4$

однородности партии по  $\Delta n_D$  и  $\Delta (n_F - n_C)$  в зависимости от величины изменения аберраций от  $\Delta n_D$  и  $\Delta (n_F - n_C)$ . При учете  $\Delta (n_F - n_C)$  приходится изменять радиусы системы, что труднее для производства. 1, 2: на внутренние поверхности  $N_{2,3}$  и  $\Delta R_{2,3}$  строже, чем  $N_{1,4}$  и  $\Delta R_{1,4}$  на наружные поверхности — примерно обратно пропорционально изменению сходимости поверхностью. При условии склейки на склеиваемые поверхности кроновых линз  $N = 5 \div 10$  и  $\Delta N = 1 \div 2$  и флинтových линз  $N = 3 \div 5$ ;  $\Delta N = 0,5 \div 1$ . Применяют посадки  $C_3, X_3$  при условии расточки оправы по линзе с необходимым зазором. 10, 11: применяют посадки  $X$  и  $Д$  на центрирующую;  $X_4, L_4$  — на нецентрирующую (с узким фасетом, обыч-

Продолжение табл. 1

12	13	14	15	16
Зеркало перед зрительной трубой и аэрофотоаппаратом	Защитное стекло перед АФА $f'=1000; 1:7$ (сменное)	Светофильтр перед АФА $f'=1000; 1:7$ (сменный)	Защитное стекло перед зрительной трубой	Светофильтр за окуляром зрительной трубы
—	—	Спектральная характеристика по 2-й категории	—	Спектральная характеристика по 2-й категории
—	—	—	—	—
— 3	3—4 3	3—4 3	2—3 3—4	—; 5 4—5
—	0÷2	$K_\lambda=2$	1—3	$K_\lambda=2$
— (5—7) Г, Д и грубее	1В (7—9) Г и более	категории 1В (7—9) Г и более	1В (5—7) Г, Д	категории 2В (3—4) Г, Д
0,3—0,5 0,1—0,3 — — V—VII — 1—2 — —	$N_1=3\div 5$ $\Delta N=0,3\div 0,5$ Сумма колец $N_1+N_2<0,5\div 1$ , чтобы обеспечить $f_{\min}$ VI—VIII $\theta=30''\div 3'$	$N_1=3\div 5$ $\Delta N=0,3\div 0,5$ Сумма колец $N_1+N_2<0,5\div 1$ , чтобы обеспечить $f_{\min}$ VI—VII $\theta=30''\div 3'$	3—5 0,3—0,5 — — V—VII $\theta=30''\div 3'$ 2 — —	—; 10 —; 2 или полировка на сукне $f_{\min}=$ $=5\div 10$ м III—IV $\theta=5'\div 10'$ —; 3 0,1÷0,2 $L_4; X_4$

но положительную) линзу. 3: используют классы P1—10; 1—20; 1—40 соответственно для сеток, наблюдаемых через окуляр с фокусным расстоянием  $f'=10, 20$  или 40 мм. 6: применяют посадки  $X_3$  на центрирующую и  $L_4$ —нецентрирующую линзу. 7: допуски  $N=3$  и  $\Delta N=3$  на преломляющие,  $N=0,5$  и  $\Delta N=0,2$  на отражающие объективной и  $N=1,5$ ,  $\Delta N=0,3$  на отражающие поверхности окулярной призмы. Допуск  $\delta 45^\circ$  на разность углов  $45^\circ$  и  $\pi$ —допуск на пирамидальность. 8: допуск, на децентрировку зависит от  $f'$  линзы, обычно  $c/f' 3438 < 20' = 0,5$  призмной диоптрии. 10, 11: при  $\Delta d=0,05\div 0,1$  обязательна комплектовка линз по толщине перед склейкой и сборкой по определенным правилам.

Допуски на децентрировку указаны для собранного объектива. При сборке методом автоколлимации или центрировке при сборке  $s = 0,02 \div 0,05$  мм (при изготовлении линз). Допуски  $N = 5 \div 10$  и  $\Delta N = 1 \div 2$  назначают на склеиваемые поверхности кроновых линз или на поверхности наружных линз — полусфер и  $N = 0,5 \div 1$  и  $\Delta N = 0,2 \div 0,3$  на наружные поверхности и  $N = 3$ ;  $\Delta N = 0,5$  на склеиваемые поверхности флинтowych линз склеенных блоков объектива «Руссар». 7, 12: допуски  $N$  и  $\Delta N$  отражающих поверхностей должны быть рассчитаны по формулам, предлагаемым ниже. 13, 14, 15: клиновидность  $\theta$  подсчитывают исходя из допустимого хроматизма, смещения главной точки снимка или искажения изображения:  $f'_{\min}$  подсчитывают с учетом допустимой расфокусировки АФА или параллакса зрительной трубы.

## 7. ПЕРЕСЧЕТ ФОТООБЪЕКТИВОВ НА ПЛАВКИ СТЕКЛА

Еще в 1930 г. инженер Шошин И. А. [13] указывал на возможность использования таблиц влияния изменения параметров на аберрации, вызываемых отклонениями толщин линз, и на посылку в сборочный цех линз комплектами. Однако до 1942—1944 гг. эта возможность практически не использовалась в серийном производстве, хотя как раз в серийном производстве комплектовка линз по толщине может дать наибольший эффект. Автор занимался в 1944—1963 гг. разработкой и внедрением в крупносерийное производство метода пересчета систем на плавки и правил комплектовки линз по толщине для ряда различных фотообъективов, изготавливаемых в крупносерийном и опытном производстве. Подобные фотообъективы раньше или не изготавливали, или изготавливали небольшими партиями. Ниже указаны некоторые особенности этого метода изготовления высококачественных фотообъективов.

В многолинзовых системах при значительном числе параметров более благоприятны условия компенсации погрешностей отдельных параметров, т. е. вероятность совпадения параметров с предельными отклонениями меньше. Поэтому при правильно рассчитанных допусках эти системы могут быть изготовлены при менее строгих допусках, если к тому же в них обращено внимание на особо чувствительные параметры, допуски на которые и должны быть особенно аккуратно рассчитаны и выдержаны при изготовлении. Не следует забывать, что большинство отклонений параметров имеет систематический характер. Их целесообразно исключить в процессе изготовления оптических систем, так как только за счет этого допуски на другие параметры могут быть расширены, а качество изображения повышено. Если не исключить такие отклонения, то возможно их неблагоприятное сочетание, которое недопустимо снизит качество изображения и потребует более точной сборки. К тому же о низком качестве изображения станет известно только после изготовления оптической системы. К систематическим отклонениям параметров, повторяющимся у каждого объектива данной партии, следует отнести отклонения от расчетных значений показателя преломления, дисперсии и радиусов эталонных пробных стекол (ЭПС). Отклонения радиусов ЭПС остаются систематическими для любой партии стекла: эти отклонения должны быть учтены сразу же после изготовления и измерения ЭПС путем дополнительной коррекции системы. Отклонения же показателей преломления и дисперсии стекла партии линз необходимо учитывать

перед запуском данной партии стекла в производство также путем дополнительной коррекции (пересчета системы).

К случайным погрешностям относятся погрешности толщин линз, воздушных промежутков, радиусов поверхностей линз при их подгонке под пробное стекло. Эти погрешности можно определить с необходимой точностью, и при желании их влияние, особенно влияние отклонений толщин линз, можно исключить.

Таким образом, неблагоприятное влияние отклонений показателя преломления и дисперсии стекла, погрешностей изготовления ЭПС (то же, что и радиусов поверхностей) и толщин линз, т. е. большей части погрешностей параметров системы, может быть исключено, как и всякое влияние систематических погрешностей. Если отклонения поверхностей линз от пробного стекла не учитывать при изготовлении, считая их случайными, то задача расчета допусков на подгонку под пробное стекло поверхностей системы (т. е. на сравнительно небольшое число параметров) упрощается.

**Метод пересчета на плавки и комплектовки по толщине.** Метод изготовления оптических систем с учетом и исключением влияния отклонений показателей преломления и толщин отдельных линз может быть назван методом пересчета системы на плавки и комплектовки линз по толщинам.

Этот метод осуществляется следующим образом.

1. Завод оптического стекла изготавливает партию заготовок линз системы, выдерживая требования к стеклу согласно чертежу или правилам комплектовки, и снабжает их паспортом.

2. Вычислительное бюро на основании паспорта или измерений констант стекла ( $n_D$ ,  $n_F - n_C$ ) данной комбинации (партии) заготовок проверяет, допустимы ли отклонения аберраций вследствие отклонений констант стекла. Если не требуется дополнительная коррекция и аберрации системы такие же, как и у расчетной системы, то в оптический цех сообщают о возможности изготовления линз этой комбинации заготовок по данным основного расчета. Если же комбинация заготовок не обеспечивает хорошее качество изображения, то производят дополнительную коррекцию системы: изменяют отдельные воздушные промежутки, толщины линз или в крайнем случае радиусы некоторых поверхностей. Комбинации стекол присваивают номер и об изменении параметров этой комбинации сообщают в оптический цех, а после комплектовки линз — и в сборочный цех.

3. При пересчете руководствуются тем, чтобы простыми средствами приблизить по качеству изображения данную систему к основной, учитывая при этом и возможности производства, не внося новых затруднений в процесс изготовления. Пересчет облегчается, если завод оптического стекла комплектует стекло по правилам, разработанным бюро. Если завод располагает рядом плавков отдельных линз объектива, вычислительное бюро может составлять из них такие комбинации, при которых не потребуются изменения параметров системы, хотя качество изображения остается высоким при использовании стекла с  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  даже и вне обычных допусков.

4. После изготовления линз толщины их измеряют. Склеиваемые линзы комплектуют по толщине перед склейкой и сборкой, при этом линзы располагают в комплекте так, чтобы одни отклонения толщин линз компенсировались другими. В противном случае, если таких линз не имеется, изменяют воздушные промежутки.



Полученные данные выписывают в таблицу толщин, работник ОТК или цеха комплектует линзы согласно таблице толщин и скомплектованные линзы вместе с таблицей толщин передает в сборочный цех. При больших партиях для удобства сборки комплекты линз следует подавать группами с практически одинаковыми параметрами (толщинами и воздушными промежутками).

5. В сборочном цехе каждый объектив собирают согласно таблице толщин, т. е. только из линз определенной комбинации, толщины и с воздушными промежутками, указанными в этой таблице.

6. Вычислительное бюро вместе с ОТК сборочного цеха следит за качеством объективов и вносит коррективы в методы комплектовки линз и пересчета оптических систем.

Положительные стороны метода заключаются в следующем.

1. Исключается возможность неблагоприятных сочетаний отклонений показателя преломления и толщин линз, а также и радиусов пробных стекол, при которых погрешности изготовления складываются.

2. Появляется возможность расширения допусков на все параметры системы без снижения качества изображения.

3. Улучшается качество изображения и тех оптических систем, взаимозаменяемость линз которых обеспечивается и широкими допусками.

4. Имеется возможность расширения допусков на сборку, так как после изготовления оптических деталей до сборки система практически не имеет каких-либо отклонений от основной системы по качеству изображения, и сборщику-механику оставляется более широкое поле допуска, которое он может использовать без недопустимого ухудшения качества изображения (например, при выдерживании воздушных промежутков).

Опыт показывает, что рассматриваемый метод позволяет использовать для изготовления светосильных и широкоугольных объективов, чувствительных к отклонениям показателей преломления и толщин линз, стекла (2—3)Б категории по  $\Delta n_D$  и (1—2)В категории по  $\Delta(n_F - n_C)$  и линз с отклонением толщин до 0,1—0,2 мм (вместо обычных с 0,01—0,03 мм). Выдерживание воздушных промежутков с обычной погрешностью 0,02—0,03 мм практически всегда обеспечивает высокое качество изображения, но и более грубая погрешность в выдерживании некоторых воздушных промежутков при этом методе еще не вызывает заметного ухудшения качества изображения. Многолетний опыт изготовления различных высококачественных фотообъективов подтверждает положительные стороны метода пересчета и комплектовки. Широугольные фотообъективы, чувствительные к отклонению толщин линз, особенно при повышенных требованиях к дисторсии, можно изготавливать серийно только с помощью указанного метода, обеспечивая рентабельное производство.

Высказанные соображения справедливы и для объективов геодезических и астрономических приборов, чувствительных к отклонениям  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$ .

**Замечания о пересчете фотообъективов на оптические постоянные плавков.** Влияние отклонения радиусов эпс (эталонных пробных стекол) на качество изображения исключается при пересчете системы дополнительной коррекцией, аналогичной пересчету на плавки и производимой сразу же после точного измерения радиусов эпс, т. е. перед запуском оптической системы в производство. Пересчет

на радиусы пробных стекол и на плавки стекла производится легче с помощью таблицы влияния изменения параметров на аберрации (ТВ). В ТВ сведены результаты расчета ряда лучей, проходящих через оптическую систему, каждый параметр которой ( $n_D$ ,  $n_F - n_C$ ,  $d$ ,  $l$ ,  $r$ ) поочередно изменяется. Производят расчет таких лучей, которые позволяют вычислить изменение фокусного и вершинного фокусного расстояния, хроматизма положения, сферической аберрации, комы (иногда только коэффициента изопланатизма), астигматизма, хроматизма увеличения и дисторсии — для точки на оси и для двух точек поля (под углом  $\omega$  и  $0,7\omega$ ). Изменение параметров следует задавать такой величины, при которой становится заметным изменение аберраций, близких к погрешностям изготовления, встречающимся в производстве. Например, для фотообъективов с  $f' = 30 \div 100$  мм; относительным отверстием  $1:2,8 \div 1:2$ ;  $2\omega = 70 \div 30^\circ$  можно принять  $\Delta n = \pm 0,001$ ,  $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0,0001$ ;  $\Delta d = 0,2 \div 0,3$  мм;  $\Delta r_1 = \pm 1\%$   $\Delta r_1$  и  $\Delta r_v = \left(\frac{r_v}{r_1}\right)^2 \Delta r_1$ . Для широкоугольных систем следует брать  $\Delta d = \Delta l = 0,05 \div 0,1$  мм. ТВ является в серийном производстве основным руководством при пересчете системы на плавки и пробные стекла, разработке правил комплектовки стекла и линз по толщинам и для расчета допусков на параметры системы. С помощью ТВ можно также решать задачи по исправлению оптических систем, показавших после сборки пониженное качество вследствие неблагоприятного сочетания погрешностей изготовления. После измерения аберраций таких систем с помощью ТВ можно определить величину изменения воздушных промежутков, необходимую для приведения аберраций к значениям основной системы.

При пересчете системы обращают внимание на дополнительную коррекцию тех же аберраций, которые исправляют в системе при ее расчете. Отклонение хроматической аберрации практически нельзя устранить (требуется изменение радиусов склейки), при пересчете лишь определить допустимость ее изменения и возможность использования стекла с данными отклонениями дисперсии. Поэтому в чертежах  $\Delta(n_F - n_C)$  следует указывать (1—2) В категории, влиянием которого обычно можно пренебречь. Также при этом следует обращать внимание на отклонение фокусного и вершинного фокусного расстояний. Первое не должно быть недопустимым при работе объектива с дальномером, так как может нарушиться правильная фокусировка с помощью дальномера (или может заметно измениться цена деления сеток в других приборах). Второе может оказаться недопустимым вследствие затруднений при выдерживании рабочего расстояния объектива. В широкоугольных топографических и репродукционных объективах обращают внимание также и на недопустимость увеличения дисторсии. При пересчете следует стремиться, изменяя воздушные промежутки или толщины линз, насколько возможно полнее устранить отклонения аберраций от их значений в основной системе, чтобы тем самым оставить более широкое поле допуска для производства и приблизить данную комбинацию по качеству изображения к исходной системе. Обычно для этого оказывается достаточным изменение одного или двух воздушных промежутков, толщины одной или двух линз; при изменении небольшого числа параметров производство упрощается. Таким образом, в результате пересчета обеспечивается высокое качество изо-

бражения запускаемой в производство оптической системы по всему полю, хотя параметры системы и будут иметь отклонения от параметров основной системы.

При определении допустимых отклонений aberrаций можно исходить из допустимого кружка рассеяния вследствие изменения той или другой aberrации, положения наилучшей плоскости установки при колебании отдельных aberrаций, принимая их равными, например, одной пятой глубины резкости. Однако лучше, если эти отклонения aberrаций при пересчете являются совершенно незначительными, тогда большее поле допуска на отклонение aberrаций может быть использовано при изготовлении линз и сборке объектива.

Пересчет системы на плавки заключается в следующем: вычисляют отклонения показателей преломления стекла отдельных линз от их номинальных значений, которые выписывают против соответствующих номеров деталей. С помощью ТВ подсчитывают изменения aberrаций, фокусного и вершинного фокусного расстояний, соответствующие отклонениям показателя преломления отдельных линз, против которых их и выписывают также столбиком. После этого производят суммирование. Если сумма не выходит за пределы допустимого отклонения, то в оптический цех сообщают о возможности изготовления деталей из стекла данной комбинации без изменения параметров. Если отклонения aberrаций данной комбинации стекла недопустимы, то изменением в первую очередь одного или двух воздушных промежутков, а если этого недостаточно, то и толщин одной или нескольких линз, их компенсируют полностью или приводят к допустимым величинам. В многокомпонентной системе всегда найдутся параметры, заметно влияющие на одни и незаметно влияющие на другие aberrации и характеристики системы, которыми и необходимо воспользоваться при пересчете. После пересчета, произведенного с помощью ТВ, следует сделать контрольный расчет системы при измененных параметрах; однако при параметрах, близких к уже ранее испытанным тригонометрически, его можно и не делать. Пример ТВ (сокращенно) приведен в табл. 2.

Например, пересчет объектива И50 выглядит так (см. табл. 2).

## Комбинация 2

Линза	$n_D$	$\Delta n_D$	$\Delta f'$	$\Delta s'_F$	$\Delta \delta s'$	$\Delta x'_s$	$\Delta x'_m$
1	1,6135	+5	-0,06	-0,078	-0,011	-0,005	-0,010
2	1,5743	-1	-0,015	-0,016	-0,004	-0,005	-0,001
3	1,5291	-3	-0,041	-0,036	-0,010	-0,004	-0,015
4	1,6135	+5	-0,117	-0,102	-0,024	-0,012	-0,029
Сумма	. . . . .		-0,236	-0,232	-0,049	-0,927	-0,055
$\Delta I_1 - 0,05$	. . . . .		+0,047	+0,177	+0,051	+0,009	+0,045
Результат	. . . . .		-0,189	-0,055	+0,002	-0,018	-0,009

Для компенсации отклонений aberrаций, вызываемых отклонениями радиусов пробных стекол и показателей преломления, исключительно редко приходится изменять радиусы поверхностей.

Т а б л и ц а 2

Таблица влияния изменения параметров на aberrации (ТВ). Фотообъектив «Индустар 50»

Величины изменения параметра	$u_1; n_1=0; f'=52,48;$ $S_F'=43,62$		$u_1=0;$ $h_1=5,25;$ $\delta s=-0,23$		$u_1=0;$ $h_1=7,5;$ $\delta s=0,10$		$w=-15^\circ$				$w=-22^\circ 30'$		$y'_6-y'_c=$ $=0,026$
	$\Delta f'$	$\Delta S_F'$	$\Delta \delta s$	$\Delta \delta s'$			$x'_s =$ $=-0,19$	$x'_m =$ $=0,09$	$x'_s =$ $=-0,04$	$x'_m =$ $=-0,62$	$\delta y' =$ $=-0,22$	$\Delta \delta y'$	$\Delta(y'_G-y'_C)$
$\Delta r_1=0,171$	0,79	0,99	0,10	0,26	0,00	0,021	0,007	0,021	0,007	0,02	0,196	0,007	-0,011
$\Delta r_2=1710$	0,73	0,86	0,09	0,23	0,067	0,19	0,19	0,19	0,19	0,57	-0,048	-0,005	-0,005
$\Delta r_3=0,66$	-0,53	-0,56	-0,12	-0,26	-0,04	-0,096	-0,11	-0,096	-0,11	-0,216	+0,013	-0,001	-0,001
$\Delta r_4=0,124$	-0,52	-0,55	-0,06	-0,21	-0,01	0,003	-0,028	0,003	-0,028	0,038	0,007	-0,009	-0,009
$\Delta r_5=70,3$	0,53	0,48	0,014	0,04	0,027	0,061	0,07	0,061	0,07	0,128	0,004	0,001	0,001
$\Delta r_6=0,132$	0,10	0,09	0,014	0,055	0,007	0,024	0,016	0,024	0,016	0,059	0,002	0,004	-0,004
$\Delta r_7=0,326$	0,83	0,68	0,08	0,21	0,009	0,009	0,033	0,009	0,033	-0,013	0,006	0,001	0,001
$\Delta d_1=0,1$	-0,057	-0,22	-0,027	-0,074	0,009	0,021	0,017	0,021	0,017	-0,005	0,007	-0,001	-0,001
$\Delta d_2=0,1$	-0,092	-0,35	-0,048	-0,132	-0,002	-0,025	-0,019	-0,025	-0,019	0,182	0,029	0,004	0,004
$\Delta d_3=0,1$	0,015	-0,085	-0,004	-0,013	0,029	0,085	0,071	0,029	0,071	0,181	-0,001	0,004	-0,003
$\Delta d_4=0,1$	-0,076	-0,02	-0,013	-0,035	0,010	0,022	0,02	0,022	0,02	0,025	0,012	-0,001	-0,001
$\Delta d_5=0,1$	-0,038	-0,008	-0,008	-0,02	0,006	0,017	0,012	0,017	0,012	0,026	-0,007	-0,001	-0,001
$\Delta d_6=0,1$	-0,011	-0,001	-0,001	-0,005	0,012	0,035	0,029	0,035	0,029	0,079	0,005	0,005	0,005
$\Delta n_1=0,001$	-0,126	-0,157	-0,011	-0,021	-0,004	-0,008	-0,009	-0,008	-0,009	-0,019	-0,002	-0,002	-0,002
$\Delta n_2=0,001$	0,158	0,167	0,014	0,038	0,002	0,009	0,055	0,009	0,055	0,010	0,002	0,002	0,002
$\Delta n_3=0,001$	0,136	0,12	0,012	0,033	0,008	0,022	0,013	0,022	0,013	0,054	0,004	0,004	0,004
$\Delta n_4=0,001$	-0,235	-0,20	-0,018	-0,047	-0,010	-0,027	-0,064	-0,027	-0,064	-0,058	-0,003	-0,003	-0,003
$\Delta(S'_6-S'_c)_0 = -0,012$													-0,06
$\Delta(S'_6-S'_c)_0 = 0,015$													0,07
$\Delta(S'_6-S'_c)_0 = 0,011$													0,05
$\Delta(S'_6-S'_c)_0 = -0,021$													-0,09

При этом пользуются такими радиусами пробных стекол и инструмента, которые имеются в наличии. Конечно, необходимо в процессе изготовления деталей в оптическом цехе исключить смешивание линз разных комбинаций, особенно линз оптических систем, чувствительных к изменению аберраций. Так как часть линз данной комбинации остается неиспользованной вследствие отбраковки некоторых линз, то годные линзы можно использовать в других комбинациях, если учесть отклонения их параметров в новой комбинации.

Следует заметить, что если в 1942—1950 гг. пересчет систем на  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  партии стекла и комплектовки стекла по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  были необходимы, так как заводы оптического стекла не могли быстро осваивать новые марки стекла и обеспечивать строгое выдерживание  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$ , то в настоящее время этот метод необходим в связи с расчетом новых более высококачественных систем и повышением требований к качеству изображения. Например, изготовление объективов «Индустар», «Юпитер», «Гелиос» из стекла по  $\Delta n_D$  1-й категории без учета  $\Delta n_D$  является рискованным, так как даже отклонение фокусного расстояния этих объективов при неблагоприятном сочетании только  $\Delta n_D$  отдельных линз может составить  $\pm 0,5\% f'$ , что уже недопустимо для объективов, работающих с дальномером или по шкале дистанции. При этом заметным становится и изменение аберраций, однако пересчет упрощается и легче использовать линзы одной партии в другой, менее опасна путаница стекла.

Пересчет короткофокусных любительских фотообъективов может свестись к простому контролю за  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  линз, если стекло 1-й категории по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  отдельных линз комплектуется и поставляется стекловаренным заводом хотя бы с соблюдением простого правила — стекло положительных и отрицательных линз (даже не всех, особо оговоренных) должно иметь одинаковое (для отрицательных линз желательно на 30—50% больше) по величине и знаку отклонение показателя преломления и дисперсии в пределах  $\pm 0,002$ — $0,0003$  и  $\pm 0,00003$ — $0,0005$  соответственно. Для длиннофокусных объективов геодезических и астрономических труб и аэрофотоаппаратов пересчет на плавки необходим даже и при использовании стекла с  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  по 1-й категории; например, отклонение  $n_D$  величиной  $0,0002$  отдельных линз объектива «Телемар» с  $f' = 1000$ ; 1 : 7 вызывает заметное ( $0,02$ — $0,05$  мм) изменение аберраций и поэтому должно учитываться при пересчете. Только использование стекла 0-й категории по  $\Delta n_D$  и 1—2-й категории по  $\Delta(n_F - n_C)$  позволяет изготавливать короткофокусные фотообъективы без учета  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$ .

## 8. КОМПЛЕКТОВКА ЛИНЗ ПО ТОЛЩИНЕ

Отклонения толщин линз имеют случайный характер со сдвигом кривой распределения (близкой по форме к кривой статистического распределения Эйлера—Гаусса) в сторону положительных отклонений толщин линз. В этом сказывается стремление рабочего-оптика изготовить линзу толще номинального размера, чтобы при необходимости исправить неправильную подгонку под пробное стекло или удалить царапины. С введением метода комплектровки линз, при котором допуски на толщины могут быть расширены до  $0,1$ — $0,2$  мм, более желательны линзы с отклонениями

толщины в минус и поэтому поле допуска должно быть не симметричным — в плюс меньше, чем в минус.

**Комплектовка линз по толщине перед склейкой.** Чтобы исключить сложение погрешностей толщины отдельных склеиваемых линз и таким образом исключить снижение качества изображения, склеиваемые линзы следует комплектовать по толщине перед склейкой. В этом случае нетрудно получить в серийном производстве склеенные линзы (блоки) с незначительным отклонением толщины ( $\pm 0,02 \div 0,05$ ).

Влияние отклонений толщины отдельных линз склеенного блока на изменение аберраций однозначно; по величине это влияние не совсем одинаково. Так как отклонения толщин склеиваемых линз невелики (0,1—0,2 мм в фотообъективах и 0,2—0,5 мм в простых зрительных трубах), допущение равного влияния на изменение аберраций отклонений толщин отдельных склеиваемых линз дает хорошие результаты в отношении компенсации отклонения аберраций, к тому же значительно упрощает комплектацию линз и сборку оптических систем (можно обезличить склеенные линзы). Поэтому линзы перед склейкой следует комплектовать по толщине так, чтобы алгебраическая сумма отклонений толщин равнялась нулю или примерно нулю; отклонение толщины одной линзы в плюс, другой, склеиваемой с первой на столько же в минус и наоборот. Для трехлинзовых склеенных блоков отклонение толщины одной из линз должно быть равно по абсолютной величине и противоположно по знаку сумме отклонений толщин других линз. Желательно блок линз составлять так, чтобы его толщина до склейки получилась несколько тоньше его номинальной величины — после склейки толщина блока станет номинальной. Толщина одного слоя склейки составляет 0,015—0,03 мм. Влияние голщины слоя склейки на аберрации целесообразно принять равным влиянию толщины той линзы из склеиваемых, показатель преломления которой близок к показателю преломления клея (обычно  $n = 1,52 \div 1,54$ ). Толщину слоя склейки следует учитывать особенно точно и строго в системах, чувствительных к изменению толщин (например, в широкоугольных аэросъемочных фотообъективах и репродукционных объективах).

Комплектовка склеиваемых линз окуляров и двухлинзовых склеенных объективов сколько-нибудь заметного эффекта в отношении качества изображения не дает, но для сборки создает некоторые удобства: при грубых допусках на толщины отдельных склеиваемых линз окуляра (до  $\pm 0,5$  мм) позволяет получить одинаковые по толщине блоки, сократить припуски на подрезку опорных торцов и удобнее расположить зажимное кольцо в оправе. Однако комплектровка линз перед склейкой является простым средством для компенсации изменений аберраций вследствие отклонения толщин линз, и поэтому было бы совершенно нецелесообразно не воспользоваться им для улучшения качества оптических систем. Иногда приходится подбирать линзы по толщине перед склейкой так, чтобы склеенный блок имел определенное отклонение толщины в плюс или в минус в зависимости от наличия других линз системы с отклонениями толщины систематического характера (большинство линз имеют отклонения толщин или только в плюс, или только в минус).

Комплектовка линз по толщине без учета особого влияния отклонений толщин отдельных линз, при котором алгебраическая

сумма отклонений толщин линз склеенного блока с учетом толщины слоя склейки равна нулю, дает хорошие результаты для фотообъективов к камерам «Киев», «Зоркий» и другим фотоаппаратам при отклонениях толщин отдельных линз до  $\pm 0,2$  мм. Это подтверждается и опытом, и вычислениями. Однако в широкоугольных азросъемочных объективах «Руссар» следует учитывать и разницу во влиянии на изменение аберраций отклонения толщин отдельных склеиваемых линз — линзы нельзя оставлять обезличенными, их следует нумеровать для учета отклонения их толщин при последующей комплектровке перед сборкой.

**Комплектовка линз по толщине перед сборкой.** Необходимость комплектровки линз по толщине очевидна: ведь даже в короткофокусных объективах «Индустар 50», «Юпитер 8», «Юпитер 9» отклонение толщин некоторых линз в 0,05 мм вызывает изменение сферической аберрации и меридиональной кривизны на 0,05—0,1 мм (а в широкоугольных до 0,5—0,8 мм), если это изменение не скомпенсировано комплектровкой линз по толщине или изменением воздушных промежутков. В настоящее время используются два способа комплектровки линз по толщинам. Первый из них применяют в опытном или мелкосерийном производстве. Этот способ не должен и практически не может применяться в серийном производстве вследствие его трудоемкости. Заключается он в следующем. Оптических деталей имеется немного — на два, три комплекта; поэтому редко удается расположить эти линзы в таблице толщин благоприятным образом, когда влияние отклонений толщин на аберрации компенсируется и почти не требуется изменения воздушных промежутков или это необходимое изменение невелико (0,02—0,05 мм). Поэтому, расположив линзы в таблице толщин желательно благоприятным образом и пользуясь ТВ, подсчитывают отклонения аберраций, соответствующие отклонениям толщин каждой линзы комплекта, и затем их суммируют. Если суммы отклонений недопустимы, то изменением воздушных промежутков приводят их к допустимым величинам. Измененные воздушные промежутки выписывают в таблицу толщин, укомплектовывают линзы и затем собирают оптическую систему, выдерживая воздушные промежутки, указанные в таблице толщин. Этот способ трудоемкий, так как он заключается практически в пересчете оптической системы на толщины линз каждого комплекта оптики. Однако только с помощью этого способа возможно изготовление высококачественных репродукционных и картографических широкоугольных фотообъективов, в которых важно исключение изменения дисторсии; их изготавливают обычно небольшими сериями. Следует отметить, что выдерживание номинальных воздушных промежутков с точностью  $\pm 0,01$  мм оказывается бессмысленным, если такие же отклонения толщин линз не скомпенсированы соответствующим изменением номинальных воздушных промежутков. Правильно назначенный или измененный при комплектровке в таких системах воздушный промежуток необходимо выдерживать с погрешностью не более  $\pm 0,01$ —0,02 мм (для объективов «Руссар» к прибору «Мультиплекс» не более 0,01 мм). Если же не произведена комплектровка и ничем не скомпенсированы отклонения толщин линз, то и такая высокая точность сборки не дает объективов хорошего качества. Например, в объективах «Руссар» при изменении толщины каждой линзы на 0,05 мм величина  $x_m$  изменяется на 0,5—0,8 мм и дисторсия на 0,1—0,3 мм.

Второй способ следует применять в серийном и крупносерийном производствах. Заключается он в том, что на основе ТВ устанавливают соотношение между влиянием отклонений толщин отдельных линз системы на абберации, при котором эти отклонения толщин линз компенсируются; согласно этому соотношению и подбирают линзы в комплект оптики. В простых системах, изготавливаемых крупносерийно, воздушные промежутки при комплектовке и сборке не изменяются, и компенсация влияния отклонений толщин обеспечивается благоприятным расположением линз по толщине в комплекте согласно вышеуказанному соотношению. Однако, когда заготовки линз дороги, допуски на толщины сравнительно широки и изготовление производят небольшими сериями — имеется мало линз и поэтому нет возможности подбора линз с благоприятными отклонениями толщин линз, следует для полной компенсации производить и изменение воздушных промежутков. Например, для объектива «Индустар 50» к фотоаппарату «Зоркий» на основе ТВ (табл. 2) можно вывести такое простое правило комплектовки линз по толщине: к первой линзе подобрать вторую линзу с таким же или несколько меньшим по абсолютной величине, но противоположного знака отклонением толщины и к ним подобрать склеенную линзу (третью — четвертую) с равным или несколько большим отклонением толщины, чем первой линзы. Воздушные промежутки можно не изменять; однако при отклонениях толщины первой линзы более  $\pm 0,1$  мм и второй линзы более  $\pm 0,05$  мм следует изменять первый воздушный промежуток на величину, равную половине отклонения толщины первой линзы с противоположным знаком. Отклонение толщины нежелательно более 0,02 мм (особенно второй линзы). Для фотообъективов важно сохранить изменения сферической абберации и астигматизма (достаточно в основном только величины  $x'_m$ ) в допустимых пределах. Если имеется возможность изменения только одного воздушного промежутка, то, очевидно, можно произвести только частичную компенсацию этих двух аббераций, что и делают в объективах, подобных И50, и объективах к аппарату «Зоркий» и «Киев». В этом случае наиболее важную абберацию — сферическую, например в светосильных, но сравнительно неширокоугольных системах, и астигматизм, и кривизну (достаточно  $x'_m$  в широкоугольных системах «Орион», «Руссар») можно компенсировать полностью и, исходя из этого, составить правила комплектовки. Однако следует оговорить в правилах определенное соотношение между отклонениями толщин отдельных линз или ограничить их отклонения, при которых изменения одной или двух других аббераций остаются в допустимых пределах. Подобное примечание сделано, например, в отношении комплектовки объектива Ю11: положительным отклонениям толщины склеенной линзы должны соответствовать отрицательные отклонения толщины четвертой линзы и наоборот. Это правило служит для исключения недопустимого отклонения фокусного расстояния объектива, фокусировка которого производится в аппарате с помощью дальномера. Подобные же примечания в правилах комплектовки могут делаться также и с целью сохранения расчетной дисторсии. Если имеется возможность изменения двух промежутков, как, например, в объективах «Телемар», то можно достаточно полно компенсировать изменения двух аббераций, например, сферической и астигматизма ( $\Delta x'_m$ ). При желании или необходимости



можно еще и изменение дисторсии удерживать в определенных допустимых границах посредством только определенного сочетания отклонений толщин отдельных линз. На основе ТВ (табл. 3) мож-

Т а б л и ц а 3

Таблица влияния изменения параметров на абберации (ТВ).  
Фотообъектив «Телемар»

Величина изменения параметра	$u_1=0; h_1=0;$ $f'=994,47;$ $s'_p=409,81$				$u_1=-12^\circ$			
	$u_1=0; h=49,5;$ $\delta s'=-0,50$				$u_1=0; h=70,5;$ $\delta s'=0,06$			
	$\Delta f'$	$\Delta s'_{F'}$	$\Delta \delta s'$	$\Delta \delta s'$	$x'_s$ -0,52	$x'_m$ -0,18	$\delta Y' \%$ 0,32	$y'_F - y'_C$ -0,26
					$\Delta x'_s$	$\Delta x'_m$	$\Delta \delta Y'$	$\Delta(y'_F - y'_C)$
$\Delta d_1=0,5$	-2,80	-2,60	-0,16	-0,38	0,15	0,34	0,01	0,01
$\Delta d_2=0,5$	-11,44	-9,29	-1,45	-3,41	-1,37	-4,42	0,10	0,03
$\Delta d_3=0,5$	-2,11	-1,96	-0,13	-0,29	0,13	0,40	0,01	0,0
$\Delta d_4=0,5$	-1,16	-1,38	-0,12	-0,27	0,20	0,56	0,01	0,0
$\Delta d_5=0,5$	-0,24	-0,02	0,0	0,00	0,09	0,24	-0,01	-0,01
$\Delta d_6=0,5$	0,22	-0,03	0,0	0,01	0,07	0,21	0,01	-0,01
$\Delta d_7=0,5$	0,15	-0,03	0,0	0,01	0,04	0,10	0,0	0,0

но написать в виде таблички числа, выражающие весовое соотношение влияния отклонений толщин отдельных линз и воздушных промежутков на сферическую абберацию и положение фокуса меридионального элементарного пучка ( $x'_m$ ) в сравнении с влиянием отклонения толщины первой линзы, приняв последнее за единицу. Как правило, для компенсации изменений астигматизма и кривизны при комплектовке и пересчете оптической системы, оказывается, достаточно скомпенсировать изменение величины  $x'_m$ . Например, для телеобъектива «Телемар 7» получим такую табличку:

Изменение абберации	$\Delta d_1$	$\Delta l_1$	$\Delta d_2$	$\Delta l_2$	$\Delta d_3$	$\Delta l_3$	$\Delta d_4$
$\Delta \delta s'$	1	8,34	0,69	0,65	0	0	0
$\Delta x'_m$	+1	-15,0	1,37	1,87	0,8	0,7	0,33

С помощью такой таблички комплектовка линз фотообъектива облегчается. Для этого предназначенные для комплектовки линзы располагаем в комплектах (строках таблицы толщин) благоприятным образом, т. е. так («Телемар 7»), чтобы положительным отклонениям толщины первой линзы соответствовали такие же или несколько большие, но противоположного знака, отклонения

толщины второй линзы. Отклонения толщин третьей и четвертой линз желательны такого же знака, что и отклонение толщины первой линзы, но отклонения толщины этих линз имеют меньшее значение. Умножаем отклонения толщин линз с учетом их знака на соответствующие числа первой строки, алгебраически складываем и сумму делим на 0,65 для нахождения величины изменения второго воздушного промежутка, которое необходимо для компенсации изменения сферической аберрации вследствие отклонения толщин линз. Частное от деления вычитаем с учетом знака из номинальной величины второго воздушного промежутка и получаем результат — второй воздушный промежуток данного комплекта линз. Затем отклонения толщин линз и воздушных промежутков — второго или первого — умножаем на числа второй строки, складываем алгебраически, сумму делим на 0,7 и частное вычитаем с учетом знака из величины третьего воздушного промежутка. Определяем величину третьего воздушного промежутка, при котором изменение величины  $x_m$  вследствие отклонения толщин линз компенсируется. Одновременно с этим достаточно точно компенсируется и изменение астигматизма и кривизны.

При комплектовке линз симметричных, но широкоугольных объективов, от которых требуется сохранение дисторсии, нарушение симметрии нежелательно: отклонения толщин подобных линз в одной и другой половинах объектива должны быть практически равными по величине и знаку. Однако при более широких допусках на толщины линз, и особенно в широкоугольных системах, это приводит к недопустимому изменению астигматизма и кривизны, для компенсации которых приходится уже изменять средний воздушный промежуток или для обеих половин объектива брать подобные линзы с отклонениями толщин разного знака, а изменение дисторсии и частично астигматизма компенсировать изменением воздушных промежутков.

Приближенные правила комплектовки линз по толщине могут быть разработаны с помощью формул, выражающих сравнительную чувствительность отклонений толщин отдельных линз к изменению вершинного фокусного расстояния и сферической аберрации. Такие правила полезны при изготовлении опытных образцов или небольших партий приборов, когда составление таблицы влияния оказывается нерациональным и к тому же не может быть сделано своевременно.

## 9. О КОМПЛЕКТОВКЕ СТЕКЛА ПО ОТКЛОНЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Впервые начал разрабатывать правила комплектовки стекла (ПКС) по отклонениям  $\Delta n_D$  показателя преломления и  $\Delta(n_F - n_C)$  дисперсии для некоторых фотообъективов Государственный оптический институт. Автор занимался разработкой правил комплектовки стекла и линз по толщинам для фотообъективов «Луч», «Индустар», «Юпитер», «Гелиос», «Орион», «Руссар» и др. Опыт показывает, что комплектовка стекла необходима для длиннофокусных аэрофотообъективов, светосильных (и менее широкоугольных) фотообъективов и длиннофокусных объективов астрономических и геодезических приборов, для стекла которых требования к  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  оказываются весьма строгими (строже 1 и 0-й катего-

рии), выполнить их без чрезмерных затрат заводам оптического стекла не удастся. Выполнение ПКС позволяет изготовить высококачественную оптическую систему из стекла с пониженными требованиями. С другой стороны, ПКС позволяет изготавливать сложные системы из более дешевого стекла 3—4-й категории по  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  вместо стекла 0—1-й категории, что может оказаться существенным при крупносерийном производстве, например, фотообъективов. Однако соблюдение простых правил комплектовки, хотя бы таких, как необходимость однозначных  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  кроновых и флинтových линз [для последних несколько большие  $\Delta(n_F - n_C)$  и  $\Delta n_D$ ] позволяет улучшить качество изображения любых систем.

При разработке ПКС следует пользоваться таблицами влияния изменения  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$  на аберрации, из которых и устанавливаются соотношения между  $\Delta n_D$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  отдельных линз системы. Эти соотношения или позволяют оставить неизменными  $f'$  и аберрации системы, или допустить их такой величины, чтобы при дополнительном пересчете системы на действительные значения  $n_D$  и  $(n_F - n_C)$  отдельных линз партии стекла простым изменением воздушных промежутков или толщин линз можно было привести аберрации и  $f'$  к их значениям в основной системе, т. е. оставить их неизменными при изготовлении системы из данной партии стекла. В первом случае выполнение ПКС заводом оптического стекла несколько труднее, чем во втором, однако в первом случае не требуются какие-либо изменения в системе при изготовлении отдельных линз.

Однако ПКС можно с необходимой точностью разработать и без ТВ двумя путями.

1. Например, при разработке ПКС по  $\Delta n_D$  можно исходить из того, что оптическая сила  $\varphi'$  и фокусное расстояние  $f'$  системы остаются неизменными, или допустить  $\Delta f' \approx (0,1 \div 0,2\%) f'$ . В этом случае оптическая сила тонкой системы  $\varphi'$  в зависимости от оптической силы  $\varphi'_\mu$  отдельных линз в воздухе определяется выражением

$$\varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu. \quad (4)$$

Изменение оптической силы и фокусного расстояния  $f'$  системы от изменения  $n_D$  отдельных ее линз

$$\Delta \varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu; \quad (5)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu. \quad (6)$$

Условие, при котором  $\Delta\varphi'=0$  и  $\Delta f'=0$ , выражается равенством

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_{\mu}}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_{\mu} = 0. \quad (7)$$

Условие, при котором  $\Delta f' = (0,1 \div 0,2\%) f'$ , имеет вид

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_{\mu}}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_{\mu} = \frac{0,001 \div 0,002}{f'}. \quad (8)$$

Из формул (5)—(8) следует, что  $\Delta n_D$  линз небольшой оптической силы, с большим фокусным расстоянием (мениски) или расположенных близко от плоскости изображения  $\left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \text{ мало} \right)$  — коллективы, фокусирующие линзы и линзы вторых компонентов телеобъективов) менее существенно влияет на  $\Delta f'$  и  $\Delta\varphi'$  оптической системы. Для двухлинзового склеенного или несклеенного объектива условие (7) принимает вид

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{\varphi' \Delta n_D}{n_D - 1} \right)_{\mu} = 0; \quad (9)$$

$$\left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n \right)_1 + \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n \right)_2 = 0.$$

Так как

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0; \quad \varphi'_1 = - \frac{v_1}{v_2} \varphi'_2,$$

то условие для получения  $\Delta f' = 0$  примет вид

$$\left( \frac{\Delta n}{n_D - 1} \right)_2 - \frac{v_1}{v_2} \left( \frac{\Delta n}{n_D - 1} \right)_1 = 0,$$

т. е.  $\Delta n_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \Delta n_1.$

Так как приближенно

$$\frac{v_1}{v_2} = 1,5 \div 2; \quad \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \approx 1,$$

то  $\Delta n_2 = (1,5 \div 2) \Delta n_1.$

Для получения  $\Delta f' = 0$  желательно при варке и комплектовке стекла обеспечить однозначные отклонения показателей преломления стекла кроновой положительной и флинтовой отрицательной линзы. При этом желательно в 1,5—2 раза больше  $\Delta n_D$  флинтовой, чем кроновой линзы. Условие (7) справедливо также для положительных и отрицательных линз склеенных блоков и линз на близком

расстоянии. Для объектива «Индустар 50»  $f'=52,5$ ;  $1:3,5$ ;  $2\omega=45^\circ$ ;  $f'_1=27,9$ ; ТК14;  $n_D=1,6130$ ;  $f'_3=-29,5$ ; ОФ1;  $n_D=1,5294$ ;  $h_3=0,8 h_1$ ;  $f'_2=-17,5$ ; ЛФ5;  $n_D=1,5749$ ;  $h_2=0,77 h_1$ ;  $f'_4=15,62$ ; ТК14;  $n_D=1,6130$ ;  $h_4=0,86 h_1$ .

По формуле (7) напишем условие комплектки

$$\frac{\Delta n_1}{27,9 \cdot 0,6130} - \frac{0,77 \Delta n_2}{17,5 \cdot 0,5749} - \frac{0,80 \Delta n_3}{29,65 \cdot 0,5294} + \frac{0,86 \Delta n_4}{15,62 \cdot 0,6130} = 0;$$

$$0,0584 \Delta n_1 - 0,0767 \Delta n_2 - 0,0511 \Delta n_3 + 0,0898 \Delta n_4 = 0 \quad \text{или}$$

$$5,84 \Delta n_1 - 7,67 \Delta n_2 - 5,11 \Delta n_3 + 8,98 \Delta n_4 = 0.$$

Из ТВ (табл. 2) фотообъектива «Индустар 50» можно видеть, что изменение  $f'$  и  $\delta s'_k$  (при относительном отверстии  $1:5$ ) точно соответствует приведенным цифрам. При относительном отверстии  $1:3,5$   $\Delta \delta s'_k$  изменяется от  $\Delta n_4$  в 2 раза, от  $\Delta n_2$  в 1,8 раз и от  $\Delta n_3$  в 1,5 раза сильнее, чем от  $\Delta n_1$ . Для угла поля  $\omega = 15^\circ$   $\Delta x_m$  изменяется от  $\Delta n_3$  в 1,6 раза, а от  $\Delta n_4$  в 3 раза более, чем от  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$ , и по величине меньше, чем  $\Delta \delta s'_k$  для полного отверстия;  $\Delta x_m$  на краю поля ( $\omega = 22^\circ,5$ ) немного больше, чем  $\Delta \delta s'_k$ .

2. Можно разработать ПКС, не допуская изменения, например, сферической аберрации. Известно (гл. 2), что изменение сферической аберрации для тонких систем в воздухе связано с изменением линзовых  $A_\mu$  коэффициентов следующей формулой:

$$\Delta \delta s'_k = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu.$$

Следовательно,  $\Delta \delta s'_k = 0$  при

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu = 0. \quad (10)$$

Выражение (10) является условием комплектки стекла по  $\Delta n_D$ , при выполнении которого сферическая аберрация (да и другие аберрации) практически остается неизменной.

Для двухлинзового объектива из стекла ТК14 и Ф1 при  $f' = 100,0$ ;  $1:3,3$   $dA_1 = 0,000144 \Delta n_1$  и  $dA_2 = 0,00066 \Delta n_2$ ;  $h_1 = h_2$  и  $\Delta \delta s'_k = 0$  при  $dA_1 + dA_2 = 0$ , т. е. из формулы (10) следует, что  $0,000144 \Delta n_1 = 0,00066 \Delta n_2$  или  $\Delta n_2 = 2,18 \Delta n_1$ . Таким образом получено условие комплектки стекла для двухлинзового объектива из стекол ТК14 и Ф1, при выполнении которого сферическая аберрация остается неизменной. Это условие близко к условию комплектки, при котором  $\Delta f' = 0$ , и рассмотренному выше. Подобные условия комплектки можно вывести и для более сложных систем, например, фотообъективов «Индустар», «Юпитер», «Гелиос», объективов геодезических приборов и др. По-видимому, можно допустить  $\Delta n_D$ , вызывающее  $\Delta f' = (0,1 \div 0,2\%) f'$ , и не компенсировать

его изменением воздушных промежутков, толщин линз (в объективах зрительных труб малоэффективно) и радиусов кривизны, нежелательным в серийном производстве, так как такое изменение требует новых пробных стекол, инструмента и приспособлений. В фотообъективах «Индустар», «Юпитер», «Гелиос» и др. можно допускать суммарное отклонение показателя преломления от условий комплектровки (при выполнении которых полностью исключаются  $\Delta f'$ ,  $\Delta \delta s'_k$ ,  $\Delta x_m$  за счет  $\Delta n$  стекла линз) в пределах  $\pm 0,0005$ , отнесенное к одной из линз с наиболее сильным влиянием  $\Delta n$  на изменение aberrаций. Поэтому можно предложить такие условия комплектровки стекла по  $\Delta n_D$ , при выполнении которых фокусное расстояние и aberrации системы остаются практически неизменными: объектив «Индустар»:  $\Delta n_1 = 1,5\Delta n_2$ ;  $\Delta n_3 = 1,5\Delta n_4$  или  $\Delta n_1 = -\Delta n_2 = \Delta n_3 = \Delta n_4$ ; объектив «Гелиос» (РО, ОКС):  $\Delta n_1 = \Delta n_6$ ;  $\Delta n_2 = -\Delta n_5$ ;  $\Delta n_3 = -\Delta n_4$  или  $\Delta n_2 = \Delta n_3$ ;  $\Delta n_4 = \Delta n_5$ ; объектив «Руссар»:  $\Delta n_1 = -\Delta n_6$ ;  $\Delta n_2 = \Delta n_5$ ;  $\Delta n_3 = -\Delta n_4$  или  $\Delta n_2 = \Delta n_3$ ;  $\Delta n_4 = \Delta n_5$ .

## 10. О КОМПЛЕКТОВКЕ СТЕКЛА ЛИНЗ ПО ОТКЛОНЕНИЯМ ДИСПЕРСИИ

Отклонение дисперсии стекла линз от расчетных значений вызывает изменение хроматической aberrации положения, которое может заметно ухудшить качество изображения большой группы оптических систем — длиннофокусных и светосильных объективов геодезических труб и фотообъективов. При этом изменяется также и хроматическая aberrация увеличения, но ее изменение становится существенным только в широкоугольных системах. Устранение изменения хроматических aberrаций путем дополнительного расчета оптической системы на конкретные значения дисперсии полученной с завода партии заготовок затруднительно, практически невозможно, так как требует существенного изменения радиусов кривизны поверхностей при сохранении всех других aberrаций. В оптическом цехе такой расчет потребует изготовления нового комплекта инструмента, приспособлений и пробных стекол. Поэтому для исключения недопустимого влияния изменения дисперсии на хроматизм положения и увеличения в чертежах указывают строгие, иногда слишком строгие, допуски на отклонение дисперсии, трудно выполнимые заводами оптического стекла (ЗОС). В этом случае целесообразно комплектовать стекло по отклонениям дисперсии, т. е. варить стекло или изготавливать заготовки данной системы из имеющегося стекла с определенными отклонениями дисперсии, чтобы их суммарное влияние на изменение хроматизма равнялось нулю или было несущественным. Эти соотношения или правила комплектровки стекла (ПКС) можно установить помимо ТВ следующим образом с достаточным для многих систем приближением.

Хроматическую aberrацию положения для систем из тонких линз, расположенных в воздухе, подсчитывают по формуле [12]

$$ds'_{\text{хр}} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\varphi'_{\mu}}{\nu_{\mu}}. \quad (11)$$

Изменение хроматической aberrации положения из-за отклонения дисперсии стекла линз

$$\Delta ds'_{kxp} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\Phi'_{\mu}}{(n_D - 1)_{\mu}} \Delta (n_F - n_C). \quad (12)$$

Правило или условие комплектовки стекла деталей системы, при соблюдении которого изменение хроматической aberrации положения за счет отклонения дисперсии стекла линз системы равно нулю, имеет вид

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\Delta (n_F - n_C)_{\mu}}{f'_{\mu} (n_D - 1)_{\mu}} = 0. \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) следует, что на изменение хроматизма положения не оказывают существенного влияния отклонения дисперсии линз с малой оптической силой (мениски, пластинки), в том числе и отклонения дисперсии флинтových отрицательных линз, имеющих обычно оптическую силу, в 1,5—2 раза меньшую, чем положительные кроновые линзы. Это справедливо также и для линз, расположенных близко от плоскости предметов или изображения (коллективы, отрицательные фокусирующие линзы геодезических труб с внутренней фокусировкой и линзы вторых компонентов телеобъективов).

Из формул видно, что для компенсации изменения хроматизма положения из-за отклонений дисперсии положительные и отрицательные линзы должны иметь однозначные отклонения дисперсии, причем по величине отклонения дисперсии отрицательных флинтových линз должны быть в 1,5—2 раза больше отклонений дисперсии положительных кроновых линз, расположенных близко друг от друга. Это очевидно для двухлинзовых объективов и двухлинзовых компонентов телеобъективов и фотообъективов. Например, для двухлинзового объектива правило комплектовки примет вид  $(-f'_2/f'_1 = v_1/v_2)$

$$\begin{aligned} \Delta (n_F - n_C)_2 &= \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \times \\ &\times \frac{v_1}{v_2} \Delta (n_F - n_C) \approx (1,5 \div 2) \Delta (n_F - n_C)_1. \end{aligned} \quad (14)$$

В правую часть формулы (13) можно подставить величину  $\frac{\Delta ds'_{kдоп}}{f'^2_{об}}$ , где  $\Delta ds'_{kдоп}$  — допустимое изменение хроматизма положения, которое еще не ухудшает качества изображения.

**Пример:** правило комплектовки стекла  $\Delta(n_F - n_C)$  фотообъектива И50:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta(n_F - n_C)_1}{27,9 \cdot 0,6130} - \frac{0,772\Delta(n_F - n_C)_2}{17,5 \cdot 0,5749} - \\ & - \frac{0,802\Delta(n_F - n_C)_3}{29,65 \cdot 0,5294} + \frac{0,862\Delta(n_F - n_C)_4}{15,62 \cdot 0,6130} = 0; \\ & 0,0585\Delta(n_F - n_C)_1 - 0,0589\Delta(n_F - n_C)_2 - \\ & - 0,0408\Delta(n_F - n_C)_3 + 0,0743\Delta(n_F - n_C)_4 = 0. \end{aligned}$$

Это уравнение хорошо совпадает с результатами тригонометрических расчетов. Можно допустить в правой части величину, отличную от 0, например,

$$\frac{\Delta ds'_{k\text{доп}}}{f_{об}'^2} \approx \frac{1/5 \Delta x'_{\text{доп}}}{f_{об}'^2},$$

где  $\Delta x'_{\text{доп}}$  — глубина резкости. Для объектива И50

$$\Delta x'_{\text{доп}} = \frac{1}{R_{\phi, \text{кр}}} \left( \frac{f_{об}'}{D_{\text{вх.зр}}} \right) = 3,5/25 = 0,14;$$

здесь  $R_{\phi, \text{кр}}$  — разрешающая способность на краю поля.

Тогда условие комплектовки стекла по  $\Delta(n_F - n_C)$  для объектива И50 выразится так:

$$\begin{aligned} & 0,0585\Delta(n_F - n_C)_1 - 0,0589\Delta(n_F - n_C)_2 - 0,0408\Delta(n_F - n_C)_3 + \\ & + 0,0743\Delta(n_F - n_C)_4 = \pm 0,0000111; \\ & 0,585\Delta(n_F - n_C)_1 - 0,589\Delta(n_F - n_C)_2 - 0,408\Delta(n_F - n_C)_3 + \\ & + 0,743\Delta(n_F - n_C)_4 = \pm 0,00011; \\ & 0,6\Delta(n_F - n_C)_1 - 0,6\Delta(n_F - n_C)_2 - 0,4\Delta(n_F - n_C)_3 + \\ & + 0,75\Delta(n_F - n_C)_4 = \pm 0,0001. \end{aligned}$$



## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ И ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СТЕКЛУ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

### 11. РАСЧЕТ ДОПУСКА НА ОТКЛОНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В настоящее время мы не располагаем формулами, которые бы в явном виде связывали изменение параметров системы, в частности показателя преломления стекла, с изменением аберрации, поэтому и отсутствуют быстрые и простые методы их определения, что затрудняет расчет допусков. Однако на многие оптические системы имеются таблицы влияния изменения параметров на аберрации (ТВ), пользуясь которыми, можно точно определить допуски на конструктивные элементы оптической системы, учитывая закон распределения погрешностей, наблюдаемый на производстве, и задаваясь допустимой величиной изменения аберраций, наиболее важных в каждом конкретном случае.

Во многих случаях по величине изменения фокусного расстояния в первом приближении можно судить о допустимости изменения параметров исходя из следующих соображений.

Для одной тонкой линзы

$$\Phi'_\mu = (n_\mu - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

За счет изменения  $\Delta n$  показателя преломления

$$\Delta \Phi'_\mu = \frac{\Delta n_\mu}{n_\mu - 1} \Phi'_\mu ;$$

так как оптическая сила сложной оптической системы может быть выражена через оптическую силу тонких линз формулой (4), то для системы тонких линз

$$\Delta \Phi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right) \frac{\Delta n_\mu}{n_\mu - 1} \Phi'_\mu . \quad (15)$$

Известно, что  $\Delta f' = -f'^2 \Delta \Phi'$ , окончательно

$$\Delta f' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right) \frac{\Delta n_\mu}{n_\mu - 1} \Phi'_\mu . \quad (16)$$

Очевидно,

$$\Delta n_{\mu} = \frac{\Delta f'_{\text{доп}}}{m f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_{\mu}} (n_{\mu} - 1) f'_{\mu}. \quad (17)$$

Задаваясь  $\Delta f'_{\mu} = \Delta f'_1$ , найдем

$$\Delta n_{\mu} = \frac{h_1}{h_{\mu}} \cdot \frac{(n_{\mu} - 1)}{(n_1 - 1)} \cdot \frac{f'_{\mu}}{f'_1} \Delta n_1. \quad (18)$$

Обозначения в формулах — общепринятые в оптике;  $m$  — число линз.

Для двухлинзовых объективов обычно выполняют условие ахроматизации

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0,$$

отсюда  $\varphi'_2 = -\frac{v_2}{v_1} \varphi'_1$ , и тогда

$$\Delta f' = -f'^2 \varphi'_1 \left( \frac{\Delta n_1}{n_1 - 1} - \frac{\Delta n_2}{n_2 - 1} \cdot \frac{v_2}{v_1} \right). \quad (19)$$

Из формул (15) и (19) следует, что на  $\Delta f'$  влияние  $\Delta n$  линз с малой оптической силой (длиннофокусных, например, афокальных менисков или отрицательных линз), а также расположенных близко к плоскости предметов или изображения с малой  $h_{\mu}$  (коллективы, линзы вторых компонентов телеобъективов) значительно слабее и допуск на  $\Delta n$  может быть назначен грубее, чем на  $\Delta n$  линз с большими  $h_{\mu}$  и  $\varphi'_{\mu}$ .

**Пример 1.** Объектив И50: четырехлинзовый объектив типа «Индустар» ( $m=4$ ),  $f'=52,4$  мм, допуск на фокусное расстояние  $\Delta f' = 1\% f' = 0,524$  мм (объектив работает с дальномером). За счет изменения показателя преломления стекла линз оставляем  $\Delta f' = 0,26$  мм, так как на  $\Delta f'$  оказывают влияние также отклонения пробных стекол и поверхностей линз от пробного стекла и в меньшей степени — отклонения толщин линз и воздушных промежутков.

При пользовании формулой (17) принимаем алгебраическое сложение предельных отклонений  $\Delta n$ , так как в объективе применяется стекло всего трех марок (1 и 4-я детали из стекла ТК14,  $n_D = 1,6130$ ; 2-я деталь из стекла ЛФ5,  $n_D = 1,5749$  и 3-я деталь из стекла ОФ1,  $n_D = 1,5294$ ) и возможно сложение предельных погрешностей.

1-я деталь:

$$\Delta n_{\mu} = \frac{0,26}{4 \cdot 52,4^2 \cdot 1} \cdot 0,6130 \cdot 29,7 = 0,00043$$

(строже 1-й категории);

2-я деталь:

$$\frac{h_2}{h_1} = 0,85; \quad \Delta n_\mu = \frac{0,26}{4 \cdot 52,4^2} \cdot 1,15 \cdot 0,5749 \cdot 18,6 = 0,000292$$

(строже 1-й категории);

3-я деталь:

$$\frac{h_1}{h_3} = 1,1; \quad \Delta n_\mu = \frac{0,26}{4 \cdot 52,4^2} \cdot 1,1 \cdot 0,5294 \cdot 33 = 0,00049$$

(1-я категория);

4-я деталь:

$$\frac{h_1}{h_3} = 1,1; \quad \Delta n_\mu = \frac{0,26}{4 \cdot 52,4^2} \cdot 1,1 \cdot 0,6130 \cdot 16,7 = 0,000245$$

(строже 1-й категории).

Полученным  $\Delta n$  соответствует по ТВ (табл. 2) вполне допустимое изменение сферической аберрации на зоне зрачка менее 0,005 мм и на краю входного зрачка менее 0,012 мм при остаточной аберрации соответственно 0,23 и 0,10 мм. Можно использовать стекло и 1—2-й категории по  $\Delta n_D$ , если производить комплектацию его по  $\Delta n_D$ , хотя бы допуская только однозначные  $\Delta n_D$  положительных и отрицательных линз.

**Пример 2. Объектив Б6:** двухлинзовый, склеенный,  $f' = 122,85$  мм. Допуск на фокусное расстояние составляет  $\pm 1\% f'$  (разность увеличений 2%). За счет отклонения  $n$  линз можно оставить  $0,7\% f'$ ; принимаем алгебраическое сложение предельных отклонений, т. е. на долю изменения  $\Delta n$  одной линзы придется  $0,35\% f' = 0,4$  мм;  $f'_1 = 56,48$  мм, БК4,  $n_1 = 1,5302$ ;  $f'_2 = -102,05$  мм, Ф2,  $n_2 = 1,6164$ ;

$$\begin{aligned} \Delta n_{1\text{доп}} &= \pm \frac{0,4 \cdot 1}{122,85^2} \cdot 0,5302 \cdot 56,48 = \\ &= \pm 0,0008 \text{ (2 — 3-я категория по } \Delta n_D); \\ \Delta n_{2\text{доп}} &= \pm \frac{0,4 \cdot 1 \cdot 0,616}{122,85^2} \cdot 102,05 = \\ &= \pm 0,0017 \text{ (грубее 3-й категории).} \end{aligned}$$

Полученным  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  соответствует вполне допустимое изменение сферической аберрации  $\delta s'_k = 0,03$  мм для края входного зрачка при остаточной аберрации 0,23 мм, что определено расчетом.

Допуски на изменение показателя преломления фотообъективов, работающих с дальномером, и длиннофокусных объективов зрительных труб и коллиматоров, для которых колебание фокусного расстояния не должно быть большим из условий сборки или допуска на увеличение, могут быть назначены исходя из допустимого изменения фокусного расстояния системы; при этом допуски на  $\Delta n$  оказываются настолько узкими, что изменение аберраций вследствие допустимого отклонения  $n$  не превосходит допустимых величин. Во всех же других случаях для назначения допуска на  $\Delta n$  следует пользоваться ТВ, проставлять их по аналогии с хорошо

изученными системами или пользоваться приближенными формулами на основе теории aberrации третьего порядка, что важно с точки зрения изучения принципиальных особенностей рассчитываемой оптической системы и ее отдельных параметров, в частности марок стекол.

Изменение показателя преломления в неширокоугольных оптических системах (объективах зрительных труб и фотообъективах) помимо фокусного и вершинного фокусного расстояния заметным образом изменяет сферическую aberrацию, что ухудшает качество изображения. В области aberrаций 3-го порядка сферическая aberrация оптической системы, расположенной в воздухе, для предмета в бесконечности выражается формулой [10]

$$\delta s'_k = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{v=1}^{v=k} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 Q_{s_v}^2 \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 S_I,$$

где

$$S_I = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 A_\mu;$$

здесь

$$A_\mu = \left\{ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \varphi'^2 + \frac{3n+1}{n-1} \varphi'^2 \sigma + \frac{3n+2}{n} \varphi' \sigma^2 - \left[ \frac{2n+1}{n-1} \varphi'^2 + \frac{4(n+1)}{n} \varphi' \sigma \right] \rho + \frac{n+2}{n} \varphi' \rho^2 \right\}_\mu.$$

Если в эту формулу вместо  $\varphi'$  ввести ее значение  $\varphi'_\mu = (n_\mu - 1) \times (\rho_1 - \rho_2)$  и  $\rho = \rho_1$ , то получим

$$A_\mu = \left\{ (n^3 - n^2) (\rho_1 - \rho_2)^2 + (3n^2 - 2n - 1) (\rho_1 - \rho_2)^2 \sigma + \left( 3n - \frac{2}{n} - 1 \right) (\rho_1 - \rho_2) \sigma^2 - \left[ (2n^2 - n - 1) (\rho_1 - \rho_2)^2 + \left( 4n - \frac{4}{n} \right) (\rho_1 - \rho_2) \sigma \right] \rho_1 - \left( n - \frac{2}{n} + 1 \right) (\rho_1 - \rho_2) \rho_1^2 \right\}_\mu. \quad (20)$$

Дифференцируя выражение (20) по  $n$  линзы, получим

$$dA_\mu = \left\{ (3n^2 - 2n) (\rho_1 - \rho_2)^3 + (6n - 2) (\rho_1 - \rho_2)^2 \sigma + \left( 3 + \frac{2}{n^2} \right) \times (\rho_1 - \rho_2) \sigma^2 - \left[ (4n - 1) (\rho_1 - \rho_2)^2 + \left( 4 + \frac{4}{n^2} \right) \sigma (\rho_1 - \rho_2) \right] \rho_1 + \left( 1 - \frac{2}{n^2} \right) (\rho_1 - \rho_2) \rho_1^2 \right\}_\mu dn_\mu = \left\{ (3n^2 - 2n) (\rho_1 - \rho_2)^3 + \right.$$

$$+ [(6n-2)\sigma - (4n-1)\rho_1(\rho_1-\rho_2)^2 + \left[ \left(1 + \frac{2}{n^2}\right)\rho_1^2 + \left(3 + \frac{2}{n^2}\right)\sigma^2 - \left(4 + \frac{4}{n^2}\right)\sigma\rho_1 \right](\rho_1-\rho_2)]_{\mu} dn_{\mu}. \quad (21)$$

В формулу (21) можно подставить вместо  $(\rho_1 - \rho_2)_{\mu}$  его значение

$$(\rho_1 - \rho_2)_{\mu} = \frac{\Phi'_{\mu}}{(n_{\mu} - 1)}; \text{ тогда}$$

$$dA_{\mu} = \left\{ \frac{3n^2 - 2n}{(n-1)^3} \Phi'^3 + [(6n-2)\sigma - (4n-1)\rho_1] \frac{\Phi'^2}{(n-1)^2} + \left[ \left(1 + \frac{2}{n^2}\right)\rho_1^2 + \left(4 + \frac{4}{n^2}\right)\sigma\rho_1 + \left(3 + \frac{2}{n^2}\right)\sigma^2 \right] \frac{\Phi'}{n-1} \right\} dn_{\mu}. \quad (22)$$

По формуле (21) или (17) можно вычислить для каждой оптической детали сложной системы изменение линзовых коэффициентов  $dA_{\mu}$  и по известным отклонениям показателя преломления линз можно определить изменение сферической аберрации:

$$\Delta\delta'_k = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^4 dA_{\mu}. \quad (23)$$

Задавшись величиной допустимого изменения сферической аберрации (например, не более  $\frac{1}{3} - \frac{1}{5}$  глубины резкости для зоны входного зрачка), по известным изменениям линзовых коэффициентов каждой детали сложной оптической системы можно определить из формулы (18) допустимое изменение показателя преломления этой детали:

$$\Delta n_{\mu \text{ доп}} \leq \frac{\Delta\delta'_{k \text{ доп}} \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^4}{0,5 \sqrt{m} h_1^2 f'^2 \frac{dA_{\mu}}{dn_{\mu}}}, \quad (24)$$

здесь  $m$  — число линз сложной системы; при небольшом числе линз (2—3) следует брать в знаменателе не  $\sqrt{m}$ , а просто  $m$ .

Из формулы (24) следует, что допуск на показатель преломления линз оптической системы прямо пропорционален четвертой степени отношения  $h_1/h_{\mu}$  и обратно пропорционален квадрату высоты, на которой луч встречается входной зрачок системы, квадрату фокусного расстояния системы и изменению линзового коэффициента. Допуск на показатель преломления светосильных и длиннофокусных систем заметно строже, чем для несветосильных и

короткофокусных (например, окуляров). Оптические детали, расположенные ближе к плоскости изображения, для которых  $h_1/h_\mu$  велико (фокусирующие линзы объективов с внутренней фокусировкой, вторые компоненты телеобъективов, коллективы), не требуют узкого допуска на показатель преломления.

Если допуск на показатель преломления, определенный по формуле (24), оказался строже, чем величина  $\Delta n_D$ , гарантируемая ГОСТ 3514—67 «Стекло оптическое бесцветное» (1-я категория,  $\Delta n_D = \pm 0,0005$  мм), то следует каждый раз после получения партии стекла заготовок производить дополнительный пересчет оптической системы с целью учета отклонений показателя преломления партии стекла от значений основного расчета системы. В чертежах оптических деталей в этом случае следует указывать уже и соответствующий класс однородности партии заготовок по  $\Delta n_D$  (А или Б). Если этот допуск оказывается грубее, то следует в чертежах указывать класс В однородности партии заготовок и соответствующую категорию по  $\Delta n_D$  (допустимое отклонение показателя преломления) и не производить дополнительного пересчета оптической системы на  $\Delta n_D$  каждой партии стекла.

Сферическую абберацию, вносимую пластинками и призмами, расположенными в сходящемся ходе лучей, вычисляют в области аббераций третьего порядка по формуле [12]

$$\delta s'_k = \frac{1}{2} u_1^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_\mu (n_\mu^2 - 1)}{n_\mu^3}.$$

Изменение сферической абберации от изменения показателя преломления подсчитывают по формуле

$$\Delta \delta s'_k = \frac{1}{2} u_1^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} d_\mu \frac{3 - n_\mu^2}{n_\mu^4} \Delta n_\mu, \quad (25)$$

где  $u_1$  — апертурный угол; при небольших углах  $u_1$  в несветосильных системах и при небольшой толщине пластинок и длине хода луча в призме изменение сферической абберации оказывается незначительным при отклонении показателя преломления в пределах даже наиболее грубой — 4-й категории ( $\Delta n_D = \pm 0,002$ ).

**Пример. Двухлинзовый несклеенный объектив**

$r_1 = 64,425$   $f' = 100$  мм; 1: 4;  $2w = 8^\circ$ .

$d_1 = 6,0$ , ТК14

$r_2 = -39,75$

$d_2 = 0,1$

$r_3 = -38,84$

$d_3 = 2,0$  Ф1

$r_4 = -737,87$ .

Вычисления по формуле (22) дают при  $f' = 1$ ;  $dA_1 = 144,05 \, dn_1$ ;  $dA_2 = -66,2 \, dn_2$ ; при  $f' = 100$ ;  $dA_1 = 0,000144 \, dn_1$  и  $dA_2 = -0,000066 \, dn_2$ .

Если взять  $\Delta n_1 = +0,001$  (3-я категория) и для  $h_1 = 0,7 \frac{D_p}{2} =$

$= 0,7 \frac{25}{2} = 8,75$   $\frac{h_1}{h_2} \approx \frac{h_1}{h_2} \approx 1,0$ , то, подставляя необходимые величины в формулу (23), получим

$$\Delta \delta s'_{k_1} = -\frac{1}{2} 8,75^2 \cdot 100^2 \cdot 0,000144 \cdot 0,001 = -0,055.$$

Для второй линзы при  $\Delta n_2 = +0,001$

$$\Delta \delta s'_{k_2} = -0,5 \cdot 8,75^2 \cdot 100^2 (-0,000066) \cdot 0,001 = +0,021.$$

Очевидно, при

$$\Delta n_2 = \frac{dA_1}{dA_2} \Delta n_1 = \frac{144}{66} \Delta n_1 = 2,2 \Delta n_1$$

компенсируются изменения сферической аберрации; выдерживая условие  $\Delta n_2 = 2,2 \Delta n_1$  при изготовлении заготовок, можно исключить в этом объективе изменение сферической аберрации вследствие отклонений показателей преломления стекла линз при варке и отжиге стекла.

Если объектив работает с окуляром с  $f' = 15 \div 17$  мм (увеличение трубы  $\Gamma = 6^*$ ), то допустимому изменению сходимости в 0,1 дптр вследствие смещения плоскости наилучшей установки из-за отклонений показателя преломления линз объектива соответствует примерно в 2 раза большее изменение сферической аберрации для луча на высоте  $h = 0,7 \frac{D_p}{2}$ :

$$\Delta \delta s'_{k\text{доп}} = 2 \frac{f_{\text{ок}}'^2 \Delta \sigma_{\text{доп. дптр}}}{1000} = 2 \frac{17^2 \cdot 0,1}{1000} = \pm 0,058 \approx 0,06$$

или волновая аберрация

$$l_{\mu} = \frac{15 \delta s'_k}{n_{\text{эн}}} = \frac{15 \cdot 0,06}{4^2} \approx 0,05 \lambda.$$

Тогда по формуле (24) определяем

$$\Delta n_{1\text{доп}} \approx \frac{0,06}{0,5 \cdot 2 \cdot 8,75^2 \cdot 100^2 \cdot 0,000144} = +0,0005 \text{ (1-категория)}$$

$$\Delta n_{2\text{доп}} \approx \pm 0,0012 \text{ (3-я категория)}.$$

В чертеже указываем класс В однородности партии заготовок, пересчет на постоянные партии заготовок не производим. Предлагаемые формулы и методика для определения допуска на показатель преломления линз несветосильных оптических систем по результатам расчета хода только нулевого луча позволяют на разной стадии производства (расчет, выпуск чертежей, заказ стекла, изготовление) указывать целесообразные допуски на  $\Delta n_D$  стекла линз.

## 12. О РАСЧЕТЕ ДОПУСКА НА ДИСПЕРСИЮ СТЕКЛА

В оптических системах отклонения радиусов, толщин и воздушных промежутков в пределах обычных погрешностей изготовления практически не вызывают заметного колебания хроматиче-

ской аберрации положения, особенно в телескопических системах; колебание хроматической аберрации связано в основном с изменением дисперсии ( $n_F - n_C$ ), что может привести к недопустимому окрашиванию изображения и снижению разрешающей способности оптической системы.

Изменение хроматической аберрации положения сопровождается примерно таким же отклонением сферохроматической аберрации, которое в отдельных случаях существенно влияет на качество изображения. Хроматизм увеличения изменяется заметно только в длиннофокусных и широкоугольных системах. Однако чаще всего уже колебание хроматической аберрации положения позволяет судить о допустимости отклонения дисперсии ( $n_F - n_C$ ); вычисление же изменения хроматической аберрации, как показано ниже, может быть произведено сравнительно просто.

Известно, что для системы из тонких линз в воздухе для предмета в бесконечности хроматическая аберрация положения [12]

$$ds'_{kxp} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\varphi'_{\mu}}{v_{\mu}}.$$

Так как  $v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ , то

$$ds'_{kxp} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{(n_F - n_C)}{(n_D - 1)_{\mu}} \varphi'_{\mu}. \quad (26)$$

Дифференцируя последнюю формулу по  $n_F - n_C$ , получим

$$\Delta ds'_{kxp} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\Delta (n_F - n_C)_{\mu}}{(n_D - 1)_{\mu}} \varphi'_{\mu}. \quad (27)$$

Из этой формулы следует, что изменение хроматизма положения пропорционально квадрату фокусного расстояния системы, квадрату отношения  $\frac{h_{\mu}}{h_1}$ , отклонению дисперсии и обратно пропорционально фокусному расстоянию линзы и разности ( $n_D - 1$ ) для стекла этой линзы. Нечувствительными к изменению дисперсии оказываются линзы вторых компонентов телеобъективов и объективов труб с внутренней фокусировкой, линзы окуляров, пластинки, сетки, призмы, для которых отношение  $\frac{h_{\mu}}{h_1}$  или оптическая сила малы (фокусное расстояние большое).

В двухлинзовых объективах фокусное расстояние отрицательной флинтовой линзы обычно в 1,5—2 раза больше, чем фокусное расстояние положительной кроновой линзы. Это связано с исправлением хроматической аберрации положения, когда должно выполняться условие

$$\frac{\varphi'_{кр}}{v_{кр}} + \frac{\varphi'_{фл}}{v_{фл}} \approx 0.$$



Отсюда следует, что

$$\varphi'_{\text{фл}} = - \frac{\nu_{\text{фл}}}{\nu_{\text{кр}}} \varphi'_{\text{кр}},$$

а так как  $\nu_{\text{кр}} \approx (1,5 \div 2) \nu_{\text{фл}}$ , то  $\varphi'_{\text{кр}} \approx - (1,5 \div 2) \varphi'_{\text{фл}}$  и  $f'_{\text{фл}} \approx - (1,5 \div 2) f'_{\text{кр}}$ . Поэтому влияние изменения дисперсии отрицательной флинтовой линзы на хроматизм положения примерно в 2 раза слабее влияния такого же отклонения дисперсии положительной линзы. Следовательно, в двухлинзовых объективах и в двухлинзовых компонентах сложных объективов можно допускать колебание дисперсии флинтовой линзы в 1,5—2 раза больше, чем кроновой линзы.

Можно решить и обратную задачу: по известному (например, допустимому) отклонению хроматизма положения системы определить изменение дисперсии линзы:

$$\Delta (n_F - n_C)_{\mu} = - \frac{\Delta s'_{\text{к.кр}}}{f'^2} \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^2 (n_D - 1)_{\mu} f'_{\mu}. \quad (28)$$

Принимая квадратичное сложение влияний предельных отклонений дисперсий  $m$  отдельных линз, можно определить допустимое отклонение дисперсии отдельной линзы по формуле

$$\begin{aligned} \Delta (n_F - n_C)_{\mu \text{доп}} &\leq - \frac{\Delta s'_{\text{к.кр.доп}}}{\sqrt{m} f'^2} \times \\ &\times \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^2 (n_D - 1)_{\mu} f'_{\mu}. \end{aligned} \quad (29)$$

В системах дуплетов, например телеобъективов, состоящих из двух компонентов, находящихся на конечном расстоянии, величину  $\Delta s'_{\text{к.кр}}$  для линз первого компонента следует определять для плоскости изображения первого компонента, т. е. в формуле (27) брать  $f'_1$  вместо  $f'$  и эту величину умножать на продольное увеличение  $\alpha = \beta^2$  (для системы в воздухе) второго компонента. Для вычисления  $\Delta s'_{\text{к.кр}}$  линз второго компонента в формуле (27) следует брать  $s'^2_{\text{ф}}$  вместо  $f'^2$ . В этом случае для линз первого компонента

$$\begin{aligned} \Delta (n_F - n_C)_{\mu \text{доп}} &\leq \frac{\Delta s'_{\text{к.кр.доп}}}{\sqrt{m} f'^2_1 \beta^2_{11}} \times \\ &\times \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^2 (n_D - 1)_{\mu} f'_{\mu} \end{aligned} \quad (29a)$$

и для линз второго компонента

$$\begin{aligned} \Delta (n_F - n_C)_{\mu \text{доп}} &\leq \frac{\Delta s'_{\text{к.кр.доп}}}{\sqrt{m} s'^2_{\text{ф}}} \times \\ &\times \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^2 (n_D - 1)_{\mu} f'_{\mu}. \end{aligned} \quad (29б)$$

Величину  $\frac{h_1}{h_\mu}$ , в тонких системах примерно равную единице, следует относить к линзам компонента. Например, для четырехлинзового объектива И50  $f'=52,4$  мм; относительное отверстие 1:3,5,  $2\omega=45^\circ$ ;  $ds'_{k\text{ xp}}=-0,19$ ;  $\Delta ds'_{k\text{ xp}}=\pm 0,03$  (примерно одна пятая часть глубины резкости), тогда для

1-й линзы  $\frac{h_\mu}{h_1}=1$ ;  $f'_1=27,94$  мм;  $(n_D-1)=0,6130$ ; марка стекла ТК14;

$$\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}} \leq \frac{0,03}{\sqrt{4}} \cdot \frac{0,6130}{52,4^2} \cdot 27,91 = 0,000095;$$

берем  $\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}}$  по 3-й категории ( $\pm 0,0001$ );

2-й линзы  $\frac{h_2}{h_1}=0,9$ ;

$(n_D-1)=0,5749$ ; марка стекла ЛФ5;  $f'_2=-19,0$  мм;

$$\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}} \leq \frac{0,030 \cdot 0,5749 \cdot 19}{52,4^2 \cdot 2 \cdot 0,9^2} = 0,00008;$$

берем  $\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}}$  по 2-й категории ( $\pm 0,00007$ );

3-й линзы

$\frac{h_3}{h_1}=0,9$ ;  $(n_D-1)=0,5294$ ; марка стекла ОФ1;  $f'_3=-33,0$  мм;

$$\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}} \leq \frac{0,030 \cdot 0,5294 \cdot 33}{52,4^2 \cdot 2 \cdot 0,9^2} = 0,00012;$$

берем  $\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}}$  по 3-й категории ( $\pm 0,0001$ );

4-й линзы  $\frac{h_4}{h_1}=0,9$ ;

$(n_D-1)=0,6130$ ; марка стекла ТК14;  $f'_4=15,5$  мм;

$$\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}} \leq \frac{0,030 \cdot 0,6130 \cdot 15,5}{52,4^2 \cdot 2 \cdot 0,9^2} = 0,000069;$$

берем  $\Delta(n_F-n_C)_{\text{доп}}$  по 2-й категории ( $\pm 0,00007$ ).

Таким образом, в чертежах деталей можно указать для 2-й и 4-й линз  $\Delta(n_F-n_C)$  по 2-й категории класса В и для 1 и 3-й линз по 3-й категории класса В — пересчет объектива на  $\Delta(n_F-n_C)$  партии стекла не требуется.

**Объектив бинокля Б6** состоит из двух линз. 1-я линза имеет  $f'_1=56,48$  мм, марку стекла БК4 ( $n_D=1,5302$ ); 2-я линза имеет  $f'_2=-102,05$  мм; марку стекла Ф2 ( $n_D=1,6164$ );  $ds'_{k\text{ xp}}=-0,48$ .

В таблице влияния не подсчитано изменение хроматической аберрации положения при изменении дисперсии; подсчитываем его по формуле (27):

для 1-й линзы при  $\Delta(n_F-n_C)=0,0001$

$$\Delta ds'_{k\text{ xp}} = -122,85^2 \left( \frac{1}{1} \right)^2 \cdot \frac{0,0001}{0,5302} \cdot \frac{1}{56,48} = -0,0505;$$

для 2-й линзы при  $\Delta(n_F - n_C) = 0,0001$

$$\Delta ds'_{kxp} = -122,85^2 \left( \frac{1}{1} \right)^2 \cdot \frac{0,0001}{0,6164} \cdot \frac{1}{102,05} = 0,0245.$$

При допущении изменения  $\Delta ds'_{kxp} = \pm 0,1$  и при алгебраическом сложении предельных отклонений следует назначить для 1-й линзы  $\Delta(n_F - n_C)$  по 3-й категории класса В и для 2-й линзы — по 4-й категории класса В.

**Окуляр бинокля Б6** состоит из трех линз — по типу окуляра Кельнера;  $f' = 20,6$  мм. По ходу лучей; 1-я линза — коллектив;  $f'_1 = 34,8$  мм; марка стекла К8;  $n_D = 1,5163$ ;  $h_\mu/h_1 = 0,6$ ; 2-я линза глазная  $f'_2 = 12,69$  мм; марка стекла БК6;  $n_D = 1,5399$ ;  $h_\mu/h_1 = 1,1$ ; 3-я линза глазная  $f'_3 = -21,36$  мм; марка стекла Ф3;  $n_D = 1,6199$ ;  $h_\mu/h_1 = 1,0$ . При изменении дисперсии стекла линз на 0,0001 (3-я категория) хроматическая аберрация положения изменяется следующим образом (в обратном ходе лучей):

для 3-й линзы

$$\Delta ds'_{kxp} = -20,6^2 \left( \frac{1}{1} \right)^2 \cdot \frac{0,0001 \cdot 1}{0,6199 - 21,36} = 0,00322;$$

для 2-й линзы

$$\Delta ds'_{kxp} = -20,6^2 \cdot \frac{1,1^2 \cdot 0,0001}{0,5399 \cdot 12,69} = -0,00750;$$

для 1-й линзы

$$\Delta ds'_{kxp} = -20,6^2 \cdot \frac{0,6^2 \cdot 0,001}{0,5163 \cdot 34,84} = -0,00085.$$

Из полученных цифр следует, что  $\Delta(n_F - n_C)$  для линз окуляра Б6 можно не нормировать.

**Хроматизм положения**, вносимый призмами и пластинками, подсчитывают по формуле [12]

$$ds'_k = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_\mu (n_F - n_C)_\mu}{n_{D\mu}^2}.$$

Существенное значение он приобретает в том случае, если только призмы и пластинки (детали) расположены в сходящемся ходе лучей. Изменение  $\Delta ds'_k$  хроматизма положения в зависимости от изменения дисперсии стекла детали определяют по формуле

$$\Delta ds'_k = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_\mu \Delta (n_F - n_C)_\mu}{n_{D\mu}^2}. \quad (30)$$

Изменение хроматизма положения прямо пропорционально толщине пластинки или длине хода луча в призме, изменению дисперсии, обратно пропорционально квадрату показателя преломления стекла детали и не зависит от положения детали в оптической системе. Изменение его становится заметным, если изменяется дис-

персия стекла детали с большим ходом луча в стекле. Например, изменение дисперсии в пределах 4-й категории  $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0,0002$  стекла К8 призмы с длиной хода луча в стекле  $d = 50$  мм вызывает еще незаметное изменение хроматизма положения величиной

$$\Delta ds'_k = 50 \cdot \frac{0,0002}{1,6163^2} = 0,004 \text{ мм.}$$

Если допустимое изменение дисперсии, найденное по формуле (29) или (30), меньше гарантируемой категории по ГОСТ 3514—67 ( $\pm 0,00003$ — $0,00005$ ; 0—1-я категория), то в чертежах на оптические детали следует указывать класс А или Б однородности по  $\Delta(n_F - n_C)$  в партии заготовок и одну из категорий (1—4) и для исключения влияния недопустимого отклонения дисперсии партии заготовок необходим дополнительный пересчет оптической системы. В приведенных примерах (объектив И50, объектив и окуляр бинокля) пересчет не требуется: в чертежах следует указывать только необходимую категорию по дисперсии и класс В однородности партии заготовок, т. е. любая заготовка партии может иметь отклонение дисперсии в пределах указанной категории и дополнительный пересчет системы на конкретное отклонение дисперсии партии стекла заготовок не производят.

Из формулы (27) можно вывести условие, которое надо выполнить на стекловаренном заводе при варке и отжиге или комплектовке стекла по дисперсии, чтобы исключить недопустимое изменение хроматической аберрации положения от изменения дисперсии заготовок. Это условие соблюдается, когда выражение под знаком суммы формулы (27) равно нулю.

Изменение хроматизма увеличения из-за изменения дисперсии линз приближенно подсчитывают по формуле, справедливой для тонких систем и получаемой дифференцированием по  $\Delta(n_F - n_C)$  [12]:

$$dL'_{kxp} = -l'_k \frac{x'_k s'_k}{x'_k - s'_k} \cdot \frac{h_\mu}{h_1} \cdot \frac{y_\mu}{y_1} \cdot \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{f'_\mu(n_D - 1)_\mu}. \quad (31)$$

Эта формула также может применяться в системах, состоящих из линз конечной толщины, например, в фотообъективах, и даст удовлетворительные результаты, если величины  $l'_k$ ,  $x'_k$ ,  $s'_k$   $\left( \frac{h_\mu}{h_1} \approx \frac{y_\mu}{y_1} \approx 1 \right)$  относить к плоскости изображения исследуемой линзы и найденную величину умножать на поперечное увеличение всех последующих линз. Для определения  $l'_k$ ,  $x'_k$  необходимо рассчитывать ход второго вспомогательного луча, проходящего через центр входного зрачка системы; величину  $s'_k$  и линейное увеличение можно взять из расчета хода нулевого луча. Однако положение  $x'_k$  зрачка после каждой линзы можно определить и по формулам Гаусса или Ньютона, если известны кардинальные точки и фокусные расстояния каждой линзы. Вычисления упрощаются и результаты хорошо совпадают с величинами  $dL'_{kxp}$ , найденными путем расчета хода лучей, если применять их для телеобъективов, у которых

толщины линз компонентов малы в сравнении с их фокусными расстояниями. При этом для линз первого компонента

$$dL'_{kxp} = -f'_1 \operatorname{tg} w \frac{x'_1 s'_1}{x'_1 - s'_1} \beta_{II} \cdot \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{(n_D - 1)_\mu f'_\mu}; \quad (32)$$

для линз второго компонента

$$dL'_{kxp} = -l'_k \frac{x'_k s'_k}{x'_k - s'_k} \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{(n_D - 1)_\mu f'_\mu}. \quad (33)$$

Однако результаты вычислений показывают, что если допустимое отклонение дисперсии определять исходя из допустимого изменения хроматизма положения, то изменение хроматизма увеличения будет находиться также в допуске. Это справедливо для различных систем с полем зрения до 40—50°. Например, при  $\Delta(n_F - n_C) = 0,00005$  линз объектива «Телемар» с  $f' = 1000$  мм; относительным отверстием 1:7;  $2w = 24^\circ$  хроматизм положения изменится на 0,35; 0,18; 0,04 и 0,02 мм и хроматизм увеличения на 0,013, 0,007, 0,007 и 0,004 мм для 1, 2, 3 и 4-й линз соответственно. В фотообъективах «Юпитер» при  $\Delta(n_F - n_C) = 0,0001$  отдельных линз хроматизм положения изменяется на 0,01 до 0,02, а хроматизм увеличения на  $\sim 0,001$  мм, т. е.  $\Delta(n_F - n_C)_{\text{доп}}$  — 3-й категории класса В вполне допустимо.

### 13. ОБ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ

Оптическая однородность заготовки стекла (диаметром не более 150 мм) характеризуется по ГОСТ 3514—67 отношением угла ее разрешения  $\varphi$  к теоретическому углу разрешения  $\varphi_0 = 120''/D$ , где  $D$  — диаметр или наименьшая сторона прямоугольной заготовки в миллиметрах. Причиной оптической неоднородности стекла является недостаточное выравнивание в процессе варки путем размешивания состава стекла, особенно стекла сложного химического состава, отдельные компоненты которого или летучи, или плохо растворимы и ведут к увеличению вязкости стекла (стекла ТК, ТФ, БФ и др.). Оптическая неоднородность связана также и с условиями охлаждения стекла после варки и в процессе отжига: отдельные участки заготовки охлаждаются (или нагреваются) неодинаково, что затрудняет получение однородного стекла.

Во многих случаях категория однородности можно назначить правильно и однозначно. Например, для объективов микроскопов, коллиматоров, астрономических, интерференционных и спектральных приборов, от которых требуется идеальное изображение точки, необходимо употреблять стекло по однородности 1-й категории. Это справедливо и для светофильтров, защитных стекол и призм, располагаемых вблизи таких объектов — для сечений, равных примерно входному зрачку системы или сечению детали рабочего пучка лучей. Тогда также следует использовать стекло 1-й категории. Для объективов обычных зрительных труб типа биноклей, буссолей, стереотруб, прицелов можно применять стекло 3—4-й категории, т. е. можно допускать снижение разрешающей способности

по сравнению с идеальной оптической системой на 10—20% и более без ущерба для эксплуатационных качеств прибора, так как увеличение указанных систем меньше полезного ( $\Gamma_{\text{пол}} = \frac{60''}{120''} D_p = 0,5 D_p$ )

и поэтому теоретическая (идеальная) разрешающая способность объектива не используется глазом (имеет место запас в 1,5—2 раза и более). Поэтому вполне допустимо этот запас уменьшить на 10—30%, имея в виду, что aberrации таких объективов незначительны и практически не снижают разрешающей способности. Увеличение в таких приборах берут меньше полезного, так как важно получить выходной зрачок равным зрачку глаза или большим его и не потерять в субъективной яркости при наблюдении через эти приборы предметов конечных размеров (а не точек), особенно при недостаточной освещенности.

Однородное стекло (2—3-й категории) следует использовать в изготовлении высококачественных репродукционных объективов [6], предназначенных для получения изображения на мелкозернистых фотоматериалах с разрешающей способностью, близкой к разрешающей способности идеального объектива при данном относительном отверстии (более 800 линий/мм).

Фото- и аэрофотообъективы имеют сравнительно низкую разрешающую способность вследствие заметных aberrаций фотообъективов (особенно по полю) и низкой разрешающей способности фотоматериалов. С увеличением относительного отверстия визуальная (близкая к идеальной) разрешающая способность увеличивается ( $R_{\text{виз}} \approx R_{\text{ид}} = 1470 \frac{D_p}{f_{\text{об}}}$ ), фотографическая разрешающая способ-

ность остается примерно постоянной (до 50 линий/мм в центре поля и 15—25 линий/мм по полю) для обычных фотоматериалов с разрешающей способностью 70—80 линий/мм. Таким образом, для светосильных фотообъективов можно применять стекло менее оптически однородное, 4—5-й категории (снижение разрешающей способности по сравнению с идеальной системой на 30—50%). Обычной категорией по однородности стекла для универсальных сравнительно несветосильных фотообъективов надо считать 3—4-ю категорию ( $\varphi'' = 1,1 \varphi_0 \div 1,3 \varphi_0$ ), имея в виду при этом, что разрешающая способность фотоматериалов может быть в ближайшем будущем повышена (разработаны новые фотоматериалы), к тому же однородность 3—4-й категории для линз небольших размеров достигается заводами оптического стекла без особых затруднений. Все вышесказанное остается справедливым и для других оптических деталей — призм, защитных стекол, светофильтров, сеток, окуляров, вторых компонентов телеобъективов, если приведенные выше категории по однородности стекла отнести к сечению детали, равному сечению этой деталью пучка лучей, участвующего в образовании изображения точки. Поэтому требования к однородности стекла сеток, выравнивающих стекол, призм и линз, расположенных близко от плоскости изображения, линз широкоугольных фотообъективов (типа Орион, Руссар), линз вторых компонентов телеобъективов и окуляров, имеющих диаметры, заметно превышающие рабочие сечения пучков и диаметр зрачка глаза (обычные зрительные трубы, винтовочные, пулеметные и другие прицелы), могут быть значительно снижены. Для таких деталей категория по однородности не должна быть строже 4—5-й.

Пользуясь этими соображениями, можно без грубых ошибок выбрать категорию стекла по оптической однородности для различных деталей и различных оптических систем, что подтверждается и большим производственным опытом такого выбора категорий.

#### 14. О ДВОЙНОМ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИИ СТЕКЛА

При горячей обработке стекла — в процессе остывания, прессования, моллирования и отжига — остаются натяжения, вследствие которых при дальнейшем изготовлении могут возникнуть деформации ранее обработанных поверхностей, выколки или даже разрушение стекла детали при больших натяжениях (грубее 5-й категории, разность хода не более 50 нм на 1 см). При большой толщине стекла двойное лучепреломление (следствие натяжений) может иметь сравнимую с длиной волны или пределом Релея ( $\lambda/4$ ) величину и тем самым снизить качество изображения. Из этих соображений выбирают категорию стекла по двойному лучепреломлению: если в оптической системе детали тонкие и общая длина хода луча в стекле небольшая, например менее 100 мм, то для тонких и неточных деталей (сеток, защитных стекол, светофильтров, линз окуляров, конденсоров) можно использовать стекло с двойным лучепреломлением 4—5-й категории, чтобы исключить появление выколок и разрушение при обработке; на более толстые и точные детали — призмы, линзы объектива следует брать стекло 3—4-й категории (разность хода не более 10—20 нм на 1 см). Если же детали точные и толстые — объективы, призмы и защитные стекла астрономических интерференционных, поляризационных и коллиматорных приборов, то категорию стекла по двойному лучепреломлению выбирают по разности хода, которая не должна быть более, чем частное от деления допустимой волновой аберрации [для высококачественных астрономических и тому подобных систем  $\lambda/4 = 135$  нм, для фотообъективов и простых зрительных труб  $(0,5 \div 1)\lambda = 270 \div 550$  нм] на длину хода луча в стекле в сантиметрах. Для этих деталей стекло по двойному лучепреломлению не должно быть грубее 2—3-й категории, однако и в этих приборах на тонкие детали можно использовать стекло 3—4-й и даже 5-й категории по двойному лучепреломлению. Только по-видимому для деталей интерференционных и поляризационных приборов следует использовать стекло 1-й категории. С другой стороны, форма поверхностей лучше сохраняется, если заготовка имеет натяжения в пределах 3-й категории (зеркала и линзы аэрофотообъективов больших размеров).

#### 15. О СВЕТОПОГЛОЩЕНИИ СТЕКЛА

Наряду с отражением света от преломляющих поверхностей и поглощением слоя металла отражающих и светоделительных поверхностей светопоглощение стекла является одной из основных причин низкого коэффициента пропускания и к. п. д. оптических систем. При этом в сложных системах с большим числом сравнительно тонких оптических деталей (фотообъективы, простые зрительные трубы и т. п.) большее влияние на снижение коэффициента пропускания  $\tau$  оказывает отражение света от преломляющих поверхностей, а в простых системах с большим ходом лучей в стекле — светопоглощение в стекле. Прибор с низким  $\tau$  имеет низкий

к. п. д. (снижаются его эксплуатационные свойства) и, кроме того, значительный рассеянный свет от отражающих, преломляющих и светоделительных поверхностей, не участвующий в образовании изображения, дает светлый фон в плоскости изображения. Вследствие этого снижается контраст — распознавание целей затрудняется, разрешающая способность падает.

Коэффициент пропускания  $\tau$  оптической системы подсчитывают по формуле

$$\tau = (1 - r_1) (1 - r_2) \dots (1 - r_k) \rho_1^{l_1} \rho_2^{l_2} \dots \rho_k^{l_k} R_1 R_2 \dots R_k, \quad (34)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_k$  — коэффициент отражения при преломлении на поверхностях системы;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k$  — коэффициенты пропускания стекла деталей при толщине 1 см;  $\rho = 1 - \alpha_\lambda$ , здесь  $\alpha_\lambda$  — светопоглощение стекла;

$l_1, l_2, \dots, l_k$  — толщина (длина хода луча в стекле) деталей в см;

$R_1, R_2, \dots, R_k$  — коэффициенты отражения от зеркал или коэффициенты пропускания светоделительных покрытий.

Эти коэффициенты должны быть взяты в соответствии с видом просветляющего, отражающего или светоделительного покрытия и категорией по светопоглощению, указанными в чертежах. Если преломляющая поверхность не просветляется, то коэффициент отражения при преломлении и углах падения менее  $45^\circ$  подсчитывают по формуле Френеля

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

Изменение  $\tau$  оптической системы при изменении коэффициентов  $r, \rho$  и  $R$  определяют после дифференцирования формулы (34):

$$d\tau = \sum_1^k \frac{\tau}{1 - r_k} dr_k + \sum_1^k \frac{\tau l_k}{\rho_k} d\rho_k + \sum_1^k \frac{\tau}{R_k} dR_k. \quad (35)$$

Влиянием отклонения толщин оптических деталей на  $\tau$  можно пренебречь вследствие незначительного поглощения стекла в видимой области спектра. Отклонение толщины светофильтров заметно сказывается на  $\tau$  (см. гл. 4).

Если принять постоянным коэффициенты  $r_k$  и  $R_k$ , то изменение  $\tau$  в зависимости от изменения коэффициента пропускания стекла

$$d\tau = \sum_1^k \frac{\tau l_k}{\rho_k} d\rho_k; \quad (36)$$

$$\frac{d\tau}{\tau} = \sum_1^k l_k \frac{d\rho_k}{\rho_k}. \quad (36a)$$



По формуле (36) определяют изменение  $\tau$  при переходе от одной категории стекла по светопоглощению к другой при ее выборе, примерное значение  $\tau$  предполагают известным. Формула (36) показывает, что изменение  $\tau$  от изменения  $p_k$  незначительно при малой толщине линз короткофокусных фотообъективов и простых зрительных труб (толщина линз 1—5 мм). Например, для фотообъектива И50:  $\tau=0,80$ ;  $l=0,1 \div 0,5$  см;  $p_k=0,985 \div 0,995$ ;  $dp_k=0,01$  при переходе от 3-й категории к 0-й; тогда

$$d\tau = \frac{\tau l_k}{p_k} dp_k = \frac{0,8 \cdot 0,1}{0,99} \cdot 0,01 = 0,0008 = 0,08\% \text{ для одной детали.}$$

Для всех четырех деталей в наихудшем случае

$$d\tau = \frac{0,8 \cdot 0,01}{0,99} (0,28 + 0,105 + 0,12 + 0,47) = 0,00857 = 0,86\%,$$

т. е. меньше, чем погрешность измерения  $\tau$ , и меньше, чем отклонение  $\tau$  вследствие колебания коэффициента отражения одной—двух поверхностей просветления. Таким образом, для системы из тонких деталей с точки зрения коэффициента пропускания безразлично, берем ли стекло со светопоглощением по 0 или 3-й категории, однако стекло по светопоглощению 3-й категории может быть сварено значительно проще. Для оптических систем, состоящих из тонких деталей, стекло не следует брать по светопоглощению строже 3-й категории.

Например, призмы бинокля имеют  $l=50$ —5 см, в этом случае при  $\tau=0,70$ ;  $dp_k=0,01$ ;  $d\tau=3,5\%$ , т. е. уже заметная величина, и поэтому для стекла призм желательно употреблять стекло со светопоглощением не более 0,01, т. е. не грубее 2-й категории. К такому же выводу можно прийти и при рассмотрении светопоглощения стекла линз длиннофокусных аэрофотообъективов и астрономических приборов, линзы которых имеют значительную толщину (50—100 мм и более). Высокое пропускание наиболее важно в телескопических приборах, чем в фотообъективах, так как в последних снижение коэффициентов пропускания на 2—3% совершенно не сказывается на определении выдержки и плотности снимка.

Стекло по светопоглощению 00, 0, 1-й категорий получают из химически чистых материалов, оно значительно дороже стекла 3-й категории, и поэтому такое стекло следует применять, когда это действительно необходимо. В чертежах оптических деталей следует указывать наиболее грубые категории по светопоглощению, которые еще практически не влияют на коэффициент пропускания прибора, а не наивысшие, еще гарантируемые ЗОС и приведенные в табл. 13 ГОСТ 3514—67 для стекла различных марок.

## 16. О ВЫБОРЕ КАТЕГОРИИ БЕССВИЛЬНОСТИ

Резкие нитевидные свили в объективах зрительных труб и фотообъективах, занимающие небольшую площадь по отношению к площади входного зрачка, практически не влияют на качество изображения и разрешающую способность, так как освещенность дифракционной картины, создаваемой резкими свиллями, совершенно незначительна. В объективах зрительных труб и фотообъективах более опасны плавные свили, занимающие сравнительно большую площадь входного зрачка: такие свили заметно искажают дифрак-

ционную картину точки, ухудшают качество изображения мира (появляются «хвосты», «двойники» и т. д.), снижают разрешающую способность. Наоборот, в стекле сеток, коллективов и призм, близко расположенных от фокальной плоскости или плоскости изображения, наиболее заметны и поэтому недопустимы тонкие резкие свили, которые видны при наблюдении в прибор или даже искажают изображение отдельных штрихов сетки. Поэтому только в стекле луп, окуляров, конденсоров, смотровых стекол и отражательных призм, работающих без увеличения или с небольшим увеличением, можно допустить свили 2-й категории. В стекле всех других деталей — линзах фотообъективов, объективов коллиматоров и астрономических приборов и микрообъективов и деталях, близко расположенных от них, можно допустить свили с небольшим увеличением, можно допустить свили 2к—3к категорий, которые практически соответствуют свилам 1-й категории для заготовок размером до 150 мм. В зависимости от числа направлений, в которых заготовка стекла должна соответствовать указанной при заказе категории, устанавливают два класса бессвильности: класс Б — два взаимно перпендикулярных направления (указывают для призм); класс В — одно направление (указывают для линз, пластинок, защитных стекол и т. п.).

Для зеркал с внешним отражением бессвильность не нормируют.

## 17. ВЫБОР КАТЕГОРИИ И КЛАССА ПУЗЫРНОСТИ

Для телескопических систем ГОИ разработана (инж. Савин В. А.) методика определения категории и класса пузырьрности, которая приводится ниже.

Экспериментально установлено, что предельно заметные среднему наблюдателю тени от пузырей удовлетворяют условию

$$\left(\frac{d}{\varnothing}\right)^2 = 0,002\omega^0 + 0,004 \quad \text{или} \quad d = \varnothing \sqrt{0,002\omega^0 + 0,004}, \quad (37)$$

где  $d$  — диаметр пузыря в мм;

$\omega^0$  — угол, под которым виден диаметр наименьшего из возможных выходных зрачков прибора из центра изображения пузыря, образованного частью оптической системы прибора, расположенной между пузырем и глазом наблюдателя, в град;

$\varnothing$  — диаметр сечения пучка лучей деталью, соответствующего выходному зрачку прибора, наименьшему из возможных ( $\varnothing = 2h$ );

здесь  $h$  — высота встречи с деталью луча, соответствующего краю выходного зрачка прибора, наименьшего из возможных.

Для назначения категории пузырьрности вычисляют расстояния  $l$  от зрачка глаза наблюдателя до центра изображения пузыря и находят  $\omega^0$ , причем наименьший выходной зрачок берут равным наименьшему зрачку глаза 2 мм, если выходной зрачок прибора больше 2 мм. Угол  $\omega^0$  вычисляют для  $l+5$  мм, так как удаление зрачка глаза от зрачка выхода прибора у разных наблюдателей может колебаться в пределах  $\pm 5$  мм.

Если рассчитанный диаметр пузыря близок  $d$ , указанному в таблице категорий ГОСТ 3514—67, класс пузырьки выбирают наименьший из возможных для стекла данной марки, так как два близко расположенных одинаковых пузыря создают тень в поле зрения как один пузырь диаметром, в 1,4 раза большим. Однако такой выбор может быть невыгодным, так как лучше отбраковать часть деталей с двойными пузырями, чем значительно ужесточать требования к пузырьки всех деталей, всего стекла.

Дифракционная картина, создаваемая в плоскости изображения фотообъектива пузырями, выколками, точками и другими дефектами поверхностей, настолько слаба, что незаметна глазом, да вряд ли будет заметна фотоэлементом и фотопленкой при съемке испытательной миры или предметов. Критерием при назначении категории пузырьки линз фотообъектива может служить допуск ГОИ: площадь пузырей и других дефектов стекла и поверхностей всех линз системы не должна составлять более 2,5% площади входного зрачка объектива. Поэтому, имея общую площадь допустимых дефектов, по известному весу заготовок находим по ГОСТ 3514—67 «Стекло оптическое бесцветное» категорию и класс пузырьки, обеспечиваемые ЗОСами, и подсчитываем площадь пузырей, приходящихся на одну деталь и весь прибор, принимая число крупных пузырей не более 5—10% всего числа пузырей. Если эта площадь окажется значительно меньше, то следует перейти к следующим более грубым категориям и классам пузырьки. Подобный расчет дает для любительских фотообъективов 5-ю категорию и классы Д—Е пузырьки и для аэрофотообъективов с  $f'=200\div 500$  мм 7—8-ю категорию и классы Г, Д, Е пузырьки; в этом случае обычно общая площадь пузырей составляет не более 0,2—0,3% площади входного зрачка. Для любительских фотообъективов категорию по диаметру наибольшего пузыря выбирают не грубее 5Д, 6Д, исходя из товарного вида продукции.

**Пример.** Определение категорий пузырьки для оптических деталей бинокля Б6:  $f'_{об}=120$  мм;  $f'_{ок}=20$  мм;  $D_p=30$  мм;  $D'_p=5$  мм.

Линзы объектива: изображение пузырей в линзах объектива получается почти в выходном зрачке, тогда

$$\omega^0 = \frac{D_{p' \min} \cdot 57,3}{l} = \frac{2,57,3}{5 + 0,3} = 21,6;$$

$\varnothing = GD_{p' \min} = 6 \cdot 2 = 12$  — соответствует наименьшему выходному

зрачку 2 мм;  $d = \varnothing \sqrt{0,002\omega^0 + 0,004} = \varnothing \sqrt{0,047} = 12 \cdot 0,217 = 2,6$ ,

т. е. допускаются пузыри грубее 8-й категории. Когда по расчету получаются пузыри большого диаметра, то следует подсчитать их площадь, выбирая класс пузырьки по ГОСТ 3514—67 и принимая, что число крупных пузырей составляет не более 10% всего числа пузырей. Если площадь пузырей окажется больше 1,5—2%, то следует брать категорию пузырьки строже, исходя уже из допустимой площади всех пузырей в 1,5—2%, не учитывая площадь пузырей в сетке, коллективе, окуляре вследствие небольшого их диаметра. Для объектива бинокля следует взять стекло с пузырькостью 7Г—8Г.

Коллектив: расстояние от сетки  $x=7 \div 10$  мм;

$$\varnothing = \varnothing_{06} \frac{x}{f'_{06}} = 0,5 \div 1 \text{ мм};$$

$$l = \frac{f'^2_{06}}{7 \div 10} = \frac{425}{7 \div 10} = 60 \div 40 \text{ мм};$$

$$\omega^0 = \frac{2 \cdot 57,3}{60 \div 40} = 1,9 \div 2,8;$$

$$d = (0,5 \div 1) \sqrt{0,002 \cdot 2,8 + 0,004} \approx \\ \approx 1 \cdot 0,031 = 0,03 \text{ мм—категория 1a.}$$

Пузырность стекла сетки можно определять исходя из величины делений или класса чистоты. Для сетки:  $\varnothing=0$ ;  $\omega^0=0$ ;  $d=0$  — пузыри не допускаются (1-я категория). Для глазных линз:  $\varnothing = D_p$ ,  $=2$  мм;  $l=s'_{p'}=15,0$  мм;

min

$$\omega^0 = \frac{2 \cdot 57,3}{15 + 5} = 5,73; \quad d = 2 \sqrt{0,002 \cdot 5,73 + 0,004} = 0,25 \text{ мм}$$

(3—4-я категория, класс Г, Д).

Подобным же образом определяем для окулярной призмы, расположенной от сетки на расстоянии 25 мм, пузырность 4—5-й категории и для объективной, расположенной от сетки на расстоянии 50 мм, — 6—7-й категории.

## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ И ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

### 18. О ПОДГОНКЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ПРОБНОЕ СТЕКЛО И ДОПУСКАХ НА РАДИУСЫ ПРОБНЫХ СТЕКОЛ

По роду своей работы автор принял в 1962 г. непосредственное участие в пересмотре и предложил существенные изменения в ГОСТ 2786—44, которые в основном и были приняты в новом ГОСТ 2786—62. «Стекла пробные для проверки радиусов кривизны оптических поверхностей». Ниже приведено обоснование этих изменений.

Поверхности оптических деталей (линз, призм, пластин, зеркал) проверяют рабочим пробным стеклом, радиус которого выдерживают с высокой точностью согласно ГОСТ 2786—62. Отклонение радиуса  $r$  или кривизны  $\rho$  оптической поверхности от радиуса  $r_{\text{пр}}$  пробного стекла характеризуется числом  $N$  интерференционных колец Ньютона, наблюдаемых при наложении пробного стекла на проверяемую оптическую поверхность, так как разность стрелок прогиба пробного стекла и проверяемой поверхности  $\Delta h = N\lambda/2$ . Величина отклонения радиуса или кривизны оптической поверхности зависит не только от числа интерференционных колец, диаметра поверхности сопряжения, в пределах которого эти кольца наблюдаются, длины волны света интерференции, но также и от того, имеет ли место касание по краю — наблюдается «яма» в  $N$  колец или касание в центре — «бугор» в  $N$  колец.

Касание пробного стекла и линзы по краю — наблюдается «яма» в  $N$  колец (рис. 3). Так как

$$r^2 = (r - h)^2 + R^2,$$

то

$$r = \frac{R^2 + h^2}{2h}. \quad (38)$$

Если  $r - r_{\text{пр}} = \Delta r$  — изменение радиуса кривизны и  $\rho = 1/r$  — кривизна, то изменение  $\Delta \rho$  кривизны можно найти дифференцированием последней:

$$\Delta \rho = -\Delta r / r^2.$$

После дифференцирования выражения (38)

$$\Delta r = -\frac{R^2 \Delta h}{2h^2} + \frac{\Delta h}{2} = \left(1 - \frac{R^2}{h^2}\right) \frac{\Delta h}{2}. \quad (39)$$

Формулу (39) можно упростить. Так как  $\frac{R^2}{2h} = r - \frac{h}{2}$ ,

то, подставив это значение в выражение (39), получим



При допущении одинакового отклонения кривизны для поверхностей разного диаметра число наблюдаемых (или допускаемых) колец должно быть прямо пропорционально квадрату диаметра проверяемой поверхности или одинаковым при равных диаметрах. Следовало бы линзы-полусферы проверять не по всему диаметру, а лишь по равному, например, диаметру входного зрачка; при этом можно хорошо заметить искривление колец при небольшом  $N$ , хотя полному диаметру в этом случае и будет соответствовать большое число колец, которое не может привести к заметному изменению кривизны.

Если наблюдаются кольца некруглой формы и если  $\Delta N = N_1 - N_-$  ( $\Delta N$  — разность чисел колец, отсчитанных по двум взаимно перпендикулярным диаметрам линзы), то разность  $\Delta \rho_a$  кривизны поверхностей по этим диаметрам (астигматичность) определяется формулой

$$\Delta \rho_a = \frac{4\Delta N\lambda}{D^2}. \quad (44)$$

Если наблюдается «местная» ошибка, т. е. искривление  $\Delta N_m$  колец на небольшом участке диаметром  $D_m$  детали, то для определения допустимости этой ошибки и сравнения ее с допуском  $\Delta N$  по чертежу следует вычислить  $\Delta N_D$  — искривление, соответствующее диаметру  $D$  детали, т. е.

$$\Delta N_D = \Delta N_m \left( \frac{D}{D_m} \right)^2 < \Delta N_{\text{черт.}} \quad (45)$$

Если это неравенство не соблюдается, то деталь должна быть забракована и возвращена на исправление.

**Касание пробного стекла и линзы в середине — наблюдается «бугор» в  $N$  колец.** Из рис. 4 следует  $h = \Delta r(1 - \cos u)$ , так как

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\Delta r \sin u}{r}, \quad ds = r du, \quad \text{и} \quad \text{тогда} \quad dh = \Delta r \sin u du,$$

$$h = \Delta r \int_0^u \sin u du = -\Delta r \int_0^u \cos u = \Delta r (1 - \cos u).$$

Отсюда

$$\Delta r = \frac{h}{1 - \cos u} = \frac{N\lambda}{2(1 - \cos u)}.$$

Освобождаясь от  $\cos u$ , получим

$$\Delta r_6 = \frac{rh}{r - \sqrt{r^2 - R^2}} \quad \text{или} \quad \Delta r_6 = \frac{rN\lambda}{2h}; \quad (46)$$

$$\Delta \rho_6 = \frac{N\lambda}{2rh}. \quad (47)$$

Для линз-полусфер  $\Delta r_6 = \frac{N\lambda}{2}$  является очень незначительной величиной. Из сравнения формул (40) и (46) имеем

$$\frac{\Delta r_a}{\Delta r_6} = \frac{r - h}{r} = \cos u. \quad (48)$$

При одном и том же числе колец при касании в вершине («бугор») отклонение радиуса проверяемой линзы получается обычно больше, чем при касании по краю («яма»), достигая при углах  $u=60, 80$  и  $84^\circ$  двукратной, шестикратной и восьмикратной величины соответственно. Однако при сравнительно больших радиусах кривизны и небольших диаметрах линз эта разница незначительна и ею можно пренебречь; например, при  $u=20^\circ \Delta r_\delta > \Delta r_\pi$  на 10%.

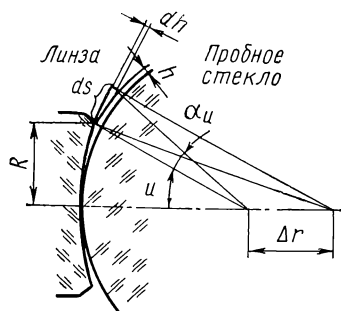


Рис. 4. Касание пробного стекла и проверяемой поверхности в середине

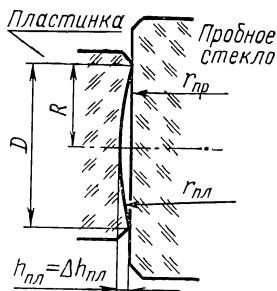


Рис. 5. Касание пробного стекла и проверяемой плоской поверхности

**Плоские поверхности (рис. 5).** Для плоской поверхности  $h=0$  и  $r_{пр} = \frac{R^2 + h^2}{2h} = \infty$ .

При отклонении плоской поверхности от пробного стекла

$$r_{пл} = \frac{R^2 + \Delta h^2}{2\Delta h} = \frac{R^2}{2\Delta h} + \frac{\Delta h}{2} \approx \frac{R^2}{2\Delta h}.$$

Окончательно радиус реальной плоской поверхности

$$r_{пл} = \frac{R^2}{N\lambda} = \frac{D^2}{4N\lambda} \approx \frac{450D^2}{N}, \quad (49)$$

и кривизна

$$\Delta \rho = \frac{1}{r_{пл}} = \frac{4N\lambda}{D^2} \approx \frac{N}{450D^2}. \quad (49a)$$

Полученные величины такие же, что и для сферических поверхностей большого радиуса кривизны и небольшого (по сравнению с радиусом) диаметра.

**О допусках на пробные стекла.** В выражения оптической силы и аберраций оптической системы помимо других параметров входят кривизны, а не радиусы поверхностей: оптическая сила и аберрации пропорциональны кривизне поверхностей. Таким образом, при определении влияния погрешностей изготовления поверхностей на аберрации оптической системы следует выяснить влияние погреш-



ностей кривизны, а не погрешностей радиусов. Степень влияния погрешностей поверхностей на изменение аберраций можно выявить только в том случае, если определять изменения аберраций, соответствующие одинаковым изменениям кривизны различных поверхностей системы, а не их одинаковым изменениям  $\Delta r$  радиусов или относительным изменениям радиусов. Поверхности, изменения кривизны которых вызывают наибольшие изменения аберраций, более «чувствительны» к погрешностям изготовления, чем те, у которых такие же изменения кривизны вызывают меньшие изменения аберраций. Поэтому, с точки зрения изменения оптической силы и аберраций, в основу допусков на изготовление пробных стекол и поверхностей линз необходимо положить величину изменения кривизны поверхностей, а не величину изменения радиусов  $\Delta r$  или относительного изменения радиусов  $\Delta r/r$ , что принято в настоящее время.

Исходя из трудности обработки поверхностей следует взять за основу погрешностей изготовления поверхностей также изменения кривизны поверхностей, так как только при одинаковых изменениях кривизны получается по оси линз слой стекла той же самой толщины, подлежащей споллировыванию для разных поверхностей одного и того же диаметра. Поэтому надо считать одинаковыми погрешностями изготовления поверхностей такие, при которых имеют место одни и те же погрешности кривизны. Равным изменениям кривизны линз одного и того же диаметра соответствуют одинаковые числа интерференционных колец подгонки поверхностей под пробное стекло. При одном и том же допустимом изменении кривизны, т. е. при одной и той же погрешности изготовления, допустимая толщина подлежащего споллировыванию слоя стекла по оси детали пропорциональна квадрату диаметра детали. В этом отношении здесь выявляется связь точности изготовления поверхности с величиной ее диаметра. Такая же зависимость имеется в системе допусков на отверстия и валы. Поэтому обычно задаваемая для всех поверхностей системы (чаще всего для обеих поверхностей линзы) одинаковая допустимая относительная погрешность радиуса  $\Delta r/r$  пробного стекла вызывает (или может вызвать) неодинаковое изменение аберраций и представляет собой неодинаковую погрешность изготовления пробного стекла и поверхностей оптической системы. В этом случае допуск оказывается узким для больших радиусов, к тому же часто менее чувствительных к изменениям аберраций, чем малые радиусы. Изготовление и измерение пробных стекол с большими радиусами (особенно на сферометре) оказывается более трудным, чем с малыми радиусами, когда на те и другие задана одинаковая относительная погрешность радиуса. Поэтому, с точки зрения допустимых изменений аберраций и изготовления пробных стекол, нельзя назначать одинаковый допуск на относительную погрешность  $\Delta r/r$  разных радиусов линз. Если требуется изготавливать пробные стекла всех поверхностей системы с одинаковой точностью, с одинаковым изменением кривизны и выражать, если это удобнее, эту точность относительными погрешностями радиусов, то должна существовать следующая зависимость между относительными погрешностями радиусов, например первой и всех других поверхностей системы:

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{r_1} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1}; \quad (50)$$

$$\Delta r_v = \left( \frac{r_v}{r_1} \right)^2 \Delta r_1. \quad (51)$$

Это же соотношение должно иметь место и при составлении таблицы влияния изменения радиусов кривизны поверхностей на aberrации, так как назначение изменения радиусов, соответствующего одному и тому же относительному изменению  $\Delta r/r$  радиусов или же числу интерференционных колец при разных диаметрах линз, вызывает неодинаковые изменения кривизны, что затрудняет сравнение влияния изменения кривизн (погрешностей изготовления различных поверхностей оптической системы) на aberrации. Указываемый в чертежах на линзы допуск на изготовление пробного стекла весьма часто оказывается грубее, чем допуск на подгонку под пробное стекло, если их выражать одной и той же величиной изменения кривизны или числом колец Ньютона, приходящихся на одинаковые диаметры пробного стекла и линзы. Часто

$$N_{\text{пр}} = \frac{D^2}{4\lambda} \cdot \frac{\Delta r}{r^2} > N_{\text{л}},$$

т. е. погрешность мерительного инструмента больше, чем допустимая погрешность изготовления поверхностей линз, которые проверяются этим мерительным инструментом — пробным стеклом, что недопустимо. Следует выдерживать условие

$$N_{\text{л}} > N_{\text{пр}} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \cdot \frac{\Delta r}{r^2} \approx 450 D^2 \frac{\Delta r}{r^2};$$

допуск на пробное стекло

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= \frac{\Delta r}{r^2} \leq \frac{4 N_{\text{л}} \lambda}{D_{\text{л}}^2}; \\ \frac{\Delta r}{r} &\leq \frac{4 r N_{\text{л}} \lambda}{D_{\text{л}}^2}. \end{aligned} \quad (52)$$

Правильнее принять

$$\frac{\Delta r}{r} \% = \left( \frac{1}{3} \div \frac{1}{5} \right) \frac{400 r N_{\text{л}} \lambda}{D_{\text{л}}^2} = \frac{r N_{\text{л}}}{(13 \div 22) D_{\text{л}}^2}. \quad (53)$$

При таком соотношении допусков на пробное стекло и на подгонку под него можно не учитывать влияния погрешности изготовления пробного стекла (большинство оптических систем и изготавливают таким образом), если допуск  $N$  на подгонку под пробное стекло назначен правильно, исходя из допустимого изменения aberrаций. При этом учитывают, что отклонение радиусов пробных стекол может также вызвать изменение aberrаций и понизить качество изображения, если указанный допуск назначен неправильно.

Часто в чертежах указывают неправильные допуски  $N$  на подгонку под пробное стекло и неправильно считают, что отклонение от заданного радиуса кривизны пробного стекла не влияет на качество изображения и его указывают в чертеже лишь для того, чтобы заметить отклонение от правильной сферы. В действитель-

ности отклонение от заданного радиуса кривизны пробного стекла, особенно сверх допустимого, вызывает изменение аберраций и снижает качество изображения, а отклонение от правильной сферы вызывает появление астигматизма для точки предмета на оптической оси. Таким образом, для некоторых радиусов допуски на изготовление пробных стекол могут оказаться более узкими, а для других — более широкими, чем это указано в ГОСТ на пробные стекла. Поэтому в тех случаях, когда такие допуски оказались узкими и их выдерживание встречает большие трудности, необходимо пробные стекла изготавливать насколько возможно точно (например, в пределах  $\pm 0,03\%$ ), затем точно измерять (лучше на автоколлимационной установке) и действительные отклонения учитывать при пересчете системы на плавки и пробные стекла. Так как сложная система обычно содержит 6—10 и более поверхностей, то имеется большая вероятность компенсации погрешностей, что позволит небольшим изменением других параметров (толщин, воздушных промежутков) системы получить опять аберрации основной системы. Если допуски на пробные стекла при их расчете оказываются широкими, то можно использовать пробные стекла с радиусами, близкими к расчетным. Однако нельзя рекомендовать изготовление пробных стекол с грубыми отклонениями радиусов от расчетных значений (от нормального ряда радиусов), так как может оказаться невозможным использование этих пробных стекол в других системах, чувствительных к изменениям кривизн, в которых допуски на радиусы пробных стекол более узки.

Таким образом, пробные стекла и при узких и широких допусках на радиусы линз следует изготавливать с погрешностью, позволяющей сравнительно просто компенсировать изменения аберраций, вызываемые этими погрешностями, небольшим изменением некоторых параметров системы (воздушных промежутков или толщин линз), или пренебрегая ими. Следовательно, в чертежах на оптические детали необходимо указывать такие допуски на радиусы поверхностей линз, влиянием которых можно пренебречь. Например, для изготовления фотообъективов высокого качества (светосильных и широкоугольных с фокусным расстоянием от 20 до 1000 мм) можно использовать пробные стекла с отклонениями радиусов  $0,03—0,05\%$  (для наиболее употребительных радиусов от 50 до 250 мм) и только для некоторых поверхностей требуется более строгое (до  $0,005—0,01\%$ ) выдерживание радиусов пробных стекол. Пробные стекла с более значительными радиусами можно изготавливать более грубо, например, с допусками

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{250} (0,01 \div 0,05\%). \quad (54)$$

Обычно, если в системе для одной из поверхностей с наименьшим радиусом, граничащей с воздухом, возможно использование пробного стекла с отклонением  $\frac{\Delta r_k}{r_k}$ , то также возможно использование пробных стекол для других поверхностей, также граничащих с воздухом, с отклонениями

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{r_k} \cdot \frac{\Delta r_k}{r_k}. \quad (55)$$

Необходимо при этом учитывать и положение поверхности в системе: допуск должен быть пропорционален величине  $\left(\frac{h_k}{h_v}\right)^4$ ,

т. е. четвертой степени отношения высот, на которых нулевой луч встречает  $k$ -ю и  $v$ -ю поверхности. Для поверхностей склейки кроновых линз эти допуски могут быть увеличены в  $n_{\text{дет}} - 1/n_{\text{дет}} - n_{\text{кл}}$  число раз, и для флинтowych линз допуски такие же, что и на их наружные поверхности, здесь  $n_{\text{дет}}$  и  $n_{\text{кл}}$  — показатели преломления соответственно материала детали и клея. Только для поверхностей сферических зеркал или внутренних поверхностей объективов или первых компонентов телеобъективов допуск должен назначаться строже (в 2—3 раза), чем для граничащих с воздухом поверхностей.

На пробные стекла раньше указывали одинаковый допуск на относительную погрешность радиуса для весьма широкого интервала радиусов (от 10 до 1000 мм); это приводило к тому, что в одной и той же системе поверхности с разными радиусами кривизны, часто одинаково влияющие на изменение аберраций, приходилось изготавливать с разной погрешностью, что нецелесообразно.

Для пробных стекол вне интервала 50—250 допуски на радиусы следует назначать по формуле

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{250} \left( \frac{\Delta r}{r} \right)_{\text{инт}},$$

где  $\left( \frac{\Delta r}{r} \right)_{\text{инт}}$  — допуск для радиусов в интервале 50—250 мм.

Диаметр пробного стекла не должен быть меньше диаметра проверяемой детали, что и указано в ГОСТ 2786—62. При проверке деталей большого диаметра (300—500 мм) диаметр пробного стекла не должен быть меньше 200—250 мм, поэтому в ГОСТ 2786—62 введены пробные стекла диаметром 180—250 мм.

В ГОСТ 2786—62 приняты следующие допуски на изготовление основных пробных стекол, учитывающие вышеизложенные соображения (табл. 4).

В пределах каждого интервала радиусов точность выдерживания кривизны увеличивается в 4—6 раз, что до некоторой степени и целесообразно, так как стекла больших радиусов чаще применяют в более длиннофокусных системах, требующих при изготовлении и более точного выдерживания кривизны. От первого интервала до последующего эта точность повышается, хотя и медленнее, чем возрастание радиусов; однако для последнего интервала и радиусов более 1000 мм она остается постоянной, а в интервалах 0,5—2; 2—10 и 10—37,5 эта точность изменяется в 16,25 и 14 раз и допуск  $\Delta r/r$  для 1-го класса находится в пределах 0,1—0,025, 0,05—0,25 и 0,02—0,005%. Допустимая погрешность изготовления плоских пробных стекол в 17—40 раз меньше, чем сферических.

Из рассмотренных зависимостей изменения радиусов и кривизны оптических поверхностей следует необходимость более тщательного назначения допусков на радиусы оптических деталей и пробных стекол, что сокращает непроизводительную затрату времени и труда на изготовление пробных стекол с излишней точностью и повышает качество изображения оптических систем.

Т а б л и ц а   4

**Допуски на изготовление пробных стекол**

Классы точности пробного стекла	Сферические стекла с номинальными значениями радиусов кривизны в мм						Плоские стекла
	от 0,5 до 2	св. 2 до 10	св. 10 до 37,5	св. 37,5 до 250	св. 250 до 1000	св. 1000 до 40000	Отклонения от плоскости в интерференционных полосах
	Допустимые отклонения радиусов						
	в мкм (±)			в % от величины номинальных радиусов (±)			
1-й	0,5	1,0	2,0	0,01	0,02	$\frac{0,02 \, r}{1000}$	0,05
2-й	1,0	3,0	5,0	0,03	0,05	$\frac{0,05 \, r}{1000}$	0,07
3-й	2,0	10,0	15,0	0,10	0,15	$\frac{0,15 \, r}{1000}$	0,10

## 19. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ПРОБНЫЕ СТЕКЛА И НА ПОДГОНКУ ПОД ПРОБНОЕ СТЕКЛО

При расчете допусков на параметры простых фотообъективов и объективов зрительных труб средней светосилы и поля зрения можно исходить из того, чтобы допуски на параметры ограничивали допустимое изменение сферической аберрации. В этом случае изменения и других аберраций оказываются несущественными и ими можно пренебречь. Однако для некоторых систем важно выдержать номинальное фокусное расстояние; к ним относятся фотообъективы, работающие с дальномером или по шкале дистанций, объективы зрительных труб с дальномерными и прицельными сетками и объективы биноклярных приборов, в которых отклонение фокусного расстояния объективов и окуляров может вызвать недопустимую разность увеличений

$$\Delta\Gamma = -\Gamma \left( \frac{\Delta f'_{об}}{f'_{об}} - \frac{\Delta f'_{ок}}{f'_{ок}} \right);$$

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = - \left( \frac{\Delta f'_{об}}{f'_{об}} - \frac{\Delta f'_{ок}}{f'_{ок}} \right). \quad (56)$$

Отклонение фокусного расстояния  $\Delta f'_{об}$  фотообъектива вызывает ошибку в фокусировке по шкале дистанций или дальномеру

$$\Delta x' = \pm \frac{2f'_{об} \Delta f'_{об}}{x}. \quad (57)$$

В зрительных трубах  $\Delta f'_{об}$  объектива вызывает погрешность цены деления сеток

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{l}{f'_{об}}; \quad \frac{\Delta \alpha}{\cos^2 \alpha} = -\frac{l \Delta f'_{об}}{f'^2_{об}}; \\ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} &= -\frac{\cos^2 \alpha \Delta f'_{об}}{f'_{об}} \approx -\frac{\Delta f'_{об}}{f'_{об}}. \end{aligned} \quad (57a)$$

В этих системах допуски на  $\Delta n$ ,  $\Delta R$  и  $N$  — соответственно на показатель преломления, радиусы пробных стекол и подгонку под пробное стекло, рассчитанные исходя из допустимого изменения  $\Delta f'_{об}$ , оказываются настолько узкими, что и изменения аберраций остаются допустимыми, исключая внутренние поверхности несклеенных объективов, первых компонентов телеобъективов и некоторых поверхностей большой кривизны в фотообъективах (в том числе склеенных), на которые допуски  $\Delta r_v$  и  $N_v$  должны быть в 2—3 раза уже.

Для тонкой системы

$$\Delta \varphi' = \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} \Delta \varphi'_v; \quad \Delta f' = -f'^2 \Delta \varphi' = -f'^2 \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} \Delta \varphi'_v. \quad (58)$$

От изменения радиуса кривизны поверхности оптическая сила  $v$ -й линзы и фокусное расстояние всей системы изменяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi'_v &= (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2}; \\ \Delta f' &= -f'^2 \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2}. \end{aligned} \quad (59)$$

Допустимое изменение радиуса кривизны  $v$ -й поверхности

$$\Delta r_{v \text{ доп}} = \frac{\Delta f'_{\text{доп}}}{\sqrt{p} f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{r_v^2}{n'_v - n_v}; \quad (60)$$

$$\frac{\Delta r_{v \text{ доп}}}{r_v^2} = \frac{h_1/h_v \Delta f'_{\text{доп}}}{\sqrt{p} (n'_v - n_v) f'^2} \quad (61)$$

прямо пропорционально допуску на фокусное расстояние, отношению  $h_1/h_v$ , квадрату радиуса кривизны и обратно пропорционально квадрату фокусного расстояния системы и разности показателей преломления сред, границей которых является поверхность. Из формулы (61) следует, что этот допуск оказывается узким для длиннофокусных систем и менее узким для поверхностей склейки и поверхностей, находящихся близко от плоскости изображения ( $h_1/h_v$  велико). При выборе допуска  $\Delta f'_{\text{доп}}$  надо учитывать и погрешности других параметров ( $n$  и  $N$ ); поэтому следует брать  $\Delta f'_{\text{доп}}$  не более  $1/3$ — $1/5$  всего допуска, имея в виду, что пробное стекло — мерительный инструмент — не должно вносить погрешности при изготовлении изделий, т. е. должно выдерживаться неравенство

$$\frac{\Delta r_v}{r_v^2} \leq \frac{4N_v \lambda}{D_v^2}; \quad \frac{\Delta r_v}{r_v^2} = \left( \frac{1}{3} \div \frac{1}{5} \right) \cdot \frac{4N_v}{D_v^2}. \quad (62)$$

Если допустить одинаковые  $\Delta \varphi'$  и  $\Delta f'$  от изменения  $\Delta r_v$  и  $\Delta r_1$ , то можно установить такое соотношение:

$$\frac{\Delta r_v}{r_v^2} = \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1^2}; \quad (63)$$

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{n'_1 - 1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{r_v}{r_1} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1}. \quad (64)$$

Очевидно, что допустимое изменение радиусов кривизны следует назначать также и в зависимости от величины радиуса; вы-

бранное значение  $\frac{\Delta r_v}{r_v}$  надо округлять до значений по ГОСТ

2786—62. Аналогичные формулы получаются при расчете допуска  $N$  на подгонку под пробное стекло исходя из допустимого изменения фокусного расстояния:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi'_v &= (n'_v - n_v) \frac{4N_v \lambda}{D_v^2}; \\ \Delta f' &= -f'^2 \sum_v^n \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{4N_v \lambda}{D_v^2} = \\ &= -\frac{f'^2}{450} \sum_v^n \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{N_v}{D_v^2} \end{aligned}$$

при  $\lambda = 0,00055$  мм. Задаваясь  $\Delta f'_{\text{доп}}$  при  $p$  поверхностях в системе, получим

$$N_{\text{вдоп}} = \frac{450 D_v^2}{\sqrt{p} f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{\Delta f'_{\text{доп}}}{(n'_v - n_v)}. \quad (65)$$

Здесь следует брать  $\Delta f'_{\text{доп}}$  как часть (третью, пятую) от всего допуска на отклонение фокусного расстояния. Допуск  $N_v$  оказывается более узким для длиннофокусных систем. Число  $N_v$  возрастает пропорционально квадрату диаметра детали, отношению  $h_1/h_v$  и обратно пропорционально разности показателей преломления сред, границей раздела которых является поверхность. Допуск будет более широким для поверхностей склейки, где разность  $n_v - n_v$  мала, и поверхностей, находящихся вблизи плоскости изображения, для которых отношение  $h_1/h_v$  велико (коллективы, поверхности окулярных призм, сеток и линз вторых компонентов телеобъективов). Если принять, что за счет отклонения  $N_1$  и  $N_v$  первой и  $v$ -ой поверхностей от пробного стекла фокусное расстояние системы изменяется одинаково, то можно установить следующее соотношение между  $N_v$  и  $N_1$ :

$$N_v = \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{h_1}{h_v} \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 N_1. \quad (66)$$

Последней формулой можно пользоваться в первом приближении при назначении допуска  $N$  на поверхности системы, если допуск  $N_1$  установлен (рассчитан) исходя из допуска на  $\Delta f'$  или изменения аберраций (исключая внутренние поверхности несклеенных двухлинзовых объективов и первых компонентов телеобъективов и некоторых поверхностей фотообъективов, в том числе и склеенных, большой кривизны, допуск на которые должен быть более узким, в 2—3 раза).

**Пример.** Определить допуск на подгонку под пробное стекло поверхностей объектива И50;  $f'=52,5$  мм; относительное отверстие  $1:3,5$ ;  $2\omega=45^\circ$ ;  $D_{1,2}=16,0$  мм; диаметр второй, третьей и четвертой линз — 14,0 мм, но у второй линзы на обеих поверхностях световой диаметр 12,8 мм (фаски);  $n_{1,4}=1,6130$ ;  $n_2=1,5749$ ;  $n_3=1,5294$ ; для первой линзы  $h_1/h_v=1,0$ ; для второй, третьей и четвертой линз  $h_1/h_4=1,18$ ; примем  $\Delta f'_{\text{доп}}=0,2 \cdot 1\%$   $f'=0,1$  мм ( $1/5$  часть всего допуска —  $\pm 1\%$   $f'$ ), число поверхностей 6 (склеенные исключаем):

$$N_{1,2} = \frac{450 \cdot 0,1 \cdot 16^2}{\sqrt{6} \cdot 52,5^2 \cdot 0,613} = 2,8, \text{ примем } N_{1,2} = 3,0;$$

$$N_{3,4} = \frac{0,613 \cdot 1,18}{0,5749} \left( \frac{12,8}{16} \right)^2 \cdot 2,8 \approx 2,3, \text{ примем } N_{3,4} = 2,5;$$

$$N_5 = \frac{0,613 \cdot 1,18}{0,5294} \left( \frac{12,8}{16} \right)^2 \cdot 2,8 \approx 2,4, \text{ примем } N_5 = 2,5;$$

$$N_7 = \frac{0,613 \cdot 1,18}{0,613} \left( \frac{12,8}{16} \right)^2 \cdot 2,8 = 2,1, \text{ примем } N_7 = 2,0.$$

На поверхности склейки третьей детали ( $n_3=1,5294$  и  $n_{\text{кл}}=1,52 \div 1,54$ , 6-я поверхность) и четвертой детали ( $n_4=1,6130$  и  $n_{\text{кл}}=1,52 \div 1,54$ , поверхность ба) можно назначить широкий допуск:  $N_6=—$ ;  $\Delta N_6=—$  и  $N_{6a}=10$ ;  $\Delta N_{6a}=—$  или с учетом особенности склейки бальзамином, когда при грубых  $N$  и  $\Delta N$  поверхностей воз-



можно расклеивать, необходимо  $N$  и  $\Delta N$  брать точнее ( $N \approx 5$ ;  $\Delta N = 1 \div 2$ ). Следует по возможности склеивать более эластичным клеем (ОК50, ОК72), который не образует расклеек у поверхностей с большими отклонениями.

Если известно, что оптический цех изготавливает большинство поверхностей с предельными отклонениями  $N$  и  $\Delta N$ , то эти допуски следует несколько ужесточить; если же предельные отклонения встречаются редко, то допуски  $N$  и  $\Delta N$  можно расширить. Допуски на пробные стекла определим по формуле

$$\frac{\Delta r}{r^2} \leq \frac{4N_{\lambda}}{D_{\lambda}^2};$$

$$\frac{\Delta r}{r} \% = \frac{100 \cdot 4N_{\lambda} \lambda r}{(3 \div 5) D_{\lambda}^2} = (0,07 \div 0,055) \cdot \frac{N_{\lambda} r}{D_{\lambda}^2}. \quad (67)$$

Для первой поверхности

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} \% = (0,07 \div 0,055) \frac{3 \cdot 17,1}{16^2} \approx (0,014 \div 0,01) \%;$$

$\Delta r = 0,0024 \div 0,0017$  (1—2-й класс точности пробных стекол);  
для третьей поверхности

$$\Delta r = (0,07 \div 0,055) \% \frac{2,5 \cdot 33,57}{14^2} = 0,010 \div 0,007 \text{ (2—3-й класс);}$$

для пятой поверхности

$$\frac{\Delta r}{r} \% = (0,07 \div 0,055) \frac{2,5 \cdot 346,7}{14^2} = (0,31 \div 0,24) \% \text{ (3-й класс);}$$

для второй поверхности

$$r_2 = \infty; N_{\text{пр}} = 0,2N_{\lambda} = 0,6 > 0,1 \text{ (3-й класс).}$$

Однако изменение кривизны различных поверхностей, вызвавшее одинаковое отклонение фокусного расстояния, изменяет аберрации неодинаково (например, у внутренних поверхностей несклеенных двухлинзовых объективов или первых компонентов телеобъективов, или у некоторых поверхностей большой кривизны). Поэтому точнее допуски  $\Delta r$ ,  $N$  на различные поверхности можно назначить исходя из допустимых изменений аберраций, а не только  $\Delta f'_{\text{доп}}$ . В неширокоугольных системах (с  $2\omega \ll 35 \div 50^\circ$ ) оказывается достаточно для сохранения высокого качества изображения учесть только допустимое изменение сферической аберрации. Для широкоугольных систем допустимые  $\Delta r$  и  $N$  следует определять, пользуясь таблицей влияния, так как приближенные формулы перестают давать удовлетворительные результаты или становятся громоздкими.

В области аберраций третьего порядка продольную сферическую аберрацию  $\delta s'_k$  можно вычислить для предмета, находящегося в бесконечности, по формулам (377) и (378) работы [10], которые для оптической системы из линз, расположенных в воздухе, можно выразить и через линзовые коэффициенты (формула (390) работы [10]). Дифференцируя линзовый коэффициент по кривизне поверхностей каждой линзы, можно найти зависимость изменения линзо-

вых коэффициентов, первой суммы Зейделя и сферической аберрации третьего порядка от изменения кривизны каждой поверхности линзы, т. е. можно определить чувствительность каждой поверхности сложной системы к ошибкам подгонки под пробное стекло и погрешностям изготовления пробных стекол. Можно также определить и допуски на изготовление пробных стекол и подгонку поверхностей оптических деталей под пробное стекло, если задать допустимую величину изменения сферической аберрации, т. е. можно выразить в явном виде зависимость изменения сферической аберрации от изменения кривизны каждой поверхности детали, расположенной в воздухе, для конкретной оптической системы. Однако приведенные формулы не позволяют установить эту зависимость для поверхностной склейки или поверхностей, граничащих со средой, отличной от воздуха. В этом случае следует дифференцировать по кривизне поверхности каждый член под знаком суммы основной формулы (377) и (378) работы (10), заменив  $s'$  через  $s$  или  $s$  через  $s'$  ( $s_1 = -\infty$ ):

$$dA_v = d \left[ Q_{s_v}^2 \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v \right] = n_v^2 \left[ 2 \left( \frac{3n_v}{n_v'^2} - \frac{2}{n_v'} - \frac{1}{n_v} \right) \sigma_v \rho_v - \left( \frac{3n_v}{n_v'^2} - \frac{2}{n_v} - \frac{1}{n_v'} \right) \sigma_v^2 + 3 \frac{n_v' - n_v}{n_v'^2} \rho_v^2 \right] d\rho_v. \quad (68)$$

Так как

$$\frac{n_v'}{r_v} - \frac{n_v}{r_v} + \frac{n_v}{s_v} = \frac{n_v'}{s_v} = \frac{n_v'^2}{n_v' s_v'}$$

и

$$\frac{1}{n_v s_v} = \frac{1}{n_v^2} \left( -\frac{n_v' - n_v}{r_v} + \frac{n_v'}{s_v'} \right),$$

то

$$\begin{aligned} \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v &= \frac{1}{n_v' s_v'} - \frac{1}{n_v^2} \left( -\frac{n_v' - n_v}{r_v} + \frac{n_v'}{s_v'} \right) = \\ &= -\frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2} \cdot \frac{1}{n_v' s_v'} + \frac{n_v' - n_v}{n_v^2 r_v}; \\ d \left[ Q_{s_v}^2 \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v \right] &= n_v'^2 \left\{ 3 \frac{n_v' - n_v}{n_v^2} \rho_v^2 - \left( 2 \frac{n_v' - n_v}{n_v^2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \right) \left( 2\rho_v \sigma_v' + \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \rho_v^2 \right) + \left( \frac{n_v' - n_v}{n_v^2} + \right. \right. \end{aligned}$$

$$+ 2 \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \left) \cdot \left( \sigma_v'^2 + 2 \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \rho_v \sigma_v' \right) - 3 \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \times \right. \\ \left. \times \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \sigma_v'^2 \right\} d\rho_v. \quad (68a)$$

При этом имеется в виду, что из инварианта

$$n_v' \left( \frac{1}{r_v} - \frac{1}{s_v'} \right) = n_v \left( \frac{1}{r_v} - \frac{1}{s_v} \right); \\ \frac{1}{s_v'} = \sigma_v' = \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \cdot \frac{1}{r_v} + \frac{n_v}{s_v}$$

и

$$d\sigma_v' = \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \Delta\rho_v,$$

так как  $\sigma_v \neq \text{const}$  и зависит от  $\Delta\rho_v$ .

Определив допустимое изменение кривизны  $\Delta\rho_{\text{доп}}$  по допустимому изменению сферической аберрации, можно определить и допуски на подгонку под пробное стекло по формуле (43) и допуск на изготовление пробного стекла по формуле (65).

Выбор величины допустимого изменения продольной сферической аберрации для различных оптических систем является сложной задачей и требует особого рассмотрения. Однако с небольшой погрешностью ее можно принять равной, например, для фотообъективов и объективов зрительных труб  $1/3$ — $1/5$  глубины резкости: при этом ухудшение качества изображения останется незаметным. Допуская квадратичное сложение предельных погрешностей, на долю одной поверхности можно взять величину в  $\sqrt{\rho}$  раз меньшую всего допустимого изменения сферической аберрации, и тогда из формул (23), (68) и (68a) получим

$$\Delta\rho_{v \text{ доп}} = \frac{2\Delta\delta s'_{k \text{ доп}}}{\sqrt{\rho} h_1^2 f'^2} \left( \frac{h_1}{h_v} \right)^4 \frac{1}{dA_v}. \quad (69)$$

По формулам (43) и (69) вычисляем

$$N_{\text{ден}} = \frac{2\Delta\delta s'_{k \text{ доп}}}{4 \sqrt{\rho} h_1^2 f'^2} \left( \frac{h_1}{h_v} \right)^4 \frac{D_v^2}{dA_v \lambda}. \quad (69a)$$

Если принять  $\lambda=0,000555$  и, зная, что  $dA_v$  при  $\varphi'=1/f'$  в  $f'^2$  раз меньше, чем  $dA_v$  при  $\varphi'=1$ , которое и подставим в формулу (69a), то получим

$$N_{\text{доп}} = \frac{900 \Delta \delta s'_k \text{ доп}}{\sqrt{\rho} h_1^2 dA_v} \left( \frac{h_1}{h_v} \right)^4 D_v^2. \quad (70)$$

Допуск на пробное стекло определяем по формуле (65). Например, для двухлинзового несклеенного объектива

$f' = 100$  мм; относительное отверстие 1:3

$r_1 = 64,42$			$D$
$d_1 = 6,0$	TK14		35
$r_2 = 39,75$			
$d_2 = 0,1$			
$r_3 = -38,84$			
$d_3 = 2,0$	Ф1		35
$r_4 = -737,87$			

По формулам (68) и (68а) и  $\phi' = 1$  вычислено, что для первой линзы  $dA_1 = 24,4 \Delta \rho_1$ ;  $dA_2 = -49,9 \Delta \rho_2$  и для второй линзы  $dA_1 = -28,96 \Delta \rho_1$ ;  $dA_2 = -6,84 \Delta \rho_2$ . Если предположить, что такой объектив может работать в зрительной трубе с увеличением не более  $\Gamma = 8\times$ , т. е. с окуляром  $f' = 12$  мм, то изменение сферической абер-

рации в диоптриях  $\Delta \delta s'_k = \frac{0,2 f_{\text{ок}}^2}{1000}$  — не более 0,2 диоптрии можно, по-видимому, допустить, т. е.

$$\Delta \delta s'_k = \frac{0,2 \cdot 12^2}{1000} = 0,03 \text{ мм.}$$

Тогда

$$N_{\text{доп}} = \frac{900 \cdot 0,03 \left( \frac{1}{1} \right)^4}{\sqrt{4 \cdot 17,5^2 \cdot 24,4}} \cdot 35^2 = 2,2; \quad N_{2\text{доп}} = 1,1.$$

Для второй линзы  $N_{1\text{доп}} = 1,8$ ;  $N_{2\text{доп}} = 8$ .

Допуск на пробное стекло:  
для первой линзы

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = 0,07 \frac{2,2}{35^2} 64,42 = 0,0085\%; \quad \frac{\Delta r_2}{r_2} = 0,003\%;$$

для второй линзы

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = 0,005\% \text{ и } \frac{\Delta r_2}{r_2} = 0,4\%.$$

В этом примере узкие допуски  $N_1$  и  $N_2$  первой и  $N_1$  (а также и  $N_2$ ) второй линзы могут быть расширены, если применить объектив в зрительной трубе с меньшим увеличением (при возрастании  $f'_{\text{ок}}$  увеличивается  $\Delta \delta s'_k \text{ доп}$ ) или допустить в 2 раза большее изменение сферической аберрации, зная, что в плоскости наилучшей установки оно вызовет кружок нерезкости в 2 раза меньший, чем в плоскости Гаусса. Изменение сферической аберрации можно вы-

разить через изменение волновой аберрации или наоборот [14] и, исходя из допустимого изменения волновой аберрации, можно определить допуск на подгонку под пробное стекло и на пробное стекло.

Анализ двухлинзовых склеенных и несклеенных трехлинзовых и четырехлинзовых объективов зрительных труб (бинокля и геодезических приборов), фотообъективов «Триплет», «Индустар», «Таир» и более сложных показывает хорошее сходжение получаемых результатов с изменениями аберраций, вычисленными путем расчета хода лучей по тригонометрическим формулам или с помощью электронной вычислительной машины. Приведенные формулы позволяют надежно определять в сложной оптической системе поверхности, требующие узких допусков на подгонку под пробное стекло и изготовление пробных стекол, и поверхности, изготовление которых возможно с грубыми допусками, не вызывающими ухудшения качества изображения. Например, в двухлинзовом склеенном объективе из стекол К8 и Ф1 допуск на подгонку под пробное стекло, склеиваемой поверхности первой линзы из стекла К8 в 100 раз, а второй линзы — в 7 раз шире допуска на подгонку под пробное стекло первой поверхности, граничащей с воздухом. Вторую поверхность второй линзы можно изготавливать в 4—5 раз грубее, чем первую поверхность первой линзы. Если двухлинзовый объектив изготавливать расклеенным, то вторая поверхность первой линзы требует в 2—2,5 раза, а первая поверхность второй линзы в 1,2 раза меньшего допуска на подгонку под пробное стекло, чем первая поверхность первой линзы.

Для поверхностей призм, защитных стекол и светофильтров, расположенных вблизи от объектива, допуск на подгонку под пробное стекло оказывается таким же, как и для поверхностей объектива. Для поверхностей этих же деталей, расположенных вблизи

плоскости изображения  $\left(\frac{h_v}{h_1} \text{ мало}\right)$ , допуск оказывается грубым, пропорциональным примерно  $\left(\frac{h_1}{h_v}\right)^4$ .

## 20. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОТКЛОНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ОТ ПРАВИЛЬНОЙ СФЕРЫ

Отклонение поверхностей оптических деталей от правильной сферы, их астигматичность приводят в оптических системах к появлению астигматизма и для точки предмета на оптической оси. Это ухудшает качество изображения и снижает разрешающую способность как по полю зрения, так и в центре поля зрения, где обычно качество изображения наилучшее и всякое его ухудшение становится поэтому легко заметным. Исходя из допустимого астигматизма для точки предмета на оптической оси, при котором разрешающая способность и качество изображения еще не снижаются недопустимым образом, можно рассчитать допуски  $\Delta N$  на отклонение поверхностей оптических деталей от правильной формы, их астигматичность.

Оптическая сила  $\varphi'_v$  одной  $v$ -ой поверхности, служащей границей двух сред с показателями преломления  $n_v$  и  $n'_v$  [12]:

$$\varphi'_v = (n'_v - n_v) \rho_v.$$

Оптическую силу тонкой системы, состоящей из тонких линз в воздухе, можно выразить через оптические силы отдельных поверхностей

$$\varphi' = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \varphi'_v.$$

Изменение  $\Delta\varphi'$  оптической силы  $v$ -ой поверхности вследствие отклонения кривизны  $\rho_v$  этой поверхности определяют по формуле (59) и для системы поверхностей — по формуле

$$|\Delta\varphi'| = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \Delta\varphi'_v = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2}. \quad (71)$$

При отклонении поверхности от правильной сферы разность  $\Delta\rho_{va}$  кривизны в двух взаимно перпендикулярных сечениях поверхности определяют по формуле (44). Тогда для  $v$ -ой поверхности

$$|\Delta\varphi'_{va}| = (n'_v - n_v) \frac{4N_v \lambda}{D_v^2} \quad (58a)$$

и для системы поверхностей

$$\Delta\varphi'_a = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \Delta\varphi'_{va}, \quad (71a)$$

где  $\Delta\varphi'_{va}$  и  $\Delta\varphi'_a$  — разности оптических сил для одной поверхности и для системы поверхностей в двух взаимно перпендикулярных сечениях из-за отклонения  $v$ -ой поверхности от правильной сферы.

С другой стороны,

$$\begin{aligned} \varphi' &= 1/f'; & \Delta\varphi' &= -\Delta f'/f'^2; \\ \Delta f' &= -f'^2 \Delta\varphi'. \end{aligned}$$

Можно принять, что  $\Delta f'_a \approx \Delta s'_a$ , т. е. изменение фокусного расстояния равно изменению вершинного фокусного расстояния и положения изображения. Это справедливо, если изменение фокусного расстояния происходит вследствие изменения радиусов кривизны и система тонкая, т. е.

$$|\Delta s'_a| \approx f'^2 \Delta\varphi'_a.$$

Если допустить равное действие всех  $p$  поверхностей системы на образование астигматизма  $a_{\text{то}}$  для точки изображения на оптической оси, квадратичное сложение предельных погрешностей отдельных поверхностей и считать, что

$$|\Delta\Phi'_{\text{а.доп}}| \leq \frac{a_{\text{то. доп}}}{f_{\text{об}}'^2},$$

то на долю одной поверхности можно допустить

$$|\Delta\Phi'_{\text{в а. доп}}| = \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \cdot \frac{4\Delta N_{\text{в доп}} \lambda}{D_v^2} \leq \frac{a_{\text{то. доп}}}{V \sqrt{p} f_{\text{об}}'^2}.$$

Отсюда получаем

$$\Delta N_{\text{в доп}} \leq \frac{D_v^2 a_{\text{то. доп}}}{4 V \sqrt{p} \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) f_{\text{об}}'^2 \lambda}. \quad (72)$$

Если взять для желто-зеленых лучей  $\lambda = 0,00056$  мм, то для фотообъективов получим

$$\Delta N_{\text{в доп}} \leq \frac{450 D_v^2 a_{\text{то. доп}}}{V \sqrt{p} \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) f_{\text{об}}'^2}. \quad (73)$$

Так как для телескопических систем

$$a_{\text{то. доп}} = \frac{f_{\text{ок}}'^2}{1000} a_{\text{то. доп. дптр}},$$

то допуск на астигматичность поверхностей

$$\Delta N_{\text{в доп}} \leq \frac{0,450 D_v^2 a_{\text{то. доп. дптр}}}{V \sqrt{p} \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \Gamma^2}, \quad (74)$$

где  $f_{\text{ок}}$  — фокусное расстояние окуляра;  $\Gamma$  — увеличение зрительной трубы;  $\Delta s'_{\text{а. доп. дптр}}$  — допустимый для телескопической системы астигматизм в диоптриях, не заметный для наблюдателя. Из формул (73) и (74) следует, что допуск  $\Delta N$  на отклонение поверхностей от правильной сферы прямо пропорционален квадрату диаметра поверхности и обратно пропорционален отношению  $h_v/h_1$ , разности показателей преломления сред, границей которых является поверхность, и квадрату фокусного расстояния фотообъектива (73) или увеличения телескопической системы (74). Таким образом, для поверхностей большого диаметра — крайних линз фотообъективов «Орион» или «Руссар», последних линз телеобъективов «Телемар», а также поверхностей, для которых отношение  $h_v/h_1$  мало (вто-

рых компонентов телеобъективов, фокусирующих линз труб с внутренней фокусировкой, сеток, линз окуляров, преломляющих поверхностей призм, расположенных недалеко от плоскости изображения и т. п.), допуск  $\Delta N$  на отклонение от правильной сферы оказывается широким. Этот допуск может быть широким также и для поверхностей склейки, особенно с близкими показателями преломления стекла и клея ( $n'_v - n_v \approx 0,1$ ). Однако допуск  $\Delta N$  может оказаться узким для отражающих поверхностей ( $n'_v - n_v = 2$  — в воздухе и  $n'_v - n_v \approx 3$  — в стекле). На поверхности, допуск  $\Delta N$  для которых оказывается в соответствии с формулами (73) и (74) слишком широким, назначают допуск, сравнительно легко выполнимый на производстве (например,  $\Delta N = 1 \div 2$  или  $\Delta N = -$ ). Эти поверхности исключают из расчета допусков (число  $p$  уменьшается), за счет чего допуски на другие поверхности дополнительно могут быть несколько расширены. При небольшом числе поверхностей в системе или при низком качестве большого числа поверхностей, изготавливаемых оптическим цехом, целесообразно выбрать другую закономерность сложения предельных отклонений поверхностей от правильной сферы, а не квадратичное сложение.

Если исходить из предположения, что отклонение от правильной сферы любой поверхности оптической системы должно давать астигматизм одинаковой величины, то можно привести формулу для вычисления или для быстрой проверки целесообразности назначения допусков в  $\Delta N_v$  на все другие поверхности системы в зависимости от допуска  $\Delta N_1$  на первую поверхность:

$$\Delta N_v = \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 \Delta N_1. \quad (75)$$

Формула (75) получается из формул (73) и (74), если их написать соответственно для  $v$ -ой и первой поверхностей системы и затем выразить  $\Delta N_v$  через  $\Delta N_1$ . Формула (75) позволяет уже из рассмотрения только схемы оптики определить поверхности, которые должны быть выполнены с узкими или широкими допусками.

Для фотообъективов следует принять величину  $a_{\text{то, доп}} = (0,01 \div 0,02) f'_{\text{ог}} / D_p$ , при которой еще незаметно падение их разрешающей способности, и для зрительных труб  $a_{\text{то, доп дптр}} = 0,1 \div 0,2$  дптр, так как глаз наблюдателя еще не замечает астигматизма до 0,25 дптр при выходном зрачке 4—5 мм.

Формулы (73), (74) и (75) позволяют просто и с необходимой точностью, без большой вычислительной работы рассчитывать допуски на отклонение от правильной сферы каждой поверхности в зависимости от ее роли и места в оптической системе.

Для систем, состоящих из двух тонких компонентов, находящихся на конечном расстоянии друг от друга, формулы несколько изменяются. Например, для поверхностей линз первого компонента телеобъективов

$$a_{\text{то}} = -f_1'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1 (n'_v - n_v) \cdot \frac{4\Delta N \lambda}{D_v^2} \beta_{\text{II}}^2;$$



$$\Delta N_{\text{vI}} = \frac{450 D_{\text{v}}^2 a_{\text{то. доп}}}{V \sqrt{p} \left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{I}} (n'_{\text{v}} - n_{\text{v}}) f_1'^2 \beta_{\text{II}}^2} . \quad (76)$$

Для линз второго компонента

$$a_{\text{то}} = -s_{F'}'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{II}} (n'_{\text{v}} - n_{\text{v}}) \frac{4 \Delta N \lambda}{D_{\text{v}}^2} ;$$

$$\Delta N_{\text{vII}} = \frac{450 D_{\text{v}}^2 a_{\text{то. доп}}}{V \sqrt{p} \left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{II}} (n'_{\text{v}} - n_{\text{v}}) s_{F'}'^2} , \quad (77)$$

где  $\left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{I}}$  и  $\left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{II}}$  — соответственно для поверхностей линз первого и второго компонентов; обычно можно принять  $\left( \frac{h_{\text{v}}}{h_1} \right)_{\text{I, II}} \approx 1,0$ ;

$f_1'$  — фокусное расстояние первого компонента ( $f_1' \approx s_{F'I}'$ );

$\beta_{\text{II}}$  — линейное увеличение второго компонента;

$s_{F'}'$  — второе вершинное фокусное расстояние системы.

В этом случае допуск  $\Delta N$  получается более узким (на 30—40%) для поверхностей линз первого компонента и шире в 1,5—2 раза для поверхностей второго компонента, чем по формуле (73).

Если система образует изображение предмета, находящегося на конечном расстоянии, то в формулы следует подставлять расстояние от поверхности или компонента до изображения вместо  $f'$ ,  $f_1'$  и  $s_{F'}'$ .

**Примеры применения формул. 1.** Рассчитать допуски на отклонение от правильной сферы поверхностей оптических деталей бинокля с  $\Gamma = 6^\circ$ ; объектив имеет  $D = 30$  мм, призмы — световой диаметр 20 мм и линзы окуляра — 10 мм; для поверхностей объектива

$$\frac{h_1}{h_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} \approx 1;$$

$$\text{для призм} \quad \frac{h_4}{h_1} \approx \frac{h_5}{h_1} \approx 0,6$$

$$\text{и для линз окуляра} \quad \frac{h_6}{h_1} = \frac{h_7}{h_1} = 0,4 \quad (\text{рис. 6}).$$

Отклонениями от правильной сферы поверхностей склейки и сетки пренебрегаем. В бинокле имеется всего  $p=10$  поверхностей, граничащих с воздухом. Вследствие отклонения поверхностей от правильной сферы допускаем астигматизм со стороны глаза не более 0,1 дптр.

Решение.

По формуле (74) для объектива

$$\Delta N = \frac{0,450}{10} \cdot \frac{30^2 \cdot 0,1}{1 \cdot 0,5 \cdot 6^2} \approx 0,6;$$

для первой призмы

$$\Delta N = \frac{0,450}{10} \cdot \frac{20^2 \cdot 0,1}{0,5 \cdot 0,6 \cdot 6^2} \approx 0,5;$$

для второй  $\Delta N \approx 0,7$  (имеются в виду преломляющие поверхности призм);

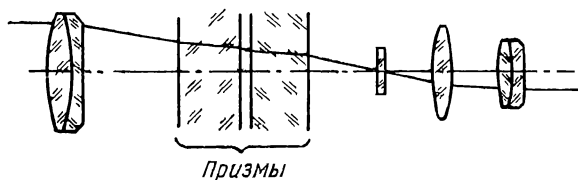


Рис. 6. Оптическая схема бинокля

для линз окуляра

$$\Delta N = \frac{0,450}{10} \cdot \frac{10^2 \cdot 0,1}{0,5 \cdot 6^2 \cdot 1/6} \approx 0,4.$$

2. Рассчитать допуски на отклонение поверхностей от правильной сферы для линз фотообъектива И50 с  $f' = 52,4$  мм; относительным отверстием 1:3,5; диаметром линз 16 мм.

Можно принять приближенно  $\frac{h_1}{h_1} = \frac{h_2}{1} = 1$ ;  $\frac{h_3}{h_1} = \frac{h_4}{h_1} = \frac{h_5}{h_1} = \frac{h_6}{h_1} = \frac{h_7}{h_1} = 0,7$ ; поверхностями склейки пренебрегаем (рис. 7).

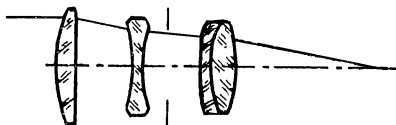


Рис. 7. Оптическая схема фотообъектива

Примем арифметическое сложение предельных отклонений поверхностей линз от правильной сферы, учитывая массовое производство объектива, при котором целесообразно совершенно исключить неблагоприятное сочетание отклонений от правильной сферы.

Допускаем астигматизм в  $0,01 \cdot 3,5 \approx 0,03$  мм. По формуле (73) для 1-й линзы

$$\Delta N = \frac{450 \cdot 16^2 \cdot 0,03}{6 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 52,4^2} = 0,4;$$

для 2, 3 и 4-й линз (кроме склеенных)

$$\Delta N = \frac{450 \cdot 14^2 \cdot 0,03}{6 \cdot 0,8 (0,53 \div 0,61) 52,4^2} = 0,3 \div 0,4.$$

Для склеенной поверхности 3-й линзы  $\Delta N = -$ , так как  $n_{ст} - n_{кл} = 0,02$ ; для склеенной поверхности 4-й линзы  $\Delta N > 2$ , так как  $n_{ст} - n_{кл} = 0,09$ .

3. Определить допуск  $\Delta N_2$  на отклонение поверхностей второго компонента телеобъектива «Телемар 7», если для первой поверхности  $\Delta N_1 = 0,5$  и  $h_{1к}/h_{2к} = 2$ ;  $D_{1к} = 140$ ;  $D_{2к} = 170$  (рис. 8).

Решение.

По формуле (75)

$$\Delta N_2 = 2 \cdot 1 \cdot (170/140)^2 \cdot 0,5 = 2 \cdot 1,47 \cdot 0,5 \approx 1,5,$$

т. е. допуск более широкий, чем на первую поверхность.

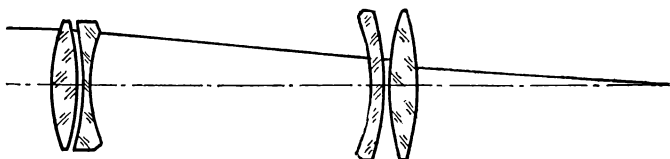


Рис. 8. Оптическая схема телеобъектива

4. Рассчитать допуски на отклонение поверхностей от правильной сферы склеенного бальзамином ( $n_D = 1,54$ ) объектива астрономической трубы:  $f' = 600$ ; относительное отверстие  $1:8$ ; одна деталь из стекла К8,  $n_D = 1,5163$ , другая деталь из стекла ТФ3,  $n_D = 1,7172$ , увеличение трубы  $50\times$ .

Решение.

Фокусное расстояние окуляра

$$f'_{ок} = \frac{f'_{об}}{\Gamma} = \frac{600}{50} = 12.$$

Можно считать, что астигматизм для точки на оси в  $0,1 - 0,2$  дптр еще не замечен при выходном зрачке  $\frac{600}{8 \cdot 50} = 1,5$  мм, т. е.

$$a_{то, доп} = \frac{\sigma_{ок} f'_{ок}}{1000} = \frac{(0,1 \div 0,2) 12^2}{1000} = 0,015 \div 0,03 \text{ мм.}$$

Этому соответствует и волновая абберация

$$l_m = \frac{114a}{n_{зн}^2} = \frac{114 \cdot 0,0144}{8^2} = 0,025;$$

$\lambda = 0,1 \div 0,2$  предела Релея, что вполне допустимо. Подставляя эти значения в формулы, получим  $\Delta N_1 = 0,1$ ;  $\Delta N_2 = -$ ;  $\Delta N_3 = 0,5$ ;  $\Delta N_4 = 0,07$ .

Допуски можно несколько расширить до  $\Delta N = 0,15 \div 0,2$ , если предположить несколько больший астигматизм или исключить сложение ошибок путем разворота линз при склейке или при сборке объектива.

## 21. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ПОДГОНКУ ПОД ПРОБНОЕ СТЕКЛО ЗЕРКАЛ И ПРИЗМ

Отражающие поверхности зеркал и призм обычно расположены под большими углами к оптической оси системы. Вследствие того, что такие поверхности часто не являются идеально плоскими, качество изображения точки предмета на оси оптической системы мо-

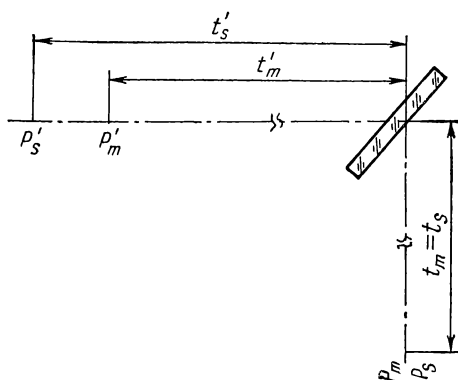


Рис. 9. К расчету допуска на отклонение от плоскостности отражающих поверхностей

жет быть заметно ухудшено астигматизмом  $a_{то}$ ; чтобы вычислить величину  $a_{то}$ , вносимого отражающими поверхностями, имеющими отклонения от плоскостности, и рассчитать допуски на подгонку под пробное стекло, можно пользоваться формулами Юнга-Аббе [12], которые при  $n' = -n = 1$  и  $i' = -i$  (отражение от сферического зеркала с наружным покрытием, рис. 9) упрощаются и принимают вид

$$\frac{1}{t'_m} + \frac{1}{t_m} = \frac{2}{r \cos i}; \quad \frac{1}{t'_s} + \frac{1}{t_s} = \frac{2 \cos i}{r}. \quad (78)$$

После небольших преобразований, приняв  $\frac{1}{r} = \frac{4N\lambda}{D^2}$ ;  $\lambda = 0,00055$ ;  $t_{1s} = t_{1m} = \infty$ ;  $n'_2 = n_2 = -n$  (рис. 10) и зная увеличение  $\Gamma$  телескопической системы или фокусное расстояние фотообъектива, перед которыми расположена отражающая поверхность, определим величину астигматизма в миллиметрах в фокальной плоскости фотообъектива или в диоптриях после телескопической системы (перед глазом) по формулам [5]: для фотообъективов

$$a_{то} = \frac{1}{227} \cdot \frac{nNf_{об}'^2}{D^2} \sin i \operatorname{tg} i; \quad (79)$$

для телескопических систем

$$a_{\text{то}} = \frac{1}{227} \cdot \frac{nN\Gamma^2}{D^2} \sin i \operatorname{tg} i. \quad (80)$$

Задавая допустимой величиной  $a_{\text{то. доп}}$  астигматизма для точки предмета на оси, решим обратную задачу — определим в этом

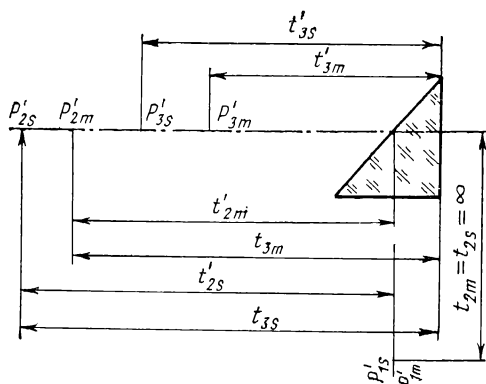


Рис. 10. К расчету допуска на отклонение от плоскостности отражающих поверхностей

случае допустимое число  $N$  колец отклонения отражающей поверхности от плоскостности:

$$N_{\text{доп}} = \frac{227D^2 a_{\text{то. доп}}}{nf_{\text{об}}'^2 \sin i \operatorname{tg} i} \quad (79a)$$

для отражающей поверхности, расположенной перед фотообъективом при бесконечно удаленном объекте. Аналогично для отражающей поверхности, расположенной перед телескопической системой, имеем

$$N_{\text{доп}} = \frac{0,227D^2 a_{\text{то. доп}}}{n\Gamma^2 \sin i \operatorname{tg} i}. \quad (80a)$$

В формуле (79a)  $a_{\text{то. доп}}$  выражается в миллиметрах и в формуле (80a) в диоптриях.

Для отражающих поверхностей, расположенных за объективом на расстоянии  $l$  от фокальной плоскости или от плоскости изображения, допуск на подгонку под пробное стекло, очевидно, должен быть расширен в  $(f_{\text{об}}'/l)^2$  раз. Таким образом, для расчета допуска на отклонение от плоскостности отражающей поверхности, расположенной на расстоянии  $l$  от плоскости изображения, следует в формулу (79a) вместо  $f_{\text{об}}'^2$  подставить  $l^2$  и в формулу (80a) вме-

сто  $\Gamma^2$  подставить  $(l/f'_{ок})^2$ , выбирая соответствующую величину  $a_{то. доп.}$ .

В табл. 5 приведены коэффициенты для расчета допуска на подгонку под пробное стекло некоторых отражающих поверхностей.

Т а б л и ц а 5

**Коэффициенты для расчета допусков на подгонку под пробное стекло поверхностей зеркал и призм**

Наименование детали и поверхности	Коэффициенты	
	$k_1$	$k_2$
<i>Зеркало (под углом 45° к оси)</i>		
Наружная отражающая поверхность . . . . .	321	0,321
Задняя отражающая поверхность . . . . .	168	0,168
Преломляющая поверхность зеркала с заднесторонним отражающим слоем . . . . .	350	0,350
<i>Прямоугольная призма с одной отражающей поверхностью</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	208	0,208
Поверхность крыши . . . . .	70	0,070
<i>Прямоугольная призма с двумя отражающими поверхностями</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	147	0,147
Поверхность крыши . . . . .	70	0,070
<i>Призма Дове</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	30	0,030
Преломляющая поверхность . . . . .	495	0,495
<i>Пента-призма</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	660	0,66
Поверхность крыши . . . . .	118	0,118

Окончательно формулы для расчета допусков на подгонку под пробное стекло отражающих поверхностей, указанных в табл. 5, имеют вид (зеркало или призма расположены перед оптической системой):  
для фотообъектива

$$N_{доп} = k_1 \frac{D^2 a_{то. доп}}{f'_{об}{}^2}; \quad k_1 = \frac{227}{n \sin i \operatorname{tg} i};$$

для телескопической системы

$$N_{доп} = k_2 \frac{D^2 a_{то. доп}}{\Gamma^2}; \quad k_2 = \frac{0,227}{n \sin i \operatorname{tg} i}.$$

Можно рекомендовать следующие величины допустимого астигматизма для изображения точки предмета, находящейся на оптической оси системы: для фотообъективов  $a_{\text{то. доп}} \leq (0,01 \div 0,02) f'_{\text{об}}/D_{\text{вх. зр.}}$ , чему соответствует кружок рассеяния не более  $0,01 - 0,02$  мм, и для телескопических систем  $a_{\text{то. доп}} \leq (0,1 \div 0,2) f'_{\text{ок}}/1000$ . Вследствие отклонения от плоскостности поверхностей зеркал и призм в последнем случае допускается астигматизм со стороны глаза в  $0,1 - 0,2$  дптр (при выходном зрачке диаметром  $4 - 5$  мм). Если в системе имеется всего  $p$  поверхностей (отражающих и наклонных преломляющих), то, принимая квадратичное сложение предельных отклонений, на долю одной поверхности можно взять астигматизм в  $\sqrt{p}$  раз меньший. Не чувствительные к образованию астигматизма поверхности можно не учитывать при суммировании поверхностей, и их число не должно входить в число  $p$ . Для системы отражающих поверхностей, чувствительных к появлению астигматизма, следует принимать арифметическое сложение предельных отклонений от плоскостности, так как при весьма узких допусках имеют место обычно предельные отклонения одного знака («завал» на краю). Это также справедливо и для обычных поверхностей, если оптический цех большее число поверхностей полирует с предельными отклонениями.

Так как на одно и то же зеркало падают лучи под разными углами (а не только под углами  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  или  $60^\circ$ ), особенно в широкоугольных системах, то недопустимые погрешности изготовления отражающей поверхности могут привести к заметному ухудшению изображения в первую очередь тех участков поля, которые получены лучами, падающими на отражающую поверхность под большими углами. Расчет допусков на подгонку под пробное стекло с учетом только астигматизма для точки предмета на оптической оси дает вполне удовлетворительные результаты и для края поля, если иметь в виду, что для края поля возможно допустить несколько больший астигматизм. При необходимости можно учесть и наибольший угол падения главного луча, соответствующий краю поля, пользуясь непосредственно формулами (79а) и (80а).

Если принять за единицу допуск  $N_0$  на изготовление поверхности зеркала с наружным отражающим слоем, расположенного под углом  $45^\circ$  к оптической оси, то допустимые  $N$  погрешности изготовления некоторых поверхностей при всех прочих равных условиях можно выразить числами, приведенными ниже.

#### Относительная точность поверхностей

	$N/N_0$
1. Наружная отражающая поверхность зеркала . . .	1
Заднесторонняя отражающая поверхность зеркала . . .	0,52
Преломляющая поверхность зеркал с заднесторонним отражением . . . . .	1,09
2. Прямоугольная призма с одной отражающей поверхностью . . . . .	0,65
Поверхность крыши прямоугольной призмы . . .	0,22
3. Поверхность призмы с двумя отражающими поверхностями . . . . .	0,46
4. Отражающая поверхность призмы Довэ . . . .	0,09
Преломляющая поверхность призмы Довэ . . . .	1,54
5. Отражающая поверхность пента-призмы . . . .	2,05
Поверхность крыши пента-призмы . . . . .	0,37

Таким образом, следует по возможности избегать применения отражающих поверхностей, наклоненных под большими углами к оптической оси, или целесообразно располагать их ближе к фокальной плоскости. Следует технологически исключать появление отклонений от плоскостности, при которых интерференционные кольца вытянуты вдоль короткой стороны; необходимо обеспечить получение поверхностей, у которых при наложении пробного стекла кольца вытянуты вдоль длинной стороны. Отражающая поверхность призмы требует более точного изготовления, чем наружная поверхность зеркала. В сложных съемных перископических насадках может оказаться, что расчет допусков на подгонку под пробное стекло более правильно производить с учетом допустимого параллакса. Если в системе или детали имеется несколько отражающих или преломляющих поверхностей, то целесообразно для компенсации влияния отклонений отдельных поверхностей не допускать однозначных отклонений от плоскостности этих поверхностей.

При расчете допусков на отражающие поверхности зеркал и призм нужно учитывать характер поверхности, ее размеры, положение в оптической системе, назначение и характеристики последней. Только в этом случае будет правильно рассчитан допуск, а в зависимости от него выбраны толщина и марка стекла, которые не повлекут за собой затруднений при изготовлении детали; при этом выясняется назначение этой поверхности в оптической системе и обеспечивается высокое качество изображения.

## 22. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОТКЛОНЕНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ПРАВИЛЬНОЙ СФЕРЫ

Отклонение отражающих поверхностей от плоскостности в виде даже правильной сферы вызывает появление астигматизма для точки предмета на оптической оси. Отклонение от правильной сферы (астигматичность поверхностей) также вносит астигматизм для точки предмета на оси. Последний в зависимости от характера отклонений может либо компенсироваться, либо складываться с первым.

При отражении лучей от сферического зеркала с наружным покрытием из формулы Юнга — Аббе [12] при  $t_m = t_s = \infty$  получим

$$t'_m = \frac{r \cos i}{2}; \quad t'_s = \frac{r}{2 \cos i}.$$

В фокальной плоскости объектива

$$x'_s = \frac{f_{06}'^2 n N \cos i}{227 D^2};$$

$$x'_m = \frac{f_{06}'^2 n N}{227 D^2 \cos i};$$

$$N_{s \text{ доп}} = \frac{227 D^2}{f_{06}'^2 n \cos i} x'_{s \text{ доп}};$$



$$N_{m \text{ доп}} = \frac{227D^2 \cos i}{f_{об}^2 n} x'_{m \text{ доп}}.$$

Отсюда при  $x'_m = x'_s$ ;  $N_m < N_s$ ; при  $N_m = N_s$  (круглые кольца,  $r_m = r_s$ ) всегда  $t'_m < t'_s$  и, следовательно,  $x'_m > x'_s$ . Для того чтобы астигматизм вследствие отклонения отражающей поверхности от плоскостности отсутствовал, необходимо обеспечить равенства

$$t'_m = t'_s; \quad \frac{r_m \cos i}{2} = \frac{r_s}{2 \cos i}; \quad \frac{r_s}{r_m} = \cos^2 i;$$

отсюда

$$\frac{N_m}{N_s} = \cos^2 i; \quad (81)$$

$$\Delta N = N_s - N_m = N_s (1 - \cos^2 i); \quad (82)$$

$$\Delta N = N_s \sin^2 i.$$

Формула (81) показывает соотношение числа колец в двух взаимно перпендикулярных сечениях поверхности, при котором астигматизм вследствие отклонения поверхности от плоскостности отсутствует:

$$N_m = N_s \cos^2 i = k_0 N_s; \quad k_0 = \frac{N_m}{N_s} = \cos^2 i. \quad (81a)$$

Значения коэффициента  $k_0$  для некоторых типов поверхностей приведены в табл. 6. Числа колец отнесены к одному и тому же диаметру  $D$  детали в двух взаимно перпендикулярных сечениях поверхности.

Из формулы (81) и табл. 6 следует, что более благоприятны отклонения от плоскостности, при которых интерференционные кольца вытянуты вдоль длинной стороны отражающей поверхности, т. е. вдоль нее меньше колец, чем в направлении короткой стороны для одного и того же диаметра поверхности или пробного стекла. Соотношения (коэффициент  $k_0$ ) табл. 6 следует указывать в чертежах на соответствующих отражающих поверхностях.

Так как при  $r_m = r_s$ ;  $t'_m > t'_s$ ;  $x'_m > x'_s$ , то при  $N_s = 0$  число полос в меридиональной плоскости  $N_m$  меньше, чем число полос  $N_s$  в сагиттальной плоскости при  $N_m = 0$  при том же допустимом астигматизме для точки предмета на оси. Поэтому допустимое искривление колец  $\Delta N$  следует подсчитывать при  $r_s = \infty$ ,  $N_s = 0$  (как более неблагоприятном) исходя из допустимого астигматизма для точки предмета на оптической оси независимо (или в зависимости) от расчета допуска  $N_{\text{доп}}$  на отклонение от плоскостности:

$$\Delta N_{\text{доп}} = N_{m \text{ доп}} = \frac{227D^2 \cos i}{n f'^2} a_{\text{то, доп}} = k N_{\text{доп}};$$

$$k = \frac{\Delta N_{\text{доп}}}{N_{\text{доп}}} = \sin^2 i. \quad (83)$$

При этом увеличивается вероятность использования полностью допускаемой величины астигматизма. Величины  $\Delta N$ , пропорциональ-

Таблица 6

Значения коэффициентов  $k_0$  и  $k$  для различных поверхностей

Наименование детали и поверхности	$k_0 = \frac{N_m}{N_s} = \cos^2 i$	$k = \frac{\Delta N_{\text{доп}}}{N_{\text{доп}}} = \sin^2 i$
<i>Зеркало, расположенное под углом 45° к оси</i>		
Наружная окружающая поверхность . . .	0,5	0,5
Заднесторонняя отражающая поверхность	0,85	0,22
Преломляющая поверхность зеркала с задним отражением . . . . .	0,35	0,36
<i>Прямоугольная призма с одной отражающей поверхностью</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	0,5	0,5
Поверхность крыши . . . . .	0,25	0,75
<i>Прямоугольная призма с двумя отражающими поверхностями</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	0,5	0,22
Поверхность крыши . . . . .	0,25	0,75
<i>Призма Дове</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	0,056	0,86
Преломляющая поверхность . . . . .	0,50	0,50
<i>Пента-призма</i>		
Отражающая поверхность . . . . .	0,86	0,15
Поверхность крыши . . . . .	0,42	0,6

ные коэффициенту  $k$ , подсчитанные при этих условиях, приведены также в табл. 6.

Если при  $N_s=0$   $N_m=kN_{\text{доп}}$ , то еще можно разрешить отклонение  $N_s$  и в сагиттальной плоскости, которое благоприятно до соотношения  $N_m=N_s \cos^2 i$  и еще сверх допустимо  $\Delta N_m=kN_{\text{доп}}$  или  $\Delta N_m$  больше, чем  $\Delta N_s$  в  $\cos^2 i$  число раз. Дальнейшее увеличение числа колец ограничено расфокусировкой изображения в фотоаппарате или параллаксом в телескопических системах.

Для отклонений разного знака (седло) допуск на отклонение от плоскостности оказывается более узким, так как в этом случае величины  $t'_m$  и  $t'_s$  имеют разные знаки и астигматическая разность быстро возрастает. Поэтому отклонения поверхности седлообразной формы не следует допускать, так как незначительная погрешность, но разного знака по двум взаимно перпендикулярным направлениям поверхности вызывает недопустимое ухудшение качества изображения.

Величины допустимого астигматизма для изображения точки предмета на оси  $a_{\text{то. доп}}$  вследствие отклонения отражающих по-

верхностей от правильной сферы рекомендуются такие же, как и за счет отклонения этих поверхностей от плоскостности.

На рис. 11 приведены элементы чертежа призмы АР-90° (из стекла К8 по ГОСТ 3514—67), расположенной за объективом зри-

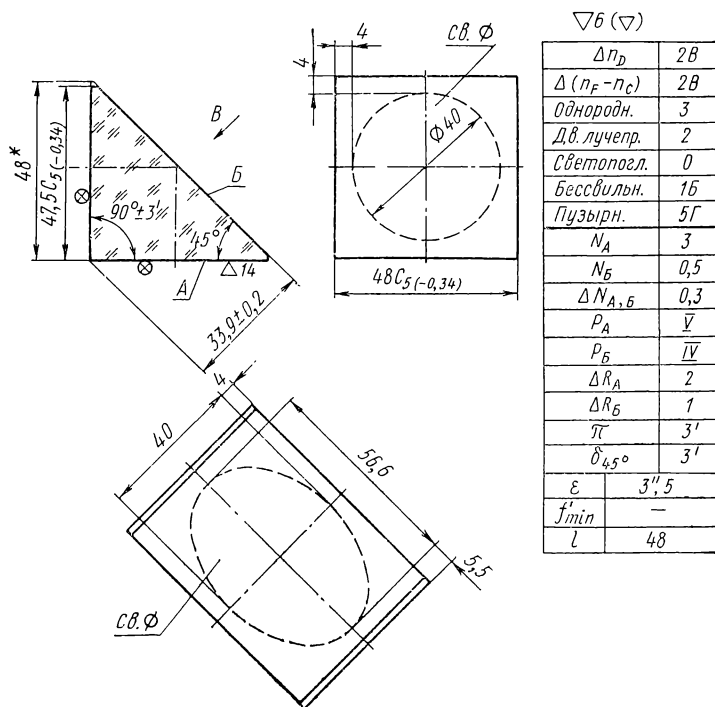


Рис. 11. Элементы чертежа призмы АР-90, расположенной за объективом (вблизи от него) зрительной трубы

тельной трубы (вблизи от него); в примечании на чертеже указывают:

1.  $\otimes_A$  — просветл. 24 И по ТУ...  $\lambda = 520 \pm 30$  нм. 2. Фаски на ребрах  $0,3 \pm 0,4 \times 45^\circ$ , фаски на углах  $1 \pm 0,5 \times 45^\circ$ . 3. Покрытие матовых поверхностей Эм... ТУ... Материал: стекло К8 ГОСТ 3514—67.

### 23. О ДОПУСКАХ НА АСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Уравнение асферической поверхности чаще всего представляют в виде  $y^2 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ . . . , тогда как уравнение окружности  $y^2 = 2r_0x - x^2$ . Как известно, радиус кривизны и кривизна в любой точке окружности одинаковы и определяются радиусом кривизны в ее вершине; для асферической поверхности радиус и кривизна в

различных точках неодинаковы. Поэтому при изменении кривизны в вершине сферической поверхности также изменяется кривизна и в других точках сферической поверхности; при изменении кривизны в вершине асферической поверхности кривизна в других ее точках может измениться иначе. Отступление от сферы в различных точках асферической поверхности различно, оно обычно больше к краям детали и определяется в основном членами уравнения, содержащими высокие степени переменного  $x$ . В общем случае каждый член уравнения оказывает существенное влияние на отступление от сферы в определенной части поверхности.

Числа  $N_{\text{доп}}$  и  $\Delta N_{\text{доп}}$ , подсчитанные для сферических поверхностей по обычным формулам теории аберрации, например, с учетом хотя бы только сферической аберрации (39) для асферических поверхностей, можно выражать в виде отступлений координат  $x$  и  $y$ , изменения коэффициентов уравнения, радиуса кривизны в отдельных точках или в среднем для всей поверхности или в виде отклонения нормали в этих же точках поверхности от расчетного ее положения. Последний способ выражения, по-видимому, более универсален, так как его можно применять как для сферических, так и для асферических поверхностей: допустимое отклонение нормали  $\Delta\alpha''_{\text{доп}}$  определяют по найденному  $N_{\text{доп}}$  или  $\Delta N_{\text{доп}}$  по формуле

$$\Delta\alpha''_{\text{доп}} = \frac{0,00027N_{\text{доп}}}{D} 206\,265 = \frac{55N_{\text{доп}}}{D}$$

или

$$\Delta\alpha''_{\text{доп}} = \frac{0,00027\Delta N_{\text{доп}}}{D} 206\,264 = \frac{55\Delta N_{\text{доп}}}{D}.$$

где  $D$  — диаметр, на котором наблюдают  $N$  или  $\Delta N$ . Однако допуск  $\Delta\alpha''$  (а по нему при необходимости и допуски  $N_{\text{доп}}$ ,  $\Delta N_{\text{доп}}$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) проще, без сложных вычислений, можно определять исходя из разрешающей способности данного компонента системы. Например, для поверхностей объектива зрительной трубы, граничащих с воздухом; допуск на отклонение нормалей (сферической или асферической поверхности) можно определить так: например,  $f' = 500$ ;  $1:10$ ;  $\varphi'' = \frac{120''}{50} \approx 2'',5$ ; отклонение нормалей от расчетного

положения не должно вызывать отклонения хода лучей более чем на  $1/3 - 1/5$  предела разрешения, т. е.  $\Delta\varphi''_{\text{доп}} = 0'',5$ ; откуда для линзы из стекла К8 при  $n_D = 1,5163$   $\Delta\alpha''_{\text{доп}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{доп}}}{1,5163 - 1} = 1''$ ; для линзы из стекла ТФ1 при  $n_D = 1,6475$   $\Delta\alpha''_{\text{доп}} = \frac{0'',5}{1,6475 - 1} = 0,77''$ .

Если бы в конструкции объектива имелась еще фокусирующая линза из стекла К8, находящаяся, например, на таком расстоянии от сетки, при котором диаметр рабочего сечения пучка составлял 20 мм, то мы получили бы следующие значения:  $\varphi'' = \frac{120''}{20} = 6''$  и  $\Delta\alpha_{\text{доп}} = \frac{6''}{5 \cdot 0,5163} = 2'',2$ .

Для сферических зеркал зеркальных объективов  $\Delta\alpha'' = \frac{\Delta\varphi''_{\text{доп}}}{n' - n} = \frac{\Delta\varphi''_{\text{доп}}}{2}$  — допуск поэтому более узкий, чем на преломляющие поверхности.

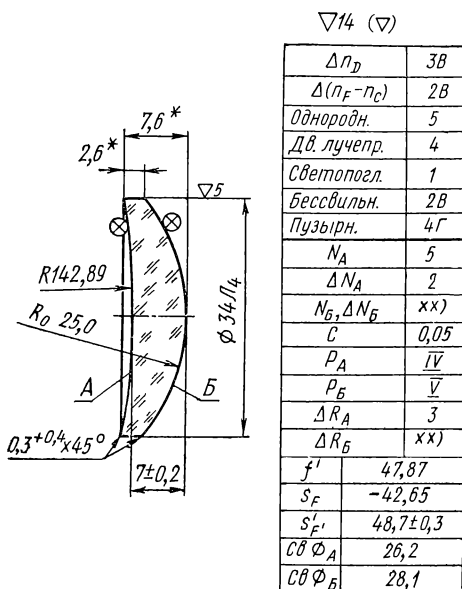


Рис. 12. Элементы чертежа последней асферической линзы конденсора

Например, для главного зеркала диаметром  $D=1000$  мм зеркального объектива телескопа  $\Delta\alpha_{\text{доп}} = \frac{120''}{5 \cdot 1000 \cdot 2} = 0'',0012$ .

При контроле  $\Delta N$  на поверхности диаметром 250 мм получим  $\Delta N_{\text{доп}} = \frac{250 \cdot 0'',0012}{206265 \cdot 0,00027} = 0,006$ ;

при контроле поверхности диаметром 1000 мм имеем  $\Delta N =$

$$= \left( \frac{1000}{250} \right)^2 \cdot 0,006 = 0,1 \text{ — очень узкий допуск.}$$

Для фотообъектива с  $f'=100$ , относительным отверстием 1:2 и  $R = 100$  линий/мм,  $n = 1,5163$

$$\Delta\alpha_{\text{доп}} = \frac{1 \cdot 206\,265}{100 \cdot 100 \cdot 5 \cdot 0,5163} \approx 8'';$$

при восьми поверхностях можно принять  $\Delta\alpha_{\text{доп}}=3\div 4''$ .

Если считать, что для асферической поверхности объектива изготавливаются точно, то для асферической поверхности можно принять  $\Delta\alpha_{\text{доп}}=6\div 10''$ , для более длиннофокусных систем допуск следует принять более узким, обратно пропорциональным фокусному расстоянию. Для объективов различных приемных устройств предел разрешения следует определять исходя из допустимого кружка рассеяния. Например, при  $f'=100$ ; относительном отверстии 1:2 и кружке рассеяния 0,1 мм  $\Delta\varphi''_{\text{доп}} = \frac{0,1 \cdot 206\,265}{5 \cdot 100} = 40''$  и  $\Delta\alpha_{\text{доп}} = 1\div 1,5$  при небольшом числе поверхностей. Для линз конденсоров допуски могут быть еще грубее.

На рис. 12 показаны элементы чертежа асферической линзы конденсора (из стекла ЛК5, ГОСТ 3514—67). В примечании на чертеже указывают: 1.  $\otimes_{\Delta}$  Просветл. 44Р, 43Р по ТУ...,  $\lambda=560\pm 20$  нм,  $\otimes_{\lambda}$  Просветл. 43Р по ТУ...,  $\lambda=560\pm 30$  нм. 2. Покрытие матовых поверхностей Эм.... ТУ.... 3. Асферическая поверхность Б: уравнение образующей:  $y^2 = 2px = 50x$ . Технологический класс Кл-Н1; асферичность  $\Delta=0,46$ ; кружок наименьшего рассеяния  $d_k < 0,08$  мм; погрешность параметра  $\Delta p = \pm 0,1\%$ , местные ошибки  $\alpha < 5'$ . 4.\* Размер для справок.

## 24. ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Допуски на чистоту поверхностей оптических деталей телескопических и других оптических систем оговорены в ГОСТ 11141—65 «Чистота поверхностей оптических деталей». В приложении к ГОСТу даны указания по выбору классов чистоты поверхностей деталей телескопических и других оптических систем, которыми и следует пользоваться.

Для визуальных оптических приборов, например для зрительных труб и микроскопов, классы чистоты оптических деталей назначают исходя из диаметра рабочего отверстия их поверхностей, если для выбора классов нет других оснований. Под рабочим отверстием понимается участок поверхности оптической детали, покрываемый входящим в систему осевым пучком лучей, которые при выходе из окуляра образуют параллельный пучок с диаметром 2 мм или равным диаметру зрачка выхода системы, если последний меньше 2 мм (рис. 13).

Диаметр рабочего отверстия поверхности вычисляют по формулам

$$D_n = \frac{4h_n}{D_{p'}} \text{ при } D_{p'} > 2 \text{ мм}$$

и

$$D_n = 2h_n \text{ при } D_{p'} \leq 2 \text{ мм},$$

где  $D_n$  — диаметр рабочего отверстия  $n$ -й поверхности системы;  $h_n$  — высота крайнего луча осевого пучка на той же поверхности (определяют при расчете оптической системы);  $D_p'$  — диаметр зрачка выхода оптической системы.

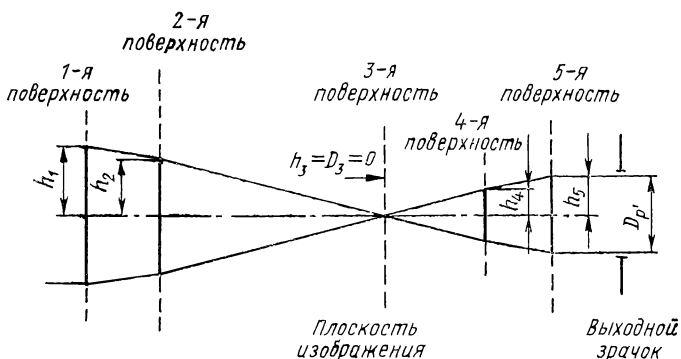


Рис. 13. К выбору классов чистоты в телескопических системах

По вычисленному диаметру рабочего отверстия класс чистоты выбирают по табл. 7.

Таблица 7

Выбор классов чистоты

Диаметр рабочего отверстия в мм	Класс чистоты	Основная область применения
0	PI—10 PII—20 PI—40	Поверхности деталей, расположенные в плоскостях изображения систем
До 0,5 св. 0,5 до 1,5 » 1,5 » 4,5 » 4,5 » 10 » 10 » 25 » 25 » 50 » 50	PI PII PIII PIV PV PVI PVII	Поверхности деталей, удаленные от плоскостей изображения системы

## 25. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА УГЛЫ ПРИЗМ

Отражательные призмы служат в основном для изменения направления линии визирования и для изменения вида изображения — полного или неполного (зеркального) его обращения. Призма и

система призм в оптической системе располагаются впереди объектива или за объективом — перед сеткой и за сеткой перед окуляром.

Погрешностями изготовления призмы являются: 1) погрешности габаритных размеров; 2) изготовления углов; 3) изготовления плоскостей (отклонения от плоскостности и от сферы).

Погрешности габаритных размеров ведут к срезанию поля изображения и виньетированию, к укорочению и удлинению хода луча в призме. Последнее может вызвать несовмещение в зрительной трубе сетки с фокальной плоскостью объектива (если призма расположена между объективом и сеткой). Величины допустимых отклонений габаритных размеров достаточно велики и легко определяются в каждом конкретном случае. Аналогичное действие вызывает замена марки стекла призмы. Отклонение показателя преломления в пределах категорий оптического стекла данной марки не оказывает влияния на качество изображения, смещение фокальной плоскости, величину поля зрения и виньетирование. Поэтому в простых прицелах и перископах (с небольшим увеличением — менее  $4\times$ ) отклонение показателя преломления и дисперсии не следует нормировать. Для призм высококачественных зрительных труб, в которых действие призм учтено при расчете, применяют стекло с отклонением показателя преломления и дисперсии не ниже 3—4-й категории. Неоднородность и натяжения стекла сильно снижают разрешающую способность прибора. Светопоглощение уменьшает пропускание прибора, особенно при значительном ходе лучей в призме. Однако с целью удешевления для призм в приборах с небольшим увеличением или работающих без увеличения, а также расположенных близко от плоскости изображения можно использовать стекло по однородности 4—5-й категории, по натяжениям 3—4-й категории и светопоглощению 1—3-й категории. Для призм зрительных труб должно применяться стекло 2—3-й категории по отклонениям показателя преломления, дисперсии, однородности, натяжениям и 1—2-й категории по светопоглощению. Эти категории сравнительно легко выдерживаются для марок стекла К8, БК6, БК10 и К19, применяемых в основном для изготовления призм.

Погрешности в расположении призм приводят к смещению изображения с оптической оси, вызывая непараллельность осей труб бинокулярных приборов, или к наклону и двоению изображения.

Светоразделительные призмы, склеиваемые из двух призм, приходится иногда изготавливать из стекла одной плавки и отжига, так как в противном случае сложная призма — куб становится эквивалентной идеальной призме — куб (плоскопараллельной пластинке) и клину, преломляющий угол которого зависит от разности показателей преломления составляющих призм (например, при  $\Delta n = 0,0020$  угол эквивалентного клина  $5'$ ).

**Допуски на углы призм.** При отклонениях в углах призма перестает быть эквивалентной зеркалу и плоскопараллельной пластинке, а становится эквивалентной зеркалу и клину, появляются кома и астигматизм. Однако большее значение имеют отклонения линии визирования от расчетного направления и окрашивание изображения. Рассмотрим призмы, сконструированные правильно, т. е. такие, в которых луч падает на переднюю грань и выходит из последней грани под теми же самыми углами (обычно по нормали). Тогда угол между нормалью к входной и выходной граням и будет в данной призме равен углу поворота оптической оси (падающего луча) в призме без ошибок ее углов. Условимся считать угол пово-



рота положительным, если для совмещения нормали к входной грани с нормалью к выходной первую надо вращать по часовой стрелке. При рассмотрении любой призмы можно легко определить ее углы, от которых зависит угол между нормальями к входной и выходной граням, и положение оптической оси. Однако при наличии ошибок углов призмы оптическая ось (линия визирования) встречает выходную грань не по нормали к ней, а под некоторым углом, величина которого зависит от конструкции и величины ошибок углов призмы. Угол падения осевого луча на выходную грань легко найти с помощью развертки призмы; он и определяет угол клина, эквивалентного призме с ошибками ее углов, который и вызывает

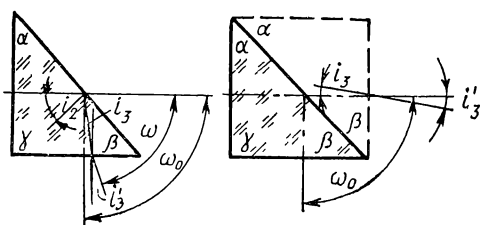


Рис. 14. Призма AP-90 и ее развертка

окрашивание изображения. Угол преломления в воздухе, сложенный с углом отклонения нормали от правильного положения, представляет собой угол отклонения вышедшего из призмы луча от правильного его направления. Рассмотрим вначале призму, входная и выходная поверхности которых перпендикулярны оптической оси.

**Прямоугольная призма с одной отражающей гранью (AP-90°).** Отклонение луча в призме при отсутствии ошибок углов призмы равно углу между преломляющими гранями  $\omega = \gamma$ . Этим же углом определяется и положение нормалей к входной и выходной граням. Отклонение угла между нормальями к входной и выходной граням при наличии ошибок углов призмы равно отклонению угла  $\gamma$  от расчетной величины ( $90^\circ$ ), т. е.  $\Delta\omega = \Delta\gamma$ , а угол падения на выходную грань  $i_3 = -(\alpha - \beta) = -(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  (рис. 14). Так как углы малы, то в воздухе  $i'_3 = ni_3 = -n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ . Если бы не было ошибки прямого угла  $\gamma$ , то угол  $i_3$  и определил бы собой отклонение луча от его правильного направления; так как нормаль к выходной грани расположена под углом  $\gamma$ , отличным от  $90^\circ$  на  $\Delta\gamma$ , то отклонение луча от его направления в призме без ошибок углов составит

$$\Delta\omega = \Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta). \quad (84)$$

При той же разности  $\Delta\alpha - \Delta\beta$  острых углов отклонение луча  $\Delta\omega$  достигнет наибольшей величины тогда, когда знак  $\Delta\gamma$  противоположен разности углов.

Следует сразу же обратить внимание на разницу в действии ошибок углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Разность углов  $\alpha$  и  $\beta$  дает угол падения луча на выходную грань — угол клина, эквивалентного призме с ошибками углов  $\alpha$  и  $\beta$ , который может характеризовать хроматическое

действие, так как угол луча с выходной гранью после преломления  $i'_3 = -n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  зависит от показателя преломления стекла. Ошибка  $\Delta\gamma$  показывает величину отклонения линии визирования (луча), если ошибки острых углов отсутствуют или разность острых углов равна нулю. Следовательно, если рассчитать допустимую разность острых углов призмы исходя из допустимого хроматизма, а отклонение  $\Delta\gamma$  прямого угла исходя из допустимого отклонения линии визирования, имея в виду, что  $\Delta\gamma = -(\Delta\alpha + \Delta\beta)$ , то можно определить допуски на все углы призмы.

Если входная грань не перпендикулярна оптической оси, то вышедший из призмы луч составит угол  $i'_3$  с первоначальным направлением:

$$i'_3 = -\frac{i_1}{n} - (\Delta\alpha - \Delta\beta) = -\left[\frac{i_1}{n} + (\Delta\alpha - \Delta\beta)\right],$$

где  $i_1$  — угол падения на входную грань,  $i_3$  — угол падения на выходную грань. Угол луча в воздухе с нормалью к выходной грани

$$i'_3 = -[i_1 + n(\Delta\alpha - \Delta\beta)].$$

Если прямой угол имеет ошибку  $\Delta\gamma$ , то вышедший луч составит угол

$$i'_3 = \Delta\gamma - [i_1 + n(\Delta\alpha - \Delta\beta)]$$

с его направлением в призме без ошибок углов призмы. Формула справедлива, если луч падает по нормали к входной грани призмы. Очевидно, угол между лучами вышедшим и вошедшим, как отклонение от угла  $90^\circ$ ,  $\Delta\omega = \Delta\gamma - (i_1 + i_1) - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ . Приравняв это выражение нулю, получим, что лучи вошедший и вышедший перпендикулярны друг другу. Определим, таким образом, угол луча с нормалью к входной грани, при котором луч выйдет (из призмы с ошибками углов) перпендикулярно своему первоначальному направлению, т. е. определим угол поворота призмы при ее юстировке, чтобы расчетное направление линии визирования сохранилось

$$i_1 = \frac{\Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)}{2}. \quad (85)$$

Все это справедливо как для призмы, расположенной перед объективом, так и для призмы, расположенной за объективом зрительной трубы. Например, определим допуски на углы призмы, расположенной перед объективом зрительной трубы с увеличением  $\Gamma = 30\times$ . Для наглядности произведем развертку призмы. Из развертки следует, что отклонение от прямого угла между нормальями к входной и выходной граням призмы

$$\omega_0 = \gamma; \quad \Delta\omega_0 = \Delta\gamma.$$

Угол клина развертки призмы равен  $\theta = \Delta\alpha - \Delta\beta$ , так как  $\theta = \alpha - \beta$ .

Отклонение линии визирования от ее правильного направления  $\Delta\omega = \Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ .

Хроматизм в угловой мере, вызываемый ошибками углов призмы,

$$\Delta\omega_{FC} = (n_F - n_C) (\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{(n-1) (\Delta\alpha - \Delta\beta)}{\nu}. \quad (86)$$

Если принять, что глаз не замечает окрашивания, в угловой мере равного не более  $2'$ , то для призмы из стекла К8 получим

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{2'\nu}{(n-1)\Gamma}; \quad (\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{2' \cdot 64,1}{0,5 \cdot 30} = 8',5.$$

Для высококачественных труб этот допуск следует уменьшить в 2 раза, если нежелательно допустить хроматизм более  $1'$ . Если число призм в системе  $m$ , то допуск на разность углов должен быть уменьшен в  $\sqrt{m}$  раз. Допуск  $\Delta\gamma$  на угол  $90^\circ$  можно определить исходя из допустимого поворота  $i_1$  призмы при юстировке для получения правильного положения визирной линии. Если принять

$$i_{1\text{доп}} = 10' \leq \frac{\Delta\gamma - n (\Delta\alpha - \Delta\beta)}{2},$$

то  $\Delta\gamma \leq 2i_{1\text{доп}} + n(\Delta\alpha - \Delta\beta) = 2 \cdot 10' + 1,5163 \cdot 8',5 = 32',8$ , т. е. допуск сравнительно широкий. Можно ограничиться легко выполнимым допуском  $\Delta\gamma \leq 10'$ .

Если призма находится за объективом на расстоянии  $l$  от фокальной плоскости, то допуски на углы призмы можно рассчитать, задаваясь допустимым смещением визирной линии относительно центра сетки или допустимым поворотом призмы при ее юстировке, а допуск на разность углов  $45^\circ$  установить исходя из допустимого окрашивания. Например, если для зрительной трубы с  $f'_{\text{ок}} = 15$  мм допустить, что глаз еще не замечает окрашивания, равного  $1'$ , то допуск на разность углов определится так: в линейной мере (в миллиметрах) в фокальной плоскости объектива

$$\Delta L'_{FC} = l \frac{\Delta\omega_{FC}}{3438} = l \frac{(n-1) (\Delta\alpha - \Delta\beta)}{3438\nu},$$

а в угловой мере со стороны глаза

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{\Delta L'_{FC} \cdot 3438}{f'_{\text{ок}}} < 1',$$

отсюда

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) \leq \frac{1'\nu f'_{\text{ок}}}{(n-1)l}.$$

Для  $l = 100$  мм;  $f'_{\text{ок}} = 15$  мм;  $\nu = 64,1$ ;  $n-1 = 0,5163$ ;

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) < \frac{1' \cdot 64,1 \cdot 15}{100 \cdot 0,5163} \approx 18'$$

допуск широкий, легко выполним. Допуская поворот призмы в  $10'$  при ее юстировке, можно, как показано выше, определить допуск на прямой угол. До сих пор при расчете допусков на углы призмы полагали, что ошибка  $\pi$  пирамидальности призмы отсутствует.

Пирамидальность призмы, т. е. непараллельность в угловой мере преломляющего ребра и гипотенузной грани, вызывает отклонение линии визирования в плоскости, нормальной к главному сечению, на угол

$$\omega_{\tau} = 2n \cos \alpha \Delta\gamma_{\pi} \quad (87)$$

и окрашивание

$$\omega_{FC\pi} = \frac{2\Delta\gamma_{\pi} \cos \alpha (n - 1)}{v}. \quad (88)$$

Общее отклонение оптической оси вследствие ошибок углов и пирамидальности призмы

$$\Delta\omega'_0 = \sqrt{\Delta\omega^2 + \Delta\omega_{\pi}^2}$$

и окрашивание

$$\overline{\Delta\omega}_{FC} = \sqrt{\Delta\omega_{FC}^2 + \Delta\omega_{FC\pi}^2},$$

так как пирамидальность и разность углов вызывают отклонение линии визирования и окрашивание в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Поэтому, принимая действия этих ошибок равными друг другу, на долю каждой ошибки следует оставить лишь часть допустимого отклонения линии визирования или окрашивания. При квадратичном сложении ошибок будем иметь

$$\Delta\omega_{\pi} = \Delta\omega = \sqrt{\frac{\Delta\omega_{\text{доп}}}{2}};$$

$$\Delta\omega_{FC\pi} = \Delta\omega_{FC} = \sqrt{\frac{\Delta\omega_{FC\text{доп}}}{2}}.$$

**Прямоугольная призма с двумя отражающими гранями (БР-180°).** Угол между нормальными к входной и выходной граням постоянный, т. е.  $\omega = 180^\circ$ . Выходная грань не проходит по нормали к визирной линии вследствие ошибок углов призмы; отклонение от нормали равно углу клина, эквивалентной которому оказывается призма при наличии ошибок ее углов. При развертке призмы (рис. 15) получим

$$i_3 = \alpha + \beta - \gamma; \quad i'_3 = ni_3 = n(\alpha + \beta - \gamma) = n(\Delta\alpha + \Delta\beta - \Delta\gamma).$$

В треугольнике сумма углов равна  $180^\circ$ , тогда  $\Delta\gamma = -(\Delta\alpha + \Delta\beta)$  и  $i_3 = -2\Delta\gamma$ ;  $i'_3 = -2n\Delta\gamma$ . Так как положение нормалей к входной и выходной граням постоянно и не зависит от ошибок углов приз-

мы, то угол  $i'_3$  также равен отклонению линии визирования от ее правильного направления в призме без ошибок ее углов, т. е.

$$i'_3 = \omega = -2n\Delta\gamma. \quad (89)$$

Величина угла  $i'_3$  луча с выходной гранью зависит от показателя преломления стекла призмы, поэтому этот угол различен для лучей различного цвета, т. е. недопустимое отклонение прямого угла может привести к недопустимому окрашиванию изображения:

$$\omega_{FC} = 2(n_F - n_C)\Delta\gamma = \frac{2(n-1)\Delta\gamma}{v}. \quad (90)$$

Таким образом, допуски на углы призмы следует рассчитывать исходя из допустимого окрашивания или допустимого отклонения

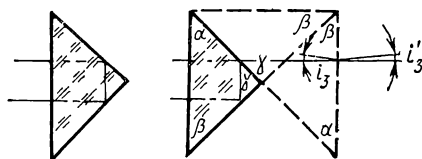


Рис. 15. Призма БР-180 и ее развертка

линии визирования. Последнее в бинокулярных системах может вызвать непараллельность осей трубок системы.

Призма в бинокулярных системах часто располагается за объективом перед его фокальной плоскостью. Например, полагая, что фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 120$  мм,  $f'_{ок} = 20$  мм и призма находится на расстоянии  $l = 20$  мм от фокальной плоскости, непараллельность  $\Delta'$  осей трубок бинокля, вызываемую ошибками углов призмы, найдем по формуле

$$\Delta' = \frac{2n\Delta\gamma l}{f'_{об}}.$$

Допуская  $\Delta' = 2'$  со стороны объектива (что соответствует  $12'$  со стороны окуляра), учитывая, что в бинокле четыре призмы (две из них расположены ближе к объективу) и ошибки их могут скапливаться, отклонение прямого угла определим по формуле

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta' f'_{об}}{2nl\sqrt{p}}.$$

$$\text{В нашем примере } \Delta\gamma = \frac{2' \cdot 120}{\sqrt{4} \cdot 1,5 \cdot 20} = 4'.$$

Этот допуск можно расширить до  $6-8'$ , применив при сборке комплектровку призм, тем самым исключив скопление погрешностей. Острые углы призмы можно изготовить с допуском  $10'$ . В результате расчета, выполненного с учетом только допустимого окраши-

вания, получают широкий допуск. Например, после призмы окрашивания

$$\Delta\omega_{FC} = 2\Delta\gamma (n_F - n_C) = \frac{2(n-1)\Delta\gamma}{v},$$

а в линейной мере в фокальной плоскости

$$\Delta L'_{FC} = \frac{l\Delta\omega_{FC}}{3438},$$

что составит в угловой мере после окуляра

$$\Delta\omega'_{FC} = 3438 \frac{\Delta L'_{FC}}{f'_{ок}} = \frac{2(n-1)\Delta\gamma l}{vf'_{ок}}. \quad (91)$$

Полагая, что глаз не замечает окрашивания в угловой мере не более  $1'$ , получим  $\Delta\omega_{FC} \leq 1'$  и

$$\Delta\gamma \leq \frac{\Delta\omega_{FC\text{доп}} vf'_{ок}}{2(n-1)l}. \quad (92)$$

Для нашего примера  $\Delta\gamma \leq \frac{1 \cdot 64,1 \cdot 20}{2 \cdot 0,5163 \cdot 20} = 64'$  — допуск широкий. Поэтому допуск на угол  $90^\circ$  следует рассчитывать исходя из возможностей сборки — из допустимой непараллельности осей трубок бинокулярной системы. Если призма располагается перед объективом зрительной трубы, то в формуле (91) надо взять  $f'_{об}$  вместо  $l$  и тогда

$$\Delta\gamma_{\text{доп}} = \frac{\Delta\omega_{\text{хр. доп}} v}{2(n-1)\Gamma}. \quad (92a)$$

Пирамидальность  $\Delta\gamma_{\pi}$ , т. е. непараллельность ребра двугранного угла  $90^\circ$  к гипотенузной грани, действует так же, как и ошибка прямого угла, только в плоскости, нормальной к главному сечению призмы: вызывает отклонение линии визирования и при значительных величинах — окрашивание изображения. Отклонение линии визирования в плоскости, нормальной к главному сечению, определяется соотношением  $\Delta\omega_{\pi} = 2n\Delta\gamma_{\pi}$ . Призма в присутствии пирамидальности  $\Delta\gamma_{\pi}$  разворачивается в клин с углом  $\theta_{\pi} = 2\Delta\gamma_{\pi}$ , главное сечение которого нормально к главному сечению призмы. Окрашивание, вызываемое пирамидальностью,

$$\Delta\omega_{FC\pi} = 2\Delta\gamma_{\pi}(n_F - n_C) = \frac{2\Delta\gamma_{\pi}(n-1)}{v}. \quad (93)$$

Отклонение линии визирования, вызываемое совместно ошибками угла  $90^\circ$  и пирамидальности, имеет величину  $\Delta\omega_0 = 2n\sqrt{\Delta\gamma^2 + \Delta\gamma_{\pi}^2}$ , а окрашивание изображения  $\Delta\omega_{FC\pi} = \frac{2(n-1)}{v}\sqrt{\Delta\gamma^2 + \Delta\gamma_{\pi}^2}$ .

Допуск на пирамидальность следует назначать такой же величины, что и допуск на прямой угол призмы.

На примере прямоугольной призмы с двумя отражениями видно, как влияет ошибка прямого угла на отклонение линии визирования, т. е. отклонение линии визирования  $\Delta\omega = 2n\Delta\gamma$ . Если бы был возможен ход луча не только сначала через первую грань, а потом через вторую, но и наоборот, сначала через вторую, а потом через первую грань, то мы имели бы ход лучей в крошеобразной призме —

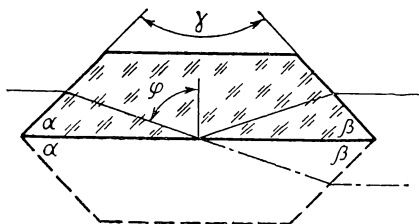


Рис. 16. Призма Довэ AP-0 и ее развертка

в ее главном сечении, нормальном к ребру крыши — и отклонение лучей удвоилось бы, т. е. было бы  $\Delta\omega = 4n\Delta\gamma$ . Если бы к тому же, как это бывает в крошеобразных призмах, линия визирования составляла бы угол  $\varphi$  ( $\varphi = 45^\circ$  в прямоугольных и  $\varphi = 22,5^\circ$  в пентапризмах с крышей), то величина непараллельности (двоения) лучей, падающих сначала на первую, потом на вторую и в обратном порядке, составит

$$\Delta\omega_{\text{дв}} = 4n\Delta\gamma \cos \varphi. \quad (94)$$

**Призма Довэ (длинная, AP-0°).** Такая призма аналогична прямоугольной призме с одной отражающей гранью; отличие состоит в том, что угол падения луча на первую грань не равен нулю, а имеет конечную величину  $45^\circ$ . Призма имеет такую же развертку, как и призма с одной отражающей гранью (рис. 16). Отклонение выходной грани от расчетного положения — угол между нормальми к входной и выходной граням равен  $i_3 = \Delta\alpha - \Delta\beta$ ; этот угол соответствует углу клина, которому эквивалентна призма с ошибками углов. Для определения угла отклонения луча от его правильного направления (при ходе лучей в призме без ошибок углов) воспользуемся формулой [11], определяющей угол отклонения лучей, падающих на клин с малым преломляющим углом, если углы падения конечны:

$$\delta = \alpha \left( n \frac{\cos i'_1}{\cos i_1} - 1 \right).$$

При наших обозначениях

$$\Delta\omega = \left( n \frac{\cos i'_1}{\cos i_1} - 1 \right) (\Delta\alpha - \Delta\beta). \quad (95)$$

Угол падения луча на первую поверхность  $i_1 = 45^\circ$ .

Отношение  $\frac{\cos i_1'}{\cos i_1} = 1,25$  для стекла К8 и  $\frac{\cos i_1'}{\cos i_1} = 1,262$  для стекла БК10, тогда  $\Delta\omega = 0,90$   $i_3 = 0,90(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  и  $\Delta\omega = 0,98(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  соответственно для стекла К8 и БК10. Окрашивание изображения характеризуется углом

$$\Delta\omega_{FC} = (n_F - n_C) (\Delta\alpha - \Delta\beta) = (n - 1) (\Delta\alpha - \Delta\beta) 1/\nu \quad (96)$$

и, как только что выведено,  $\Delta\omega = 0,90(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  и  $\Delta\omega = 0,98(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  для стекла К8 и БК10 соответственно.

Исходя из допустимых окрашивания и отклонения линии визирования, причем последнее может быть легко устранено поворотом призмы при ее юстировке, можно определить допуски на разность углов призмы.

Окрашивание, вносимое призмой с ошибками углов, можно определять более точно по формуле

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{\cos i_1'}{\cos i_1} (\Delta\alpha - \Delta\beta) (n_F - n_C) \quad (97)$$

или

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{n - 1}{\nu} \cdot \frac{\cos i_1'}{\cos i_1} (\Delta\alpha - \Delta\beta), \quad (97a)$$

получаемой легко из основной (95).

Вращение призмы вокруг ее оси вызывает вращение (наклон) изображения на угол, в 2 раза больший, чем угол поворота призмы при вращении. Из этих соображений может быть назначен допуск на взаимное расположение призм, если задан допуск на наклон изображения. Пирамидальность  $\Delta\gamma_\pi$  — непараллельность ребра преломляющих граней гипотенузной грани — здесь сказывается слабее, так как луч — линия визирования встречает гипотенузную грань АВ под большим углом  $\varphi = 72^\circ$ , при этом отклонение луча в плоскости, нормальной к главному сечению, составит

$$\Delta\omega_\pi = 2n\Delta\gamma_\pi \cos \varphi = 0,94\Delta\gamma_\pi \quad (98)$$

и окрашивание

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{FC\pi} &= 2(n_F - n_C) \Delta\gamma_\pi \cos \varphi = 0,62 \frac{n - 1}{\nu} \Delta\gamma_\pi = \\ &= 0,005\Delta\gamma_\pi \text{ (для стекла К8).} \end{aligned} \quad (99)$$

При наличии одновременно пирамидальности и ошибок углов призмы эти ошибки следует складывать квадратично, а влияние их следует принимать равным друг другу. Таким образом, на долю пирамидальности или разности углов придется 0,71 всего допустимого окрашивания или отклонения линии визирования.

**Пента-призма (БП-90°).** Из рассмотрения развертки призмы и хода лучей в ней (рис. 17) следует, что угол между нормальными к входной и выходной граням равен  $\omega = \gamma$ . Погрешность его состав-



ляет  $\Delta\omega = \Delta\gamma$ . Угол между направлением луча и нормалью к выходной грани

$$i_4 = -\frac{\gamma - \beta}{2} + \beta - \frac{\gamma - \beta}{2} = 2\beta - \gamma = 2\Delta\beta - \Delta\gamma.$$

Угол вышедшего луча с нормалью к выходной грани

$$i'_4 = ni_4 = n(2\Delta\beta - \Delta\gamma).$$

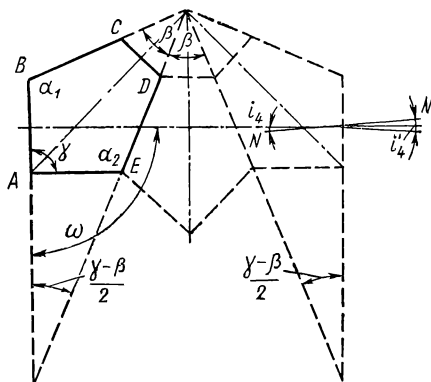


Рис. 17. Развертка пента-призмы БП-90

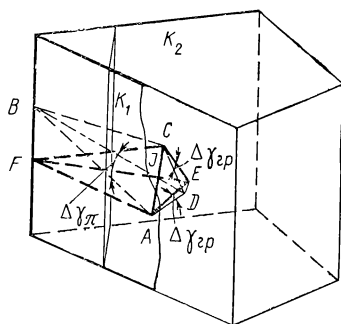


Рис. 18. К расчету допуска на пирамидальность призмы БП-90

Угол с нормалью к выходной грани, если бы призма не имела ошибок,

$$\Delta\omega = i'_4 + \Delta\gamma = n(2\Delta\beta - \Delta\gamma) + \Delta\gamma$$

или

$$\Delta\omega = 2n\Delta\beta - (n-1)\Delta\gamma. \quad (100)$$

Таким образом, окончательно угол эквивалентного клина равен  $i_4 = \theta = 2\Delta\beta - \Delta\gamma$ , угол отклонения луча относительно его правильного направления составит  $\Delta\omega = 2n\Delta\beta - (n-1)\Delta\gamma$ . Окрашивание

$$\Delta\omega_{FC} = (2\Delta\beta - \Delta\gamma)(n-1)/\nu. \quad (101)$$

Принимая равным действие обоих членов выражений (100) и (101) и исходя из допустимого отклонения линии визирования или допустимого окрашивания, определяем допуски на углы призмы. Например, если пента-призма расположена перед объективом зрительной трубы с увеличением  $\Gamma = 30^\times$  и полагать, что глаз еще не замечает окрашивания, не превышающего в угловой мере  $1'$ , то допуски на углы призмы определяются выражением

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{2\Delta\beta(n-1)}{\nu} - \frac{\Delta\gamma(n-1)}{\nu} \leq \frac{\Delta\omega'_{FC}}{\Gamma}.$$

Можно подсчитать

$$\frac{2\Delta\beta(n-1)}{v} = \frac{\Delta\gamma(n-1)}{v} \leq \frac{1}{\sqrt{2}\Gamma};$$

$$\Delta\beta = \frac{v}{2(n-1)\sqrt{2}\Gamma} = \frac{64,1}{2 \cdot 0,5163 \cdot 1,41 \cdot 30} = 1',5;$$

$$\Delta\gamma \leq \frac{v}{\sqrt{2}\Gamma(n-1)} = \frac{64,1}{1,41 \cdot 30 \cdot 0,5163} = 2',94 \approx 3'.$$

Получаются сравнительно узкие допуски.

Анализ формул (100) и (101) показывает, что отклонение углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  не влияет ни на ход лучей, ни на окрашивание изображения; ошибки прямого угла и угла  $45^\circ$  между отражающими гранями оказывают влияние на положение линии визирования и на окрашивание изображения.

Пирамидальность — непараллельность ребер преломляющих и отражающих граней пентапризмы. На рис. 18:  $K_1$  и  $K_2$  — отражающие грани (зеркала), между которыми  $\angle 45^\circ = \angle AFC$ ;  $ABCD$  — часть плоскости падения лучей на отражающие грани при наличии пирамидальности, нормальной к ребру преломляющих граней и составляющей угол  $\Delta\gamma_\pi$  с ребром отражающих граней;

$AFCE$  — часть плоскости, нормальной к ребру отражающих граней  $\operatorname{tg} \Delta\gamma_\pi = \frac{BF}{JF}$ ;  $\operatorname{tg} \Delta\gamma_{\text{гр}} = \frac{ED}{EC}$ ;  $FJ \neq JE = \frac{FC}{\cos 22^\circ,5}$ ;  
 $JE = FC \operatorname{tg} 22^\circ,5 \sin 22^\circ,5$ ;  $FJ = FC \cos 22^\circ,5$ ;  $\frac{JE \operatorname{tg} \Delta\gamma_\pi}{EC} = \frac{JE \operatorname{tg} \Delta\gamma_\pi}{FC \operatorname{tg} 22^\circ,5} =$   
 $= \operatorname{tg} \Delta\gamma_{\text{гр}}.$

Здесь  $\Delta\gamma_{\text{гр}}$  — угол между нормалью грани и плоскостью падения лучей (нормальной к преломляющим граням). После подстановки получим

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma_{\text{гр}} = \frac{FC \operatorname{tg} 22^\circ,5 \sin 22^\circ,5 \Delta\gamma_\pi}{FC \operatorname{tg} 22^\circ,5} = \Delta\gamma_\pi \sin 22^\circ,5, \text{ т. е. } \Delta\gamma_{\text{гр}} =$$

$$= \Delta\gamma_\pi \sin \frac{AFC}{2},$$

так как углы  $\Delta\gamma_\pi$  и  $\Delta\gamma_{\text{гр}}$  — малые. Влияние пирамидальности  $\Delta\gamma_{\text{гр}}$  при одной грани зеркала на направление луча по сравнению с его правильным положением

$$\Delta\omega_1 = 2\Delta\gamma_{\text{гр}} \cos \frac{AFC}{2} = 2\Delta\gamma_\pi \sin 22^\circ,5 \cdot \cos 22^\circ,5 = \Delta\gamma_\pi \sin 45^\circ;$$

$\frac{AFC}{2}$  — угол падения луча на зеркало-грань. Для двух граней-зеркал угол отклонения луча  $\Delta\omega_2 = 2\Delta\gamma_\pi \sin 45^\circ = \sqrt{2} \Delta\gamma_\pi$ . Следовательно, на этот угол отклоняется луч от своего правильного направления, падая на выходную преломляющую грань, т. е. угол  $\Delta\omega_2 = \theta = \sqrt{2} \Delta\gamma_\pi$  представляет собой угол клина, эквивалентной

которому оказывается призма, имеющая пирамидальность. При выходе из стекла в воздух луч имеет с нормалью к выходной грани угол  $\Delta\omega_{\pi} = \sqrt{2} n \Delta\gamma_{\pi}$ , так как в призме этот луч имел угол с нормалью (угол падения)  $\Delta\omega_2 = \sqrt{2} \Delta\gamma_{\pi}$ . Клинь, эквивалентный призме с ошибкой пирамидальности, имеет угол  $\theta_{\pi} = \sqrt{2} \Delta\gamma_{\pi}$  и окрашивание  $\Delta\omega_{FC\pi} = \sqrt{2} \Delta\gamma_{\pi} (n_F - n_C)$  или  $\Delta\omega_{FC\pi} =$

$$= \frac{\sqrt{2} \Delta\gamma_{\pi} (n - 1)}{v}.$$

Совместно с ошибками углов призмы отклонение линии визирования

$$\Delta\omega =$$

$$= \sqrt{[2n\Delta\beta - (n-1)\Delta\gamma]^2 + (2n\Delta\gamma_{\pi})^2}$$

и окрашивание

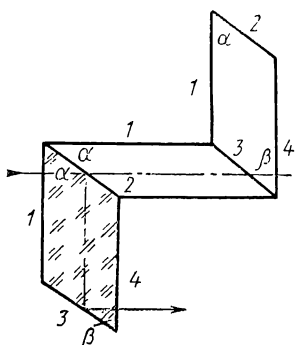
$$\Delta\omega_{FC} =$$

$$= (n_F - n_C) \sqrt{(2\Delta\beta + \Delta\gamma)^2 + (2\Delta\gamma_{\pi})^2}$$

или

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{n-1}{v} \sqrt{(2\Delta\beta + \Delta\gamma)^2 + (2\Delta\gamma_{\pi})^2}.$$

Рис. 19. Призма-ромб БС-0° и ее развертка



Задавая допустимой величиной  $\Delta\omega$  и  $\Delta\omega_{FC}$  и принимая действия ошибок углов и пирамидальности равными друг другу, можно определить допуски на углы призмы и пирамидальность.

**Призма-ромб (БС-0°).** Из рассмотрения развертки и хода луча в призме-ромбе (рис. 19) следует, что

$$i_4 = \alpha + \theta_{2,3} - \beta = \Delta\alpha + \theta_{2,3} - \Delta\beta = (\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3},$$

где  $i_4$  — угол падения луча на выходную грань (угол клина, эквивалентного призме с ошибками углов);  $\alpha$  и  $\beta$  — острые углы призмы;  $\theta_{2,3}$  — непараллельность сторон 2, 3.

Угол между нормалью к входной и выходной граням в призме без ошибок углов равен нулю:  $\omega_0 = 0$ ; этот же угол в призме с ошибками углов  $\Delta\omega = \theta_{1,4}$  равен непараллельности сторон 1, 4. Угол вышедшего из призмы луча с нормалью к выходной грани

$$i'_4 = ni_4, \text{ т. е. } i'_4 = n[(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}].$$

Отклонение луча от правильного направления

$$\Delta\omega = -\theta_{1,4} + [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}]n; \quad (102)$$

в худшем случае

$$\Delta\omega = \theta_{1,4} + [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}]n. \quad (102a)$$

Окрашивание, вносимое призмой с ошибками углов,

$$\Delta\omega_{FC} = [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}] (n_F - n_C) = \frac{n-1}{v} [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}]. \quad (103)$$

Следовательно, хроматизм в изображении вызывают разность острых углов и непараллельность друг другу отражающих граней; только эти величины и должны быть ограничены допусками. Зная допустимое окрашивание, можно определить допуски на углы призмы.

**Пирамидальность.** Если за пирамидальность принять непараллельность граней 3—4 граням 1—2, обозначив ее соответственно буквами  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , то действие пирамидальности можно определить как действие наклонного на угол  $\Delta_1$  зеркала, на который лучи падают под  $\angle 45^\circ$ , и как действие клина с углом  $\Delta_2$ , главное сечение которого нормально к главному сечению призмы. Тогда отклонение луча в плоскости, нормальной к главному сечению в призме с пирамидальностью  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , составит

$$\Delta\omega_{\pi} = 2n\Delta_1 \cos 45^\circ + (n-1)\Delta_2,$$

а хроматизм

$$\Delta\omega_{FC} = (n_F - n_C) (2\Delta_1 \cos 45^\circ + \Delta_2) = (2\Delta_1 \cos 45^\circ + \Delta_2) \frac{n-1}{v}. \quad (104)$$

Отклонение луча и окрашивание изображения вследствие пирамидальности следует квадратично складывать с отклонением луча и хроматизмом изображения вследствие ошибок углов. Исходя из допустимого хроматизма изображения или отклонения линии визирования и принимая действия пирамидальности и ошибок углов равными, можно определить допуски на пирамидальность и ошибки углов.

**Двоение изображения в крышеобразных призмах.** При рассмотрении прямоугольной призмы с двумя отражениями мы выяснили, что отклонение от расчетного направления осевого луча, падающего на первую грань призмы и потом после двух граней крыши на вторую, и осевого луча, проходящего через призму в обратном, чем первый, направлении, равно

$$\Delta\omega = 4n\Delta\gamma \cos \varphi, \quad (105)$$

где  $n$  — показатель преломления стекла призмы;  $\Delta\gamma$  — ошибка угла крыши;  $\varphi$  — угол падения луча на грань крыши. Хроматизм изображения вследствие отклонения  $\Delta\gamma$  угла крыши от прямого

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{4\Delta\gamma \cos \varphi (n-1)}{v}.$$

Однако окрашивание изображения оказывается незаметным при тех необходимых строгих допусках на прямой угол крыши, которые получаются в результате расчета допуска, исходя из допустимого — еще не заметного глазом двоения изображения.

Наибольшее распространение имеют крышеобразные прямоугольные призмы и пента-призмы. Для прямоугольной призмы из стекла К8 двоение

$$\Delta\omega = 4n \cos 45^\circ \Delta\gamma = 4,29\Delta\gamma \quad (105a)$$

и для пента-призмы из того же стекла

$$\Delta\omega = 4n \cos 22^\circ, 5\Delta\gamma = 5,62\Delta\gamma; \quad (105б)$$

для прямоугольной призмы из стекла других марок

$$\Delta\omega = 2,83n\Delta\gamma \quad (105в)$$

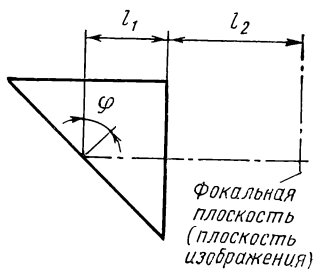
и для пента-призмы

$$\Delta\omega = 3,70n\Delta\gamma. \quad (105г)$$

Призма может располагаться или перед объективом зрительной трубы, или за объективом перед фокальной плоскостью. Можно рассчитать допуск на отклонение угла крыши, при котором двоение еще незаметно. Если призма расположена перед объективом зрительной трубы, увеличение которой  $\Gamma$ , то двоение незаметно, если оно видно глазу под углом  $\Delta\omega' \leq 1'$  или  $\Delta\omega \leq 3'$  — в неотвечественных приборах. Тогда допуск  $\Delta\gamma$  на угол крыши

$$\Delta\gamma \leq \frac{1'}{4n\Gamma \cos \varphi}; \quad (106)$$

для прямоугольной призмы  $\Delta\gamma \leq 1/4,29\Gamma$  и для пента-призмы  $\Delta\gamma \leq 1/5,62\Gamma$ . Если же призма расположена перед фотообъективом, то тогда линейная величина двоения в фокальной плоскости не должна превышать предела разрешения этого фотообъектива  $\Delta l' = 0,01 \div 0,02$  мм, т. е.



$$\frac{\Delta\omega' f'_{об}}{3438} \leq 0,02$$

$$\text{или } \Delta\omega' \leq \frac{0,02}{f'_{об}} 3438,$$

и тогда

Рис. 20. Призма с крышей  
АкР-90°

$$\Delta\gamma \leq \frac{0,02 \cdot 3438}{4nf'_{об} \cos \varphi}. \quad (106а)$$

Если призма расположена за объективом, то допуск на угол крыши следует определять исходя из допустимого — незаметного для глаза двоения в фокальной плоскости. Если от ребра крыши до выходной грани расстояние  $l_1$  и от выходной грани призмы до фокальной плоскости —  $l_2$  (расстояния отсчитываются по оси) (рис. 20), то в линейной мере сдвиг (двоение) в фокальной плоскости

$$\Delta l' = \Delta\omega' \left( \frac{l_1}{n} + l_2 \right) \frac{1}{3438}.$$

Чтобы это двоение было незаметно для глаза, надо, чтобы

$$\frac{\Delta l'}{f'_{ок}} \leq \frac{1}{3438}, \quad \text{т. е.} \quad \frac{\Delta\omega' (l_1/n + l_2)}{3438 f'_{ок}} < \frac{1}{3438}.$$

После подстановки значения  $\Delta\omega$  получим

$$\frac{4n \cos \varphi \Delta\gamma \left( \frac{l_1}{n} + l_2 \right)}{3438 f'_{\text{ок}}} \leq \frac{1}{3438} \quad \text{и} \quad \Delta\gamma \leq \frac{f'_{\text{ок}}}{4n \cos \varphi (l_1/n + l_2)}.$$

Например, при  $l_1 = 15$ ;  $n = 1,5163$ ;  $f'_{\text{ок}} = 15$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $l_2 = 30$  получим  $\Delta\gamma = \frac{15}{4,29n} = 5'',24$  — узкий, но обычный допуск на угол крыши.

## 26. ДЕЦЕНТРИРОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Смещение центра кривизны сферической поверхности с общей оптической оси называется децентрировкой данной поверхности. Опыт сборки, испытаний и вычислений показывает, что отрицательное влияние децентрировки поверхностей линз сложной системы заключается в появлении аберрации комы для точки предмета на оптической оси: качество изображения осевых точек предмета лучше, чем внеосевых, и дефекты сборки в неширокоугольных системах более заметны при рассматривании изображения осевых точек. В таких системах можно ограничиться изучением влияния децентрировки поверхностей на качество изображения точки на оси системы. В несветосильных широкоугольных объективах децентрировка вызывает кривизну изображения и изменение астигматизма, хроматизма, увеличения и дисторсии, неодинаковые для симметричных точек поля. Для определения изменения аберраций пользуются методом расчета достаточного числа лучей через систему, поверхности которой поочередно децентрируются. Этот точный метод требует значительной затраты времени, поэтому не всегда возможно таким образом изучить влияние децентрировки каждой поверхности, хотя применение электронных машин ускоряет решение задачи.

Изображение осевой точки предмета при наличии децентрировки поверхностей получается в виде размытой точки с одной осью симметрии и крупнее, чем в центрированной системе. Дифракционные кольца в децентрированной системе (рис. 21, а) располагаются несимметрично относительно основного ядра: расстояния от отдельных участков кольца до ядра неодинаковы и наибольшее расстояние  $A$  от центра до первого кольца больше, чем это же расстояние в дифракционной картине центрированной системы (рис. 21, б). В этом направлении разрешающая способность уменьшается, а в перпендикулярном к нему в лучшем случае остается без изменений: кома на оси напоминает по действию астигматизм. При  $A > a$  (рис. 21, а) вертикальные полосы разрешаются хуже, горизонтальные остаются без изменения. При  $A = a$  (рис. 21, б) вертикальные и горизонтальные полосы разрешаются одинаково резко. Так как одно из направлений полос мира разрешается хуже, чем в центрированной системе, то децентрировка поверхностей снижает разрешающую способность. При значительной децентрировке в изображении точки появляется также одностороннее окрашивание дифракционных колец, изображения точки и наблюдаемых объектов: децентрировка в явной форме проявляет себя так же, как и в оптической системе призма с малым преломляющим углом.

Аберрация комы для призмы, на которую падает сходящийся пучок лучей, была рассмотрена проф. Слюсаревым Г. Г. [10], который и предложил формулу для вычисления комы в меридиональной плоскости

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n^2 - 1}{n} \alpha \alpha \omega^2 \quad (107)$$

и доказал, что величина комы не зависит от угла падения главного луча на призму (обозначения величин понятны из рис. 22). После

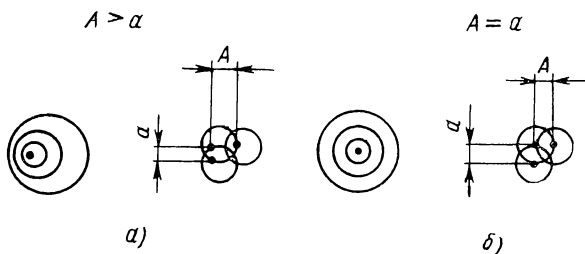


Рис. 21. Дифракционное изображение точки в децентрированной (а) и в центрированной (б) системе

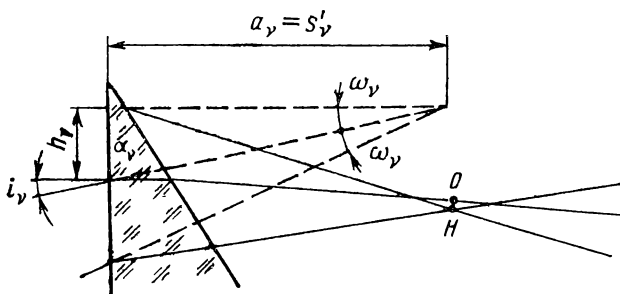


Рис. 22. К расчету допуска на центровку поверхностей

небольших преобразований формулу (107) можно использовать для расчета допусков на децентрировку.

Приняв  $\omega_v = h_v/s'_v$ , получим

$$s'_v \omega_v^2 = h_v^2/s'_v = h_v^2 \sigma'_v.$$

Для одной поверхности в ее плоскости изображения

$$\delta g'_v = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v \frac{h_v^2}{s'_v}.$$

В плоскости изображения системы отдецентрировка  $v$ -ой поверхности кома имеет следующую величину:  
для клина за поверхностью линзы

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k; \quad (108)$$

для клина перед поверхностью линзы

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v h_v^2 \sigma_v \beta_v^k. \quad (109)$$

Так как  $\alpha_v = c_v/r_v$  или  $\alpha'_v = 3438 c_v/r_v$  ( $\alpha_v$  — угол клина, угол поворота децентрированной поверхности,  $c_v$  — децентрировка и  $r_v$  — радиус кривизны поверхности), то по формулам (108) и (109) можно вычислить кому в фокальной плоскости системы от децентрировки каждой поверхности или по допустимой коме вычислить величину децентрировки.

Для каждой поверхности системы из расчета хода нулевого луча можно определить значения высот встречи луча с каждой поверхностью и расстояние  $s'_v$  от этой поверхности до изображения точки, которое образуется всеми поверхностями от первой до данной включительно, влияние децентрировки которой мы определяем. По вычисленным величинам  $3(n^2-1)/2n$ ;  $h_v$ ;  $s'_v = 1/\sigma'_v$  и принятой  $\alpha_{\text{доп}}$  определяем кому, вызываемую децентрировкой данной поверхности в ее плоскости изображения, а умножив величину комы на увеличение системы поверхностей  $\beta_{v+1}^k$ , расположенных между изучаемой и последней, включая и последнюю, получим величину комы в плоскости изображения. Сравнив полученную величину комы с допустимой, проверяем правильность назначения допуска на децентрировку. Вычисляют также и допуски на центрировку, если известна величина допустимой комы, которую назначают исходя из разрешающей способности глаза или фотозмульсии, с тем чтобы кома вследствие децентрировки поверхностей не превышала части предела разрешения. Правильнее предположить, что кома из-за децентрировки не должна превышать радиуса первого дифракционного кольца. В этом случае снижение качества изображения еще незаметно в визуальных и обычных фотографических системах.

Для склеенных или посаженных на оптический контакт поверхностей надо брать не абсолютный показатель преломления, а относительный — одной линзы относительно другой или склеивающего вещества ( $n_{\text{отн}} = n_{+1}/n \approx 0,9 \div 1,2$ ) или брать разность  $(n_v^2-1)/n_v - (n_{v+1}^2-1)/n_{v+1}$  и подставлять ее в формулу вместо  $(n^2-1)/n$ . Для склеенных поверхностей этот множитель оказывается в 3—5 раз меньше, чем для поверхностей, граничащих с воздухом. При вычислениях необходимо выбирать такое положение клина (перед или за поверхностью), чтобы на него падал пучок лучей с большей сходимостью. Весьма важно определить чувствительные к децентрировке поверхности, строгую центрировку которых и следует обеспечить; она в большей мере зависит не только от



изготовления оптических деталей, но и от конструкции оправы и метода сборки.

В качестве примера рассчитаем допуски на центрировку поверхностей объектива трубы нивелира с внутренней фокусировкой. **Пример I.**

### Конструктивные элементы объектива

$f' = 253,05; 1:7,2; 2w = 1^\circ; h_1 = 17,5$		
$r_1 = 98,63$	$d_1 = 6,8$	K8
$r_2 = -62,23$	$d_2 = 0,06$	
$r_3 = -62,646$	$d_3 = 3,5$	Ф2
$r_4 = -246,6$	$d_4 = 117,5$	
$r_5 = -113,24$	$d_5 = 2,0$	K8
$r_6 = -113,24$		

$p$  — число поверхностей, чувствительных к децентрировке. Здесь принято  $p=6$ ; можно было взять  $p=4$ , так как пятая и шестая поверхности нечувствительны к децентрировке.

В результате расчета хода нулевого луча через объектив получаем необходимые в дальнейшем  $s_v$  и  $s_{v+1}$ :

$v$	1	2	3	4	5	6
$s_v$	289,66	73,22	422,22	157,23	73,58	60,15
$s_{v+1}$	282,86	73,16	418,72	39,72	71,58	—

Допустимая кома вследствие децентрировки

$$\delta g'_k = r_g = \frac{f'/D_p}{1470} = \frac{1}{1470} \cdot \frac{f'}{D_p};$$

$$\frac{\delta g'_k}{\sqrt{p}} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \cdot \frac{c_v}{r_v} h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k;$$

$$k_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k$$

или

$$k_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} h_v^2 \sigma_v \beta_v^k;$$

$$c_v = \frac{r_v \delta g'_k}{\sqrt{p} k_v} = \frac{r_v}{1470 D_p / f' \sqrt{p} k_v};$$

$$c'_v = 3438 \frac{c_v}{r_v}.$$

Вычисления сведем в таблицу.

$\nu$	$h_\nu$	$h_\nu^2$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{n_\nu^2 - 1}{n_\nu}$	$\sigma'_{\nu+1} f'$ ( $\sigma_\nu f'$ )	$\beta_{\nu+1}^k$ ( $\beta_\nu^k$ )	$k_\nu f'$	$c_\nu$	$c'_\nu$
1	17,5	306,25	1,285	0,87	1,32	455,08	0,11	3,33
2	17,08	291,73	1,285	3,456	3,372	4369,15	0,007	0,39
3	17,06	291,04	1,497	3,456	3,372	5077,92	0,006	0,33
4	16,92	286,29	1,497	1,607	1,556	1080,28	0,115	1,59
5	4,28	18,32	1,285	6,368	1,274	191,05	0,30	9,08
6	4,16	17,31	1,285	4,20	1,0	93,57	0,612	18,51

Из таблицы следует, что необходимо точно центрировать наружные поверхности собственно объектива и четвертую точнее, чем первую. Очень точная центровка требуется для внутренних поверхностей объектива — разнотолщинность промежуточного кольца допускается не более 0,01 мм. Поверхности 3-й фокусирующей линзы не требуют точной центровки.

Допуски на центровку оптических деталей при их изготовлении можно расширить и повысить качество изображения, обеспечивая центровку линз при сборке юстировкой (при склейке линз с оправой, закатке, посадке на герметик) или при обработке посадочных мест оправы после центровки линзы вместе с оправой. При этом нельзя допускать в конструкции оправы резьбовые соединения отдельных компонентов и передачу усилия крепления на фаски оптических деталей.

Чувствительными к децентрировке оказываются те поверхности, которые одни или в сумме с предыдущими имеют наибольшую оптическую силу (наименьшее фокусное расстояние), для которых величина  $h_\nu^2 \sigma'_{\nu+1} \beta_{\nu+1}^k$  или  $\sigma'_\nu$  наибольшая.

Предлагаемый метод не требует большой вычислительной работы и дает удовлетворительные результаты (особенно для неширокоугольных систем). Это важно при расчете допусков на децентрировку поверхностей малоизученных вновь запускаемых в производство оптических систем. С учетом чувствительности отдельных поверхностей системы к их децентрировке должны разрабатываться и конструкция оправы, и технология ее изготовления, которые часто не помогают обеспечить центровку линз и поэтому децентрировка линз является наиболее частой причиной исправимого брака и низкого качества изображения.

**Пример 2.** Рассчитать допуски на децентрировку поверхностей фотообъектива «Индустар 50»:  $f' = 52,52$ ;  $1:3,5$ ;  $2\omega = 45^\circ$  (для фотоаппарата «Зоркий»).

# Конструктивные элементы

$r_1 = 17,10$	Материал	$n_D$	Формулы
$d_1 = 2,8$	ТК14	1,6130	$c_{\text{вдоп}} =$
$r_2 = \infty$			$= \frac{r_v}{1470 \frac{D_p}{f'} \sqrt{\rho} k} =$
$d_2 = 4,0$			$= \frac{r_v}{1470 \frac{1}{3,5} \sqrt{8} k} =$
$r_3 = -33,57$			$= \frac{r_v}{1188k}$
$d_3 = 1,10$	ЛФ5	1,5749	$c'_{\text{вдоп}} = \frac{c_{\text{вдоп}}}{r_v} 3438 =$
$r_4 = 14,56$			$= \frac{3',86}{k}$
$d_4 = 5,05$			$k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \times$
$r_5 = 346,7$			$\times h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k$
$d_5 = 1,20$	ОФ1	1,5294	$\beta_{v+1}^k = \frac{n_{v+1}}{n_v} \times$
			$\times \frac{s'_{v+1}}{s_{v+1}} \dots \frac{s'_k}{s_k}$
$r_6 = 15,0$			$h_1 = 7,5$
$d_6 = 0,02$	Бальза-	1,5200	
$r_7 = 15,0$	МИН		
$d_7 = 4,30$	ТК14	1,6130	
$r_8 = -23,60$			

Результаты расчета хода нулевого луча через объектив

$v$	1	2	3	4
$s'_v$	45,13	26,23	56,15	-93,67
$s_v$		42,23	22,23	55,05
$s'_v/s_v$		0,622	2,525	1,72
$\beta_v^k = \frac{s'_v}{s_v} \dots \frac{s'_k}{s_k}$		1,172	1,883	0,745

$\nu$	5	6	7	8
$s'_\nu$	-177,26	-169,28	-540,78	43,68
$s_\nu$	-98,72	-178,46	-169,30	545,08
$s'_\nu/s_\nu$	1,798	0,944	3,195	0,0802
$\beta_\nu^k = \frac{s'_\nu}{s_\nu} \dots \frac{s'_\kappa}{s_\kappa}$	0,433	0,241	0,256	

Вычисления допусков сведем в таблицу.

$\nu$	$h_\nu$	$h_\nu^2$	$\frac{3}{2} \frac{n_\nu^2 - 1}{n_\nu}$	$\sigma'_\nu;$ ( $\sigma_\nu$ )	$\beta_{\nu+1}^k;$ ( $\beta_\nu^k$ )	$k$	$c_\nu$ в мм	$c'_\nu$
1	7,5	56,25	1,483	0,0222	1,874	3,469	0,004	0,8
2	7,02	49,25	1,483	0,0381	1,874	5,210	—	0,73
3	5,95	35,38	1,401	0,045	1,874	4,179	0,007	0,7
4	5,83	34,01	1,401	-0,0187	1,173	1,045	0,012	2,8
5	6,15	37,77	1,307	-0,0101	0,436	0,217	1,345	13,3
6	6,19	38,24	0,030	-0,0059	0,390	0,0026	4,850	1480
7	6,19	38,29	0,138	-0,0059	0,390	0,0121	0,104	24,0
8	6,24	38,90	1,483	0,0229	1,0	1,321	0,015	2,18

Наиболее точно следует центрировать обе поверхности первой линзы, первую и вторую (менее строго) поверхность второй линзы и вторую поверхность четвертой линзы.

**Пример 3.** Рассчитать допуски на центровку объектива бинокля:

$$f' = 123,0; 1 : 4; 2\omega = 8^\circ 30'; \Gamma = 6 \times.$$

#### Конструктивные элементы

			$n_D$	$\nu$
$r_1 = 72,95$	$d_1 = 6,6$	БК4	1,5302	60,5
$r_2 = -49,20$	$d_2 = 2,8$	Ф2	1,6164	36,6
$r_3 = -230,1$				

Величина допустимой комы вследствие децентрировки одной из поверхностей:

$$\delta g'_{k_1} = \frac{\delta g'_k}{\sqrt{2\rho}} = \frac{0,00271}{\sqrt{6}} = 0,0011;$$

$$c_v \text{ доп} = \frac{\delta g'_k r_v}{A_v h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k}; \quad A_v = -\frac{3}{2} \frac{n_v^2 - 1}{n_v};$$

$$\frac{h_v}{h_1} = \frac{s_2}{s'_1} \cdot \frac{s_3}{s'_2} \cdot \dots \cdot \frac{s_v}{s'_{v+1}};$$

$$\beta_{v+1}^k = \frac{n_{v+1}}{n'_k} \cdot \frac{s'_{v+1}}{s_{v+1}} \cdot \dots \cdot \frac{s'_k}{s_k}.$$

Результаты расчета хода нулевого луча через объектив

$v$	1	2	3
$s'_v$	210,54	281,06	117,92
$s_v$	$-\infty$	203,94	278,26
$s'_v/s_v$		1,378	0,423
$\beta_v$		0,583	

Вычисления допусков сведем в таблицу.

$v$	$h_v$	$h_v^2$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{n^2-1}{n}$	$\sigma'_v$	$\beta_{v+1}^k$	$h_v^2 \sigma'_v \times$ $\times \beta_{v+1}^k$	$k$	$c_v \text{ доп}$	$\alpha'_{\text{доп}}$
1	15,0	225,0	1,315	0,00475	0,583	0,622	0,818	0,099	4,7
2	14,52	211,0	1,496	0,00356	0,423	0,318	0,476	0,131	9,2
3	14,40	207,0	1,496	0,00848	1,0	1,758	2,630	0,111	1,7

Следовательно, можно назначить допуск на центровку линз при их изготовлении и сборке объектива в 0,1 мм для каждой поверхности.

## 27. О КОНСТРУКЦИИ ОПРАВ НЕКОТОРЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Опыт подтверждает, что основная причина возврата исправного брака после предъявления контролю объективов и фотообъективов — децентрировка линз и погрешности в выдерживании воздушных промежутков, которые снижают качество изображения и разрешающую способность. Помимо децентрировки линз при их изготовлении центровка линз при сборке системы затрудняется недостатками в конструкции оправы. Погрешности в конструкции оправы объясняются часто не только консервативностью и шаблоном в работе конструкторов, не желающих более вдумчиво относиться к элементам конструкции оправы, но и недостаточным опытом и осведомленностью об особенностях оптической системы, оправы для которой разрабатывается конструктором. Конструктору неизвестны ни воздушные промежутки, которые должны быть наиболее

точно выдержаны, ни поверхности системы, которые должны быть наиболее точно центрированы. В последнем повинны также и оптики-вычислители, которые не участвуют в разработке конструкции оправы, считая эту работу посторонней, не своей, относятся к ней безразлично и не помогают конструкторам понять существенное в оптической системе — узнать воздушные промежутки, чувствительные к изменению аберраций и поверхности, чувствительные к децентрировке. Оптики-вычислители в своих чертежах указывают обычно одинаковые допуски на все воздушные промежутки и на все поверхности системы. Задача еще усложняется тем, что конструктору приходится разрабатывать оправу на оптическую систему в тот момент, когда система еще изучена недостаточно. Если у конструктора мало опыта и ранее ему не приходилось иметь дело с подобными системами, то он встречает большие трудности при разработке целесообразной во всех отношениях конструкции оправы и назначении допусков на элементы оправы. На этой стадии важно знать, если и не точные данные о чувствительности воздушных промежутков к изменению аберраций и поверхностей линз к децентрировке, то хотя бы достаточно приближенные, позволяющие сделать правильные выводы для определения характера конструкции оправы. Для этой цели можно воспользоваться следующими правилами.

Чувствительными к децентрировке оказываются те поверхности или блоки линз, для которых величины  $h_v^2 \sigma'_v \prod_{v+1}^k \beta_v$ ,  $h_v^2 \sigma_v \prod_v^k \beta_v$

(приближенно  $h_v^2 \sigma'_v = h_v^2 / s'_v$ ,  $h_v^2 \sigma_v = h_v^2 / s_v$ ) оказываются наибольшими по сравнению с этими же величинами для других поверхностей. Это правило можно сформулировать короче: чувствительными к децентрировке оказываются те поверхности, которые вместе с предыдущими или перед которыми предыдущие поверхности имеют наибольшую оптическую силу (наименьшее фокусное расстояние). В приведенных величинах  $h_v$  — высота встречи апертурного луча с  $v$ -ой поверхностью;  $\sigma'_v = 1/s'_v$  или  $\sigma_v = 1/s_v$  — сходимости апертурного

луча после или перед  $v$ -ой поверхностью и  $\prod_{v+1}^k \beta_v$  или  $\prod_v^k \beta_v$  — попе-

речное увеличение поверхностей, следующих за  $v$ -ой или включая и  $v$ -ую. В отношении отдельных компонентов и блоков линз можно повторить это же правило.

Не чувствительными к изменению аберраций оказываются те воздушные промежутки, поверхности линз за которыми апертурный луч встречает на наименьшей высоте и сходимости лучей в которых наименьшая, т. е. оптическая сила всех предыдущих поверхностей незначительна (например, воздушный промежуток между компонентами телеобъективов, средний (второй) воздушный промежуток симметричных объективов и объективов «Индустар», «Триплет», «Юпитер»). Наиболее чувствительными к изменению аберраций оказываются те воздушные промежутки, сходимости лучей в которых или оптическая сила всех предыдущих поверхностей в которых наибольшая (например, воздушный промежуток между линзами первого компонента телеобъектива «Телемар» или двухлинзовых несклеенных объективов или компонентов более сложных объективов зри-

тельных труб и фотообъективов, первый воздушный промежуток в объективах «Индустар», «Триплет», «Юпитер»). Этими правилами следует пользоваться при разработке конструкции оправ оптических систем.

Таким образом, конструктор может считать свою задачу решенной, если ему удалось сконструировать оправу, обеспечивающую точную легко выполнимую центровку поверхностей и выдерживание воздушных промежутков. При этом оправа должна быть технологичной, изготавливаемой без особых затруднений.

Ниже на рис. 23—34 приводится ход апертурного луча в некоторых оптических системах, для построения которого необходимо только знание хода лучей в положительных и отрицательных линзах и даются замечания о чувствительности поверхностей к децентровке и воздушных промежутков к изменению аберраций.

**Двухлинзовый склеенный объектив зрительных труб, например, геодезических приборов [1]** (рис. 23). К децентровке чувствительна вторая и слабее первая наружная поверхность объектива; менее чувствительна к децентровке поверхность склейки флинтовой линзы и еще менее — кроновой линзы.

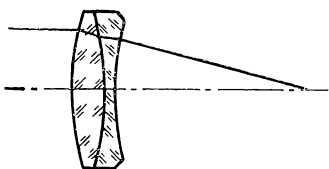


Рис. 23. Схема хода лучей в двухлинзовом склеенном объективе

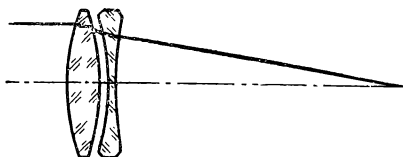


Рис. 24. Схема хода лучей в двухлинзовом несклеенном объективе

**Двухлинзовый несклеенный объектив зрительных труб геодезических приборов и коллиматоров и первых компонентов телеобъективов [1]** (рис. 24). Отклонение воздушного промежутка влияет на отклонение аберраций в 3—5 раз сильнее, чем отклонение толщин линз. К децентровке особенно чувствительна вторая и третья (особенно опасен их взаимный перекося), а затем четвертая поверхности. Первая поверхность менее чувствительна к децентровке.

**Объектив зрительной трубы теодолита Т05** (рис. 25). Отклонение второго воздушного промежутка сильнее влияет на аберрации,

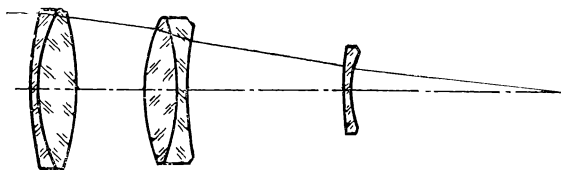


Рис. 25. Схема хода лучей в объективе теодолита Т05

чем первого. Наиболее точная центровка (биение поверхностей не более 0,003—0,005 мм) требуется для наружных и менее точная для склеенных (биение до 0,005—0,01 мм) поверхностей второго компонента. Кроме того, точная центровка требуется и для поверхностей отрицательной фокусирующей линзы (биение до 0,005—0,01 мм) и менее точная — для наружных и особенно склеенных поверхностей первого слабого компонента (биение до 0,02 мм).

**Светосильный проекционный и объектив зрительных труб для ночного видения** (рис. 26). Воздушный промежуток необходимо

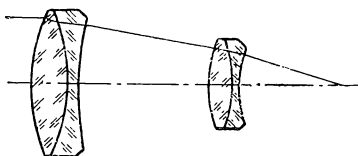
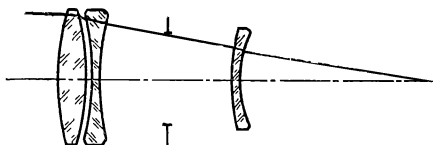


Рис. 26. Схема хода лучей в проекционном объективе

выдерживать с точностью  $\pm 0,02 \div 0,03$  мм. Вторые наружные поверхности склеенных блоков более чувствительны к децентрировке, чем первые, поэтому поворот блоков вокруг центров кривизны первых поверхностей менее опасен, чем вокруг вторых.

**Фотообъектив «Таир»:**  $f = 300$  мм;  $f' = 600$  мм; относительное отверстие 1:4,5 (рис. 27). Отклонение первого воздушного проме-

Рис. 27. Схема хода лучей в фотообъективе «Таир»



жутка сильно влияет на aberrации ( $\Delta l_1 = \pm 0,02 \div 0,03$  мм), а второго — слабее ( $\pm 0,1 - 0,2$  мм). К децентрировке чувствительны вторая и третья поверхности ( $c = 0,005 \div 0,01$ ). Менее чувствительны поверхности третьей линзы — мениска ( $c = 0,01 \div 0,02$ ), четвертая ( $c = 0,01$ ) и еще слабее первая поверхность ( $c = 0,02 \div 0,03$ ). Более опасны взаимный перекос второй и третьей поверхностей и разнотолщинность поверхностей мениска.

**Фотообъектив «Юпитер 11»:**  $f' = 135$  мм; относительное отверстие 1:4 (рис. 28). Отклонения первого и второго воздушных промежут-

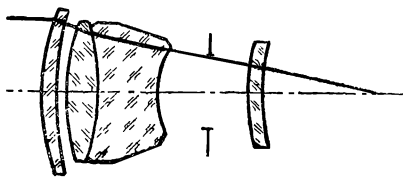


Рис. 28. Схема хода лучей в фотообъективе «Юпитер 11(21)»

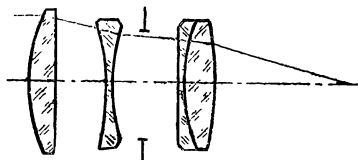


Рис. 29. Схема хода лучей в фотообъективе «Индустар»



ков слабо влияют на изменение aberrаций ( $\Delta l_1 \approx \Delta l_2 = \pm 0,05 \div \pm 0,1$  мм). Чувствительны к децентрировке первая, третья, пятая, вторая, шестая и седьмая поверхности (в порядке снижения точности), причем перекося шестой и седьмой поверхностей ухудшает качество изображения по полю.

**Фотообъектив «Индустар»:**  $f' = 50$  мм; относительное отверстие 1:3,5;  $f' = 500$  мм; 1:5 (рис. 29). Отклонение первого воздушного

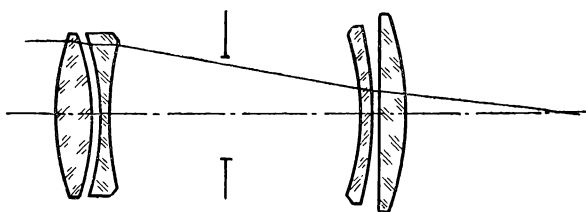


Рис. 30. Схема хода лучей в телеобъективе «Телемар»

промежутка заметно ( $\Delta l_1 = \pm 0,02$ ), а второго — менее заметно ( $\pm 0,05$  мм), влияет на изменение aberrаций. Точно ( $c = 0,005 \div \pm 0,01$  мм) следует центрировать обе поверхности первой линзы, первую и вторую (менее точно) поверхности второй линзы и вторую поверхность (менее точно,  $c = 0,015 \div 0,02$  мм) четвертой линзы.

**Телеобъектив «Телемар»:**  $f' = 400; 750; 1000$  мм; относительное отверстие 1:6—1:7 (рис. 30). Изменение первого воздушного про-

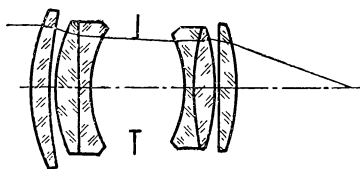


Рис. 31. Схема хода лучей в фотообъективе «Гелиос»

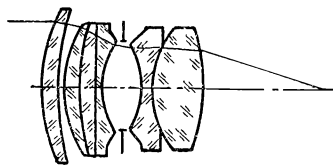


Рис. 32. Схема хода лучей в фотообъективе «Юпитер»

межутка сильно влияет на изменение aberrаций, заметно слабее влияет изменение второго и еще слабее — третьего воздушного промежутка. Децентрировка второй и третьей поверхностей значительно ухудшает качество изображения, менее значительно — четвертой, первой и пятой поверхностей; остальные поверхности не требуют точной центровки.

**Фотообъектив «Гелиос»:**  $f' = 20 \div 100$  мм; относительное отверстие 1:2 (рис. 31). Изменения воздушных промежутков слабо влияют на изменение aberrаций, и воздушные промежутки не следует выдерживать точнее, чем  $\pm 0,03$ —0,05 мм. Децентрировка первой, третьей, пятой, шестой, восьмой и десятой поверхностей за-

метно влияет на качество изображения, и биение этих поверхностей более, чем 0,01—0,02 мм, недопустимо.

**Фотообъектив «Юпитер 3.8.9»:**  $f' = 52,4 \div 85,0$  мм; относительное отверстие 1:1,5—1:2 (рис. 32). Отклонения первого и второго воздушных промежутков сравнительно слабо изменяют aberrации и точнее, чем  $\pm 0,03$  мм, их не следует выдерживать. Чувствительны к децентрировке первая поверхность (слабее — вторая) первой линзы, первая и вторая наружные поверхности первого склеенного блока и последняя поверхность второго склеенного блока (биение 0,01—0,02 мм). Чувствительны к децентрировке также склеенные поверхности линз с большим показателем преломления.

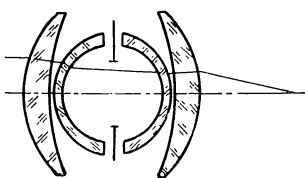


Рис. 33. Схема хода лучей в фотообъективе «Орион»

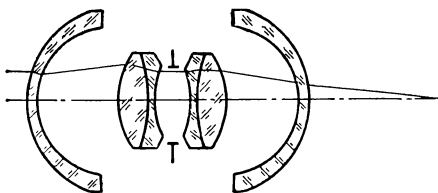


Рис. 34. Схема хода лучей в фотообъективе «Руссар»

**Фотообъектив «Орион»:**  $f' = 20 \div 200$  мм;  $2\omega = 60 \div 90^\circ$  (рис. 33). Приближенные правила не дают правильных выводов в отношении влияния изменения воздушных промежутков на aberrации и децентрировки на качество изображения; для этого необходимо воспользоваться результатами расчета хода лучей. Отклонения всех воздушных промежутков достаточно сильно влияют на изменение aberrаций, и их необходимо выдерживать с погрешностью не более 0,005—0,01 мм. Чувствительными к децентрировке оказываются первая, третья, четвертая, пятая и слабее — последняя поверхность. Вторая, шестая, седьмая поверхности не чувствительны к децентрировке. Важно, чтобы первая линза была хорошо центрирована относительно второй и вместе первая и вторая линзы относительно третьей и четвертой. Последняя поверхность чувствительна к децентрировке; важно, чтобы эта поверхность (а следовательно, и весь объектив) заняла правильное положение относительно общей оси системы (оси оправы или посадочного места).

**Широкоугольный фотообъектив «Руссар»:**  $f' = 20 \div 200$  мм;  $2\omega = 100 \div 120^\circ$ ; относительное отверстие 1:8 (рис. 34). Изменение всех воздушных промежутков сильно влияет на aberrации, поэтому указанные в таблицах толщин (после комплектовки линз по толщинам) воздушные промежутки необходимо выдерживать с погрешностью не более 0,003—0,005 мм. Чувствительны к децентрировке третья поверхность (первая поверхность первого склеенного блока) и восьмая, девятая и десятая поверхности. Важно, чтобы последняя поверхность (вторая поверхность шестой линзы) была центрирована относительно последней поверхности второго склеенного блока и первая поверхность первого склеенного блока была центрирована относительно второго компонента.

Приведенные выше правила и замечания иногда не выполняются конструкторами при разработке конструкций оправ и технологиями при разработке технологического процесса изготовления деталей оправы: не обеспечивается необходимая точность изготовления элементов оправы, не предусматриваются базы для обработки посадочных мест и торцов и их одновременная обработка на одной и той же базе, что и приводит к значительным затруднениям при сборке, снижению качества изображения.

Выполнение рекомендаций, приведенных выше, должно помочь конструкторам и технологам при разработке конструкции и изготовлении оправ и сборке высококачественных оптических систем.

## **28. О МОДЕРНИЗАЦИИ ОПРАВ ФОТООБЪЕКТИВОВ**

При конструировании оправ высококачественных оптических систем следует обращать серьезное внимание на обеспечение с необходимой точностью центрировки оптических поверхностей. Изучение качества сборки объективов зрительных труб и фотообъективов показало, что наиболее частой причиной низкого качества изображения как в центре поля, так и по полю является грубая центрировка оптической системы при сборке, которая является следствием не только погрешностей обработки оправы при их изготовлении и несоблюдения допусков на центрировку линз, но и нерациональной (с точки зрения центрировки) конструкции оправы. Следует иметь в виду, что выдерживание центрировки линз при их изготовлении еще не может гарантировать хорошей центрировки при сборке, так как их базовые поверхности из-за недостаточной длины, например по наружному диаметру, не могут обеспечить точную центровку. С этих позиций и следует рассмотреть конструкции оправ некоторых объективов, учитывая различную чувствительность отдельных поверхностей к децентрировке, рассмотренную выше (п.п. 26 и 27).

**Двухлинзовый склеенный объектив (относительное отверстие 1:4—1:15).** Распространенную конструкцию оправы, которая обеспечивает опору объектива на посадочное место оправы его последней поверхностью, следует считать правильной, если посадочное место под линзы (торец и световой диаметр — внутренний диаметр оправы) обработано точно — за один установ на станке, без биения относительно посадочного места, предназначенного для крепления объектива в корпус прибора. Опорный торец и световой диаметр зажимного кольца должны быть обработаны одновременно или за один установ на станке с нарезанием резьбы, чтобы зажимное кольцо не децентрировало объектив при его креплении (рис. 35). Опора на первую поверхность объектива с закреплением объектива зажимным кольцом со стороны последней поверхности несколько уступает рассмотренному варианту.

**Двухлинзовый несклеенный объектив или первый компонент телеобъективов.** Крепление должно быть аналогично рассмотренному выше, однако совершенно недопустима разнотолщинность воздушного промежутка между первой и второй линзами, что исключается промежуточным кольцом, изготовленным с разнотолщиной не более 0,003—0,005 мм (рис. 36). Такое крепление надежнее обеспечивает центрировку по сравнению с конструкцией, в которой крепление первой и второй линз производится слева и справа и воздушный промежуток между ними выдерживается за счет под-

резки выступа в оправе, в последнем варианте, к тому же требуется еще одно пружинное и зажимное кольцо. При больших диаметрах линзы целесообразно изготовлять разного (на 0,5—2 мм) диаметра, чтобы расточку оправы вести по каждой линзе с необходимым зазором (например, для температурной компенсации).

**Объектив «Индустар 50»** ( $f' = 52,4$  мм; относительное отверстие 1:3,5;  $2\omega = 45^\circ$ ). Объектив в настоящее время изготовляют крупносерийно, поэтому оправа должна быть простой, но не в ущерб

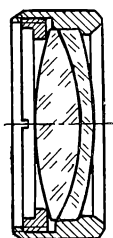


Рис. 35. Оправка двух-линзового склеенного объектива



Рис. 36. Оправка двух-линзового несклеенного объектива

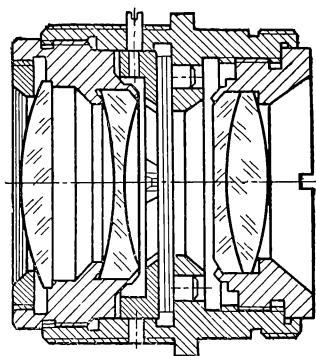


Рис. 37. Оправка фотообъектива «Индустар 50»

качеству изображения. Существующая конструкция оправы (рис. 37) обеспечивает необходимую точность центровки, если сборка производится методом наращивания, т. е. если обработка посадочного места в корпусе под оправу склеенной линзы выполняется на базе резьбы оправы первого компонента. Эту резьбу нарезают при сборке первого компонента — сборку последующего компонента производят на базе предыдущего, чем практически исключают децентрировку посадочных мест. Такая сборка возможна в мелкосерийном и опытным производстве, так как она характеризуется концентрацией сборочных операций на одном рабочем месте и необходимостью использования сборщиков высокой квалификации.

Для устранения недостатков существующей конструкции следует исключить посадочные резьбы оправ первого и второго компонентов, из-за которых в основном и происходит децентрировка линз (децентрировка происходит также при закатке первой и третьей—четвертой линз на автомате). Конструкция оправы с указанными изменениями приведена на рис. 38; для тонкой центровки линз при сборке имеется возможность проворачивания первого и второго компонентов. В существующей конструкции для этой цели производят замену компонентов, что нежелательно, так как нарушается

комплектровка линз по толщине и операция более трудоемка. Кроме того, третью—четвертую линзу было бы целесообразно крепить в корпусе оправы зажимным кольцом.

**Объектив «Индустар 61»:**  $f' = 52,4$  мм; относительное отверстие 1:2,8;  $2\omega = 45^\circ$ . Оправа (рис. 39) разработана применительно к ее сборке методом автоколлимации, т. е. в предварительно изготовленные (с припуском на окончательную обработку посадочных мест) оправы отдельных линз закрепляют первую, вторую и третью—четвертую линзы, затем каждую оправу с линзой устанавливают в специальный патрон токарного станка так, чтобы оптическая ось

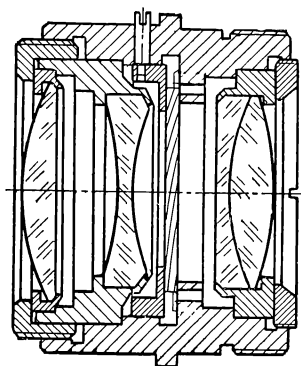


Рис. 38. Модернизация оправы фотообъектива «Индустар 50»

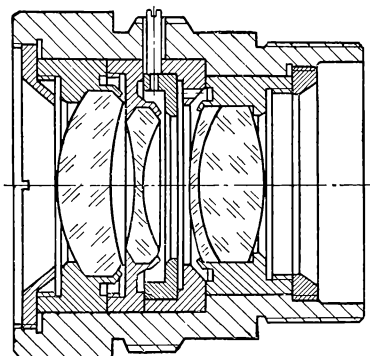


Рис. 39. Оправа фотообъектива «Индустар 61»

линзы совпала с осью вращения шпинделя станка, и выполняют окончательную обработку посадочных мест оправы (наружного диаметра и обоих торцов) — производят центрировку оправы по линзе. При этом методе обработки оправы и сборки объектива центрировка линз обеспечивается с высокой точностью. Подобным же образом выполнены конструкции оправ (рис. 40) высококачественных светосильных и широкоугольных фотообъективов «Мир», «Вега», «Орион», «Руссар». При этом методе без ухудшения качества изображения могут быть снижены требования к точности центрировки линз при их изготовлении — например, до  $0,05—0,1$  мм вместо  $0,01—0,02$  мм. Однако допуск  $0,01—0,02$  мм не обеспечивает необходимой точности центрировки линз в оправках из-за нерациональной конструкции оправ, погрешностей их изготовления и сборки объективов.

**Светосильный киносъемочный объектив «Гелиос» (РО, ОКС:**  $f' = 22 \div 100$  мм; относительное отверстие 1:2;  $2\omega = 45 \div 25^\circ$ ). Существующая конструкция оправы (рис. 41) обеспечивает достаточно высокую точность центрировки только при сборке методом наращивания, когда оправа под следующий компонент обрабатывается окончательно на базе предыдущего уже собранного компонента, что вполне допустимо и оправдано в опытном и мелкосерийном производстве высококачественных фотообъективов. Для крупносерийного

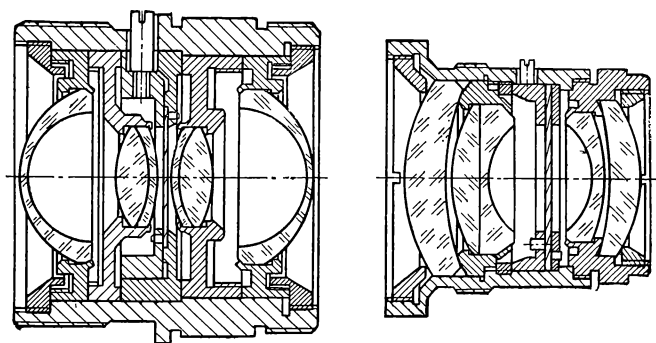


Рис. 40. Оправы фотообъективов «Руссар» и «Вега»

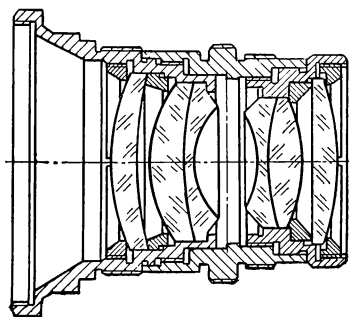


Рис. 41. Оправа фотообъектива «Гелиос»

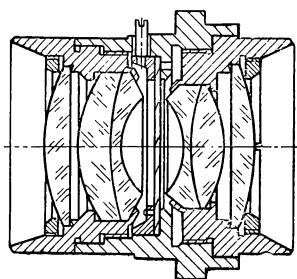
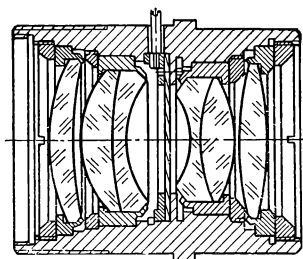


Рис. 42. Модернизация оправы фотообъектива «Гелиос»

Рис. 43. Модернизация оправы фотообъектива РО2 (ОКС)



производства подобная конструкция непригодна и должна быть заменена (рис. 42): она должна состоять из корпуса и двух компонентов, оправы которых должны иметь и направляющие цилиндрические пояски, и резьбу для крепления компонентов в корпусе оправы. В первом компоненте закаткой крепится первый склеенный блок и зажимным кольцом — первая линза, во втором — соответственно второй склеенный блок и шестая линза. По-видимому, большие преимущества имеет модернизация оправы объектива РО2 (рис. 43), когда первая и шестая линзы и склеенные блоки (вторая, третья и четвертая — пятая линзы) крепятся в своих отдельных оправках завальцовкой, а в корпусе — зажимными кольцами. Центрировка в этом случае обеспечивается точным изготовлением оправ и закаткой линз, отсутствием резьбовых соединений (кроме крепежных под

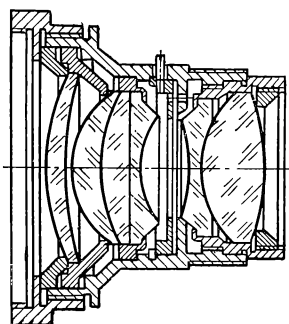


Рис. 44. Оправа фото-объектива «Юпитер 8»

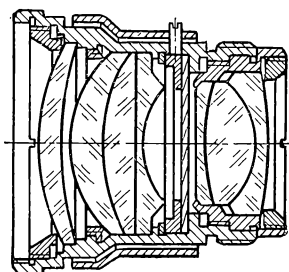


Рис. 45. Оправа фото-объектива «Юпитер 3»

зажимные кольца); становится возможной юстировка (центрировка) поворотом гладких оправ с линзами в корпусе оправы.

**Светосильные объективы «Юпитер 8» и «Юпитер 3»:**  $f' = 52,5$  мм; относительное отверстие 1:2; 1:1,5;  $2\omega = 45^\circ$ . В существующих конструкциях оправы второй компонент (второй склеенный блок) закрепляется в своей оправе зажимным кольцом, а оправка — в корпусе объектива с помощью направляющего цилиндрического пояса и резьбы. Первая линза объектива Ю8 крепится в своей гладкой оправе через гладкое промежуточное кольцо зажимным кольцом, которое через оправу первой линзы закрепляет и первый склеенный блок (рис. 44). В объективе Ю3 первая линза и первый склеенный блок крепятся в общей оправе компонента отдельными зажимными кольцами (рис. 45). При модернизации предлагается крепить завальцовкой первую линзу и первый и второй склеенные блоки в отдельных гладких оправках, которые следует крепить в корпусе оправы зажимными кольцами (или стопором), не требующими точного изготовления (рис. 46 и 47); при этом возможна дополнительная центрировка линз при сборке поворотом отдельных гладких компонентов вокруг их оси.

Однако точность центрировки объективов «Индустар», «Юпитер», «Гелиос» и других — светосильных и широкоугольных — можно

заметно повысить. Для этого следует вместо завальцовки вручную или на автомате (когда точность центрировки зависит от посадки соединения, погрешностей обработки оправ и точности центрировки линз при их изготовлении) в окончательно точно изготовленные гладкие оправы вклеивать отдельные линзы или блоки и при этом

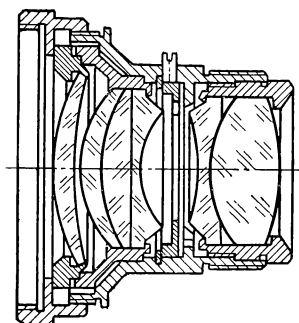


Рис. 46. Модернизация оправы фотообъектива «Юпитер 8»

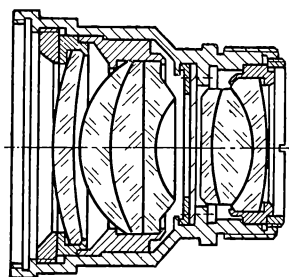


Рис. 47. Модернизация оправы фотообъектива «Юпитер 3»

дополнительно центрировать линзы в оправе в процессе затвердевания клея или герметика. При этом контроль центрировки можно производить с помощью таких же приборов и так же, как при склейке линз в оптическом цехе (рис. 48). В данном случае обес-

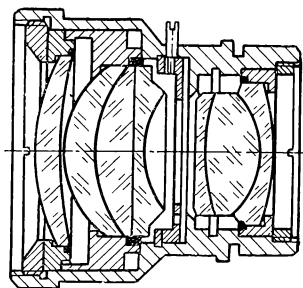
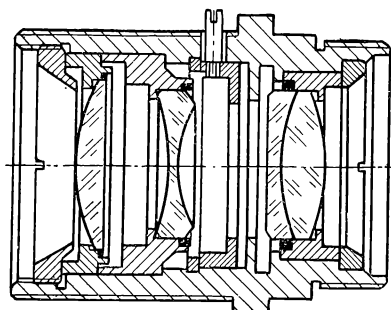


Рис. 48. Крепление линз в оправе клеем или герметиком

печивается такая же высокая точность центрировки, как и при сборке методом автоколлимации, к тому же для выполнения операции не требуются точный станок и сборщик-механик высокой квалификации; требования к центрировке линз при их изготовлении можно снизить до 0,05—0,1 мм без ущерба для качества изображения.



**Телеобъектив «Телемар 7»** ( $f'=1000$  мм; относительное отверстие  $1:7$ ;  $2\omega=24^\circ$ ). Фотообъектив «Телемар 7» применяют для аэрофотосъемки. Существующая конструкция (рис. 49) при точном изготовлении оправы и центровке линз при их изготовлении обеспечивает вполне удовлетворительные центровку и качество изображения. Точность центровки можно повысить креплением от-

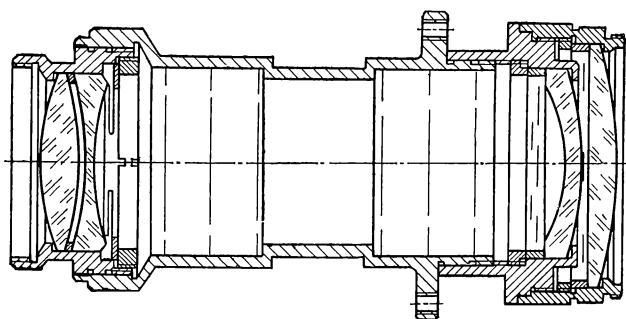


Рис. 49. Оправа фотообъектива «Телемар»

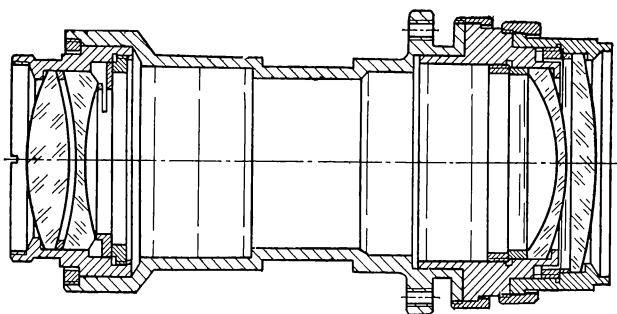


Рис. 50. Модернизация оправы фотообъектива «Телемар»

дельных линз (или блока линз — первой — второй, третьей — четвертой) зажимными кольцами в гладких оправках, а также креплением последних в корпусе объектива зажимными кольцами (рис. 50). Это позволяет дополнительно центрировать линзы при сборке поворотом их вокруг осей оправ. Более высокую точность центровки можно получить, если в окончательно обработанных гладких оправках линзы закреплять вклеиванием или герметиком, при этом центрируя линзы в оправках при затвердевании клея или герметика.

Рассмотренные предложения по модернизации оправ позволяют улучшить качество изображения и упростить сборку распространенного класса оптических систем — объективов зрительных труб, фотообъективов и аэрофотообъективов. Следует обратить внимание

на недопустимость широких цилиндрических поясков оправ, ограничивающих ширину пучков лучей и расположенных по ходу лучей, которые заметно увеличивают светорассеяние, снижают контраст изображения и разрешающую способность.

## 29. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСФОКУСИРОВКУ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Колебание температуры окружающей среды вызывает изменение конструктивных параметров оптической системы — в первую очередь радиусов кривизны, показателей преломления и больших воздушных промежутков, и расстояний от оптической системы до плоскости приемника. Изменение толщины линз из-за незначительной величины оказывается чаще всего несущественным. Непостоянство конструктивных параметров вызывает изменение фокусного и вершинного фокусного расстояния и расстояния до плоскости приемника (сетки, фотоэмульсии, экрана и т. п.), а также — в отдельных системах — aberrаций и ухудшение качества изображения. Задача определения допустимых изменений параметров из-за колебания температуры, при которых расфокусировка и ухудшение качества изображения остаются еще не заметными, относится к области расчета допусков, поэтому она должна решаться так же, как и другие подобные задачи.

Для отдельной тонкой линзы

$$\begin{aligned}\varphi' &= (n - 1) (\rho_1 - \rho_2); \\ \Delta\varphi' &= \frac{\Delta n}{n - 1} \varphi' + (n - 1) (\Delta\rho_1 - \Delta\rho_2) = \\ &= \frac{\Delta n}{n - 1} \varphi' - (n - 1) \left( \frac{\Delta r_1}{r_1^2} - \frac{\Delta r_2}{r_2^2} \right).\end{aligned}$$

Из-за изменения  $\Delta t$  температуры  
 $\Delta r = \alpha \Delta t$ ;  $\Delta n_D = \beta_D \Delta t$ , и теперь

$$\begin{aligned}\Delta\varphi' &= \frac{\beta_D \Delta t}{n - 1} \varphi' - (n - 1) \alpha \Delta t \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \\ &= \frac{\beta_D \Delta t}{n - 1} \varphi' - \alpha \varphi' \Delta t = \left( \frac{\beta_D}{n - 1} - \alpha \right) \varphi' \Delta t = V_t \varphi' \Delta t, \quad (110)\end{aligned}$$

где  $\beta_D$  — температурное приращение показателя преломления для цвета  $D$ ;

$\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  
 $\varphi'$ ,  $\Delta\varphi'$  — оптическая сила линзы и ее изменение;  
 $V_t$  — термооптическая постоянная;

$$V_t = \left( \frac{\beta_\lambda}{n_\lambda - 1} - \alpha_t \right).$$

Согласно формуле (58)

$$\Delta f' \approx \Delta s'_F = -f'^2 \Delta\varphi' = -f'^2 \varphi' V_t \Delta t. \quad (111)$$

Для системы тонких линз на близком расстоянии

$$\Delta\varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_{\mu}}{h_1} \Delta\varphi'_{\mu}; \quad (110a)$$

$$\begin{aligned} \Delta f' &= -f'^2 \Delta\varphi' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_{\mu}}{h_1} \Delta\varphi'_{\mu} = \\ &= -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_{\mu}}{h_1} \varphi'_{\mu} V_{D\mu} \Delta t. \end{aligned} \quad (112)$$

Условие отсутствия расфокусировки (без учета изменения корпуса — расстояния от последней поверхности системы до плоскости приемника):

$$\begin{aligned} \Delta\varphi' = 0; \quad \Delta f' = \Delta s' = 0; \quad \sum_1^k \frac{h_{\mu}}{h_1} \varphi'_{\mu} V_{D\mu} \Delta t = 0; \\ \sum_1^k \frac{h_{\mu}}{h_1} \varphi'_{\mu} V_{D\mu} = 0. \end{aligned} \quad (113)$$

Условие отсутствия расфокусировки с учетом оправы:

$$\begin{aligned} \sum_1^k l_v \alpha_v \Delta t - \Delta f' = 0; \quad \sum_1^k l_v \alpha_v \Delta t + \\ + f'^2 \sum_1^k \frac{h_{\mu}}{h_1} \varphi'_{\mu} V_{D\mu} \Delta t = 0; \end{aligned} \quad (114)$$

$$-f'^2 \sum_1^k \frac{h_{\mu}}{h_1} \varphi'_{\mu} V_{\mu} = \sum_1^k l_v \alpha_v. \quad (114a)$$

Очевидно, для исключения изменения хроматической аберрации положения равенство (113) должно удовлетворяться для всей рабочей области спектра, т. е. при подстановке в него величин  $V_{\lambda}$ , например, для визуальных приборов  $V_C$  и  $V_F$ . Для систем конечной толщины, состоящих из отдельных тонких компонентов со значительным воздушным промежутком  $d$  между ними,  $\Delta f'$  и  $\Delta s'_F$  можно подсчитывать по следующим очевидным формулам: а) при подсчете  $\Delta s'_F$  и  $\Delta f'$  из-за изменения  $r$  и  $n$  линз первого компонента:

$$\Delta s'_F = \Delta s'_{F1} \beta_{II}^2 = -s'^2_{F1} \Delta\varphi'_1 \beta_{II}^2; \quad (115)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \Delta \varphi'_I (1 - d \varphi'_{II}), \quad (116)$$

где  $s'_{F_I}$ ,  $\Delta s'_{F_I}$  — второе вершинное фокусное расстояние первого компонента и его изменение;

$d$  — расстояние между первым и вторым компонентом;  
 $\varphi'_{II}$  — оптическая сила второго компонента;

величину  $\Delta \varphi'_I$  подсчитывают по формуле (110а);

б) при подсчете  $\Delta s'_F$  и  $\Delta f'$  из-за изменения  $r$  и  $n(V_i)$  второго компонента пользуются обычными формулами

$$\Delta s'_F = -s'^2_F \Delta \varphi'_{II}; \quad (115a)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \frac{h_{II}}{h_I} \Delta \varphi'_{II}, \quad (116a)$$

где  $\Delta \varphi'_{II}$  — изменение оптической силы второго компонента, которое подсчитывают также по формуле (110а).

Влияние изменения воздушного промежутка  $d$  между первым и вторым компонентом на изменение фокусного и вершинного расстояния определяют по формулам

$$\Delta s'_F = -\Delta d \beta_{II}^2; \quad (117)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \Delta \varphi' = -f'^2 \Delta d \varphi'_I \varphi'_{II}. \quad (118)$$

Вершинное фокусное расстояние в телеобъективе при колебании температуры является постоянным, если сумма его изменений за счет отклонения радиусов и показателей преломления линз первого и второго компонентов и воздушного промежутка между ними равна нулю, т. е.

$$\begin{aligned} & -s'^2_{F_I} \beta^2 \sum_1^k \left( \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu V_\mu \Delta t \right)_I - \\ & - s'_{F'} \sum_1^k \left( \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu V_\mu \Delta t \right)_{II} - \Delta d \beta_{II}^2 = 0. \end{aligned} \quad (119)$$

Если требуется рассчитать телеобъектив так, чтобы изменение его параметров при колебании температуры вызывало такое же изменение вершинного фокусного расстояния, как и длины корпуса прибора от последней поверхности объектива до плоскости приемника, определяемое по формуле

$$\Delta p_C = \sum_1^k l_{\nu} \alpha_{\nu} \Delta t, \quad (120)$$

то в правую часть формулы (119) следует поставить величину, определяемую по формуле (120).

Из формул (115), (115а), (117) следует, что существенное влияние на расфокусировку в телеобъективах оказывает изменение  $r$ ,  $n$  линз первого компонента (в 6—8 раз сильнее, чем второго), а также изменение воздушного промежутка между компонентами. Опыт показывает, что применение необычных марок стекла при расчете объективов с целью компенсации  $\Delta s'_F$  (изменения вершинного фокусного расстояния) за счет изменения длины  $\Delta l$  корпуса прибора приводит к ухудшению качества изображения (к затруднениям в устранении аберраций) и к необходимости назначения более узких допусков на подгонку под пробное стекло и центровку. Особенно неблагоприятно это проявляется при использовании для оправы материалов с большим коэффициентом линейного расширения (например, алюминиевых сплавов). Поэтому целесообразнее фокусировку (устранение расфокусировки) производить не за счет выбора марок стекла, когда при изменении  $t$  изменяются  $f'$ ,  $s'_F$  и аберрации системы (хотя и компенсируется изменение рабочего расстояния вследствие изменения длины корпуса прибора), а за счет или с помощью других устройств, например, применением для корпуса прибора материалов с малым коэффициентом линейного расширения.

Для двухлинзового тонкого объектива (без учета оправы) формулы упрощаются:

$$\Delta f' \approx \Delta s'_F = 0; \quad \varphi'_1 V_1 + \varphi'_2 V_2 = 0; \quad \varphi'_1 V_1 = -\varphi'_2 V_2.$$

Так как в объективе обычно устраняется продольная хроматическая аберрация, т. е. выполняются условия

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0; \quad \frac{\varphi'_1}{v_1} = -\frac{\varphi'_2}{v_2}; \quad \varphi'_2 = -\frac{v_2}{v_1} \varphi'_1,$$

то формула (113) примет вид

$$\varphi'_1 V_2 = \frac{v_2}{v_1} \varphi'_1 V_1; \quad V_1 = \frac{v_2}{v_1} V_2; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_2}{v_1}; \quad (121)$$

$$V_2 = \frac{v_1}{v_2} V_1 \approx (1,5 \div 2) V_1. \quad (121a)$$

Из формулы следует, что в двухлинзовом объективе для исключения расфокусировки из-за изменения температуры (без учета оправы) для положительной и отрицательной линз необходимо брать марки стекла с термооптическими постоянными  $V_D$ , обратно пропорциональными их коэффициентам средней дисперсии  $v_D$ . В этом случае удовлетворительные результаты могут дать комбинации стекол: ТК21, БФ23, К8, БК13 и БФ4 с ТФ1, ТК9, БК9 с ТФ7; БКФ, ТК4 и К20 с ТФ4 и ТФ5; БК10, К18, ТК8, ТК23 с Ф2 и Ф6; ТК23, К20 с Ф1, Ф4, Ф7 и Ф13 и др.

Выполнение условия (121) позволяет также при изменении температуры оставлять неизменной и сферическую аберрацию. Приведенные комбинации стекол и выполнение условия (121) позволяют сохранить неизменными фокусное и вершинное фокусное расстояние, что свидетельствует о неизменности аберраций, сохранении качества изображения: следует при расчете системы обеспечить постоянство фокусного и вершинного фокусного расстояния отдельных тонких компонентов при изменении температуры.

Однако в отдельных системах, например в коллиматорных устройствах (объективах) с небольшим относительным отверстием и полем зрения, целесообразно устранить расфокусировку системы с учетом изменения длины трубы (расстояния от последней поверхности объектива до плоскости сетки); в этом случае должно удовлетворяться условие по формуле (114а). Например, для двухлинзовых объективов коллиматоров в стальной трубе постоянно установки на бесконечность сохраняется, если использовать комбинации стекол ТК17 с ТФ3 и ТФ4; БК4, ТК20 и ТК21 с ТФ12 и несколько хуже — БК4 с ТФ10. Для объективов коллиматоров в трубе из алюминиевых сплавов можно использовать в этом случае комбинации стекол ЛК3 и ТФ12, СТК8 и ТФ10, т. е. приходится использовать уже необычные стекла.

Приведенные формулы позволяют сделать целесообразный выбор марок стекла, чтобы обеспечить нерасстраиваемость системы или произвести анализ расстраиваемости системы. Более подробно влияние изменения температуры на качество изображения и расфокусировку рассмотрено проф. Г. Г. Слюсаревым [10].

### 30. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

При изменении температуры не остаются постоянными показатели преломления, радиусы кривизны, толщины линз и воздушные промежутки, что может привести к изменению (заметному в длиннофокусных системах) не только фокусного и вершинного фокусного расстояний, но и аберраций системы. Например, изменение хроматической аберрации положения можно просто определить, если вычислить по формуле (112) или (115), (115а) и (117) изменение  $S'_{F'} (\Delta S'_{F'})$  для двух крайних длин волн (цветов) спектральной кривой чувствительности приемника (для визуальных систем  $F$  и  $C$ ). Оказывается, например, что для объектива с  $f'=500$  мм, относительным отверстием 1:10, из стекла К8 и Ф1 ( $f'_1=210$  мм;  $f'_2=-365$  мм) при изменении температуры на  $60^\circ$  хроматизм положения изменяется на величину

$$\Delta ds'_{xp} = -f'^2 \Delta t [V'_1 (V_F - V_C)_1 + V'_2 (V_F - V_C)_2] \approx \\ \approx -500^2 \cdot 60^\circ \left[ \frac{1}{210} (-14 + 25) - \frac{1}{365} (24 - 3) \right] 10^{-7} = 0,0075 \text{ мм.}$$

Здесь для стекла К8  $V_F = -14 \cdot 10^{-7}$ ;  $V_C = -25 \cdot 10^{-7}$  и для стекла Ф1  $V_F = 24 \cdot 10^{-7}$ ;  $V_C = 3 \cdot 10^{-7}$ .

Для комбинации стекол К8 и ТФ1 ( $f'_1=234$  мм;  $f'_2=-442,0$  мм)

$$\Delta ds'_{xp} = -500^2 \cdot 60^\circ \left[ \frac{1}{234} (-14 + 25) - \right. \\ \left. - \frac{1}{442} (-13 + 38) \right] 10^{-7} = 0,018 \text{ мм.}$$

Здесь для стекла ТФ1  $V_F = -13 \cdot 10^{-7}$ ;  $V_C = -38 \cdot 10^{-7}$ .

Для комбинации стекол БФ23 и ТФ1 ( $f'_1=146,5$  мм;  $f'_2=-206,5$  мм)

$$\Delta ds'_{xp} = -500^2 \cdot 60 \left[ \frac{1}{146,5} (-7 + 24) - \frac{1}{206,5} (-13 + 38) \right] 10^{-7} = -0,007 \text{ мм.}$$

Стекло БФ23 имеет  $V_F = -7 \cdot 10^{-7}$ ;  $V_C = -24 \cdot 10^{-7}$ ;  $v_D = 52,4$ .

Для расстраивающейся комбинации стекол К8 и ТФ10  $v_1=64,1$ ;  $v_2=25,3$  ( $f'_1=300,0$  мм;  $f'_2=-759,0$  мм);  $\Delta ds'_{xp}=0,03$  мм.

Для комбинации стекол ТК17 и ТФ4  $\Delta ds'_{xp}=0,06$  мм при  $f'=500$  мм, т. е. становится заметным. Таким образом, можно сделать вывод, что даже и в сравнительно длиннофокусных объективах хроматизм положения практически остается неизменным при изменении температуры. Это можно объяснить тем, что в объективах с исправленной хроматической аберрацией используются кроны или баритовые флинт в комбинации с флинтами или тяжелыми флинтами, у которых приближенно

$$\frac{(V_F - V_C)_1}{(V_F - V_C)_2} \approx \frac{v_2}{v_1} = -\frac{\Phi'_2}{\Phi'_1} = -\frac{f'_1}{f'_2},$$

и приводит к компенсации изменения хроматизма положения при изменении температуры. Указанное соображение остается справедливым и для более сложных компонентов и систем.

Все-таки при расчете длиннофокусных нерасстраивающихся систем, например с  $f' > 500$  мм, следует выбирать марки стекол таким образом, чтобы для отдельных тонких компонентов имело место хотя бы приближенное равенство

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \Phi'_\mu (V_F - V_C)_\mu = 0. \quad (122)$$

Изменение аберраций можно свести к минимуму, если целесообразно выбрать марки стекол отдельных линз системы, т. е. тем самым обеспечить неизменность аберраций, вносимых каждым компонентом системы. Например, в области аберраций третьих порядков изменение сферической аберрации из-за изменения показателя преломления при колебании температуры подсчитывают по формуле

$$\begin{aligned} \Delta ds'_k &= -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu = \\ &= -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 \frac{dA_\mu}{dn_\mu} (\beta_D \Delta t)_\mu. \end{aligned} \quad (123)$$

Обычно величина изменения линзовых коэффициентов обратно пропорциональна фокусному расстоянию линз [6], поэтому, если брать марки стекол отдельных — положительных и отрицательных линз (на близком расстоянии) с  $\beta_D$ , пропорциональными их фокусному расстоянию, то сферическая аберрация (да и другие аберра-

ции) останется неизменной при изменении температуры. Например, для двухлинзового объектива из стекол ТК14 и Ф1, сферическая aberrация была бы неизменной, если бы  $\frac{\beta_{D_1}}{\beta_{D_2}} = -\frac{\varphi_2'}{\varphi_1'} = \frac{v_2}{v_1}$  при

$$\varphi_1' = 1; \frac{dA_1}{dn_1} = 144,05; \frac{dA_2}{dn_2} = -66,2; v_1 = 60,6; v_2 = 36,9; v_2/v_1 = 0,61; dA_2/dn_2 : dA_1/dn_1 = 0,457.$$

В действительности  $\beta_D = 21 \cdot 10^{-7}$ ; для стекла ТК14 и  $\beta_D = 49 \cdot 10^{-7}$ , для стекла Ф1, т. е.  $\frac{\beta_1}{\beta_2} = 0,43$  и изменение сферической aberrации, например при  $\Delta t = 60^\circ$ ,

$$\Delta \delta s'_k = -\frac{1}{2} 12,5^2 \cdot 100^2 \cdot 60 \left( \frac{144,05 \cdot 21 - 66,2 \cdot 49}{100^3} \right) 10^{-7} \approx \approx 0,01 \text{ мм}$$

является малой величиной. В знаменателе  $f^{1^3} = 100^3$ , так как  $dA$  при  $f' = 100$  мм в  $f^{1^3}$  раз меньше, чем при  $f' = 1$ .

Изменение радиусов кривизны при колебании температуры вызывает отклонение aberrаций от значений в основной системе; например, для сферической aberrации

$$\begin{aligned} \Delta \delta s'_k &= -0,5 h_1^2 f'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \frac{dA_v}{d\rho_v} \left( \frac{r\alpha\Delta t}{r^2} \right)_v = \\ &= -0,5 \Delta t h_1^2 f'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \frac{dA_v}{d\rho_v} \cdot \frac{\alpha_v}{r_v}. \end{aligned}$$

Для того же объектива с  $f' = 100$  мм, относительным отверстием 1:4, из стекла ТК14 ( $\alpha = 63 \cdot 10^{-7}$ ;  $v = 60,6$ ) и Ф1 ( $\alpha = 71 \cdot 10^{-7}$ ;  $v = 36,9$ );  $\Delta t = 60^\circ$

$$\begin{aligned} \Delta \delta s'_k &= -\frac{0,5 \cdot 60 \cdot 12,5^2 \cdot 100^2}{100^3} \left[ \left( \frac{24,4}{64,42} - \frac{49,9}{-39,75} \right) 63 \cdot 10^{-7} + \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{28,96}{-38,84} - \frac{6,84}{-737,87} \right) 71 \cdot 10^{-7} \right] = 0,024 - \end{aligned}$$

величина незначительная.

Из этих формул можно сделать вывод, что сумма  $\frac{dA_v}{d\rho_v}$  для положительной и отрицательной линз примерно пропорциональна их оптическим силам или пропорциональна их коэффициентам дисперсии, поэтому  $\sum_{v=1}^{v=k} \frac{dA_v}{d\rho_v} \cdot \frac{\alpha_v}{r_v}$  для всей системы поло-

жительных и отрицательных линз практически равна нулю, если коэффициенты линейного расширения стекол прямо пропорциональны



фокусным расстояниям положительной и отрицательной линз; это условие невыполнимо (таких марок стекол нет). Однако в среднем  $\alpha$  флинтов несколько больше  $\alpha$  кронов и тяжелых кронов.

Таким образом, влияние изменения температуры сказывается существенно только на положении плоскости изображения, не вызывая при этом заметного изменения аберраций. Снижение качества изображения связано с градиентом температуры в объеме детали, что приводит к изменению формы поверхностей деталей. Наиболее чувствительными являются отражающие поверхности зеркал и призм и внутренние поверхности линз несклеенных объективов или первых компонентов телеобъективов.

## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

### 31. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ДОПУСКОВ НА ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ И ПРИЗМ

**Зеркало, расположенное перед аэрофотообъективом.** Требуется определить допуск на подгонку под пробное стекло зеркала с наружным отражающим слоем размером  $220 \times 300$ , расположенного под углом  $45^\circ$  к оси перед аэрофотообъективом. Фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 2000$  мм, относительное отверстие  $1:10$  и разрешающая способность в центре поля 35 линий/мм.

Глубина резкости в фокальной плоскости объектива

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{35} f'_{об} / D_p = 0,03 \cdot 10 = \pm 0,3 \text{ мм.}$$

Допускаем астигматизм вследствие отклонения от плоскостности в  $1/3$  от всей глубины резкости, т. е.  $a_{то, доп} \leq 0,3/3 = 0,1$  мм или  $a_{то, доп} \leq 0,01 f'_{об} / D_p = 0,1$  мм. Допуск на отклонение от плоскостности определяем по формуле (79а) или табл. 5:

$$N_{доп} \leq 321 \frac{D^2 a_{то, доп}}{f'^2_{об}} = 321 \frac{300^2 \cdot 0,1}{2000^2} \approx 1,0.$$

Если фокусировка АФА производится совместно с зеркалом, то допуск можно расширить до  $N=2$  (двух колец), что для диаметра  $D=300$  мм является сравнительно узким допуском. Для расчета допуска на искривление колец  $\Delta N$  воспользуемся формулой

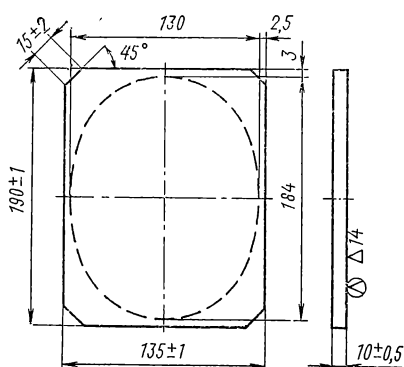
$$\Delta N_m = (N_m \text{ при } N_s = 0) = \frac{0,5 \cdot 321 a_{то, доп} D^2}{f'^2_{об}} = 0,35,$$

или табл. 6, т. е. в меридиональном сечении зеркала можно допустить число колец на 0,35 большее, чем в сагиттальном сечении, а более благоприятными являются отклонения, при которых кольца вытянуты в меридиональном сечении. Для зеркала следует взять стекло ЛК5 или МКР1 с малым  $\alpha = 33 \cdot 10^{-7}$  и толщиной 45—50 мм.

На рис. 51 показаны элементы чертежа зеркала, расположенного перед фотообъективом с  $f'=130$  мм; относительным отверстием  $1:1$ ; на рис. 52 — зеркала, расположенного перед фотообъективом с  $f'=1000$  мм;  $1:7$  и на рис. 53 — зеркала, расположенного за фотообъективом на расстоянии 20—25 мм от плоскости пленки под углом  $45^\circ$  к оси. В примечании к чертежу указывают:

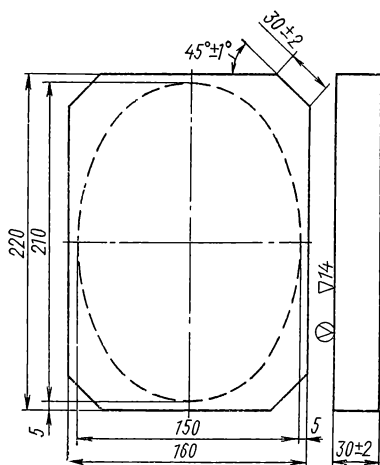
1. Зеркальн. ИИ.21Е по ТУ 2. На полированной поверхности не должно быть расшлифованных пузырей диаметром более 0,3 мм;

3. Фаски на ребрах  $1^{+0,4} \times 45^\circ$  и фаски на углах  $1,5^{+0,5} \times 45^\circ$  (рис. 51),  $1,5^{+0,5} \times 45^\circ$  и  $2^{+0,5} \times 45^\circ$  (рис. 52) и фаски на ребрах со стороны плоскости Б  $0,5^{+0,3} \times 45^\circ$  и на остальных ребрах фаски



▽6(▽)	
$\Delta n_D$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
Однородн.	—
Дв. лучепр.	3
Светопогл.	—
Бессвильн.	—
Пузырн.	5Г
N	5
$\Delta N$	1
P	V
$\Delta R$	3

Рис. 51. Элементы чертежа зеркала, расположенного перед объективом с  $f' = 130$ ; 1:1 под углом  $45^\circ$  к оси; материал: стекло К8



▽6(▽)	
$\Delta n_D$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
Однородн.	—
Дв. лучепр.	3
Светопогл.	—
Бессвильн.	—
Пузырн.	х)
N	0,3 <sup>хх)</sup>
$\Delta N$	0,1 <sup>хх)</sup>
P	V
$\Delta R$	1

Рис. 52. Элементы чертежа зеркала, расположенного перед фотообъективом с  $f' = 1000$ ; 1:7 под углом  $45^\circ$  к оси; материал: стекло МКМ или ЛК5

$0,1^{+0,2} \times 45^\circ$  (рис. 53). В примечании к рис. 55 при весьма строгих требованиях к поверхности указывают, что предпочтительно отклонение в виде вытянутых вдоль длинной стороны колец до  $N_{дл} =$

$=0,5 N_{\text{кор}}$  на том же диаметре. Из этих примеров следует, каким образом от характеристик системы и места зеркала в системе зависят допуски  $N$  и  $\Delta N$  на подгонку под пробное стекло и как выбираются материал и толщина детали.

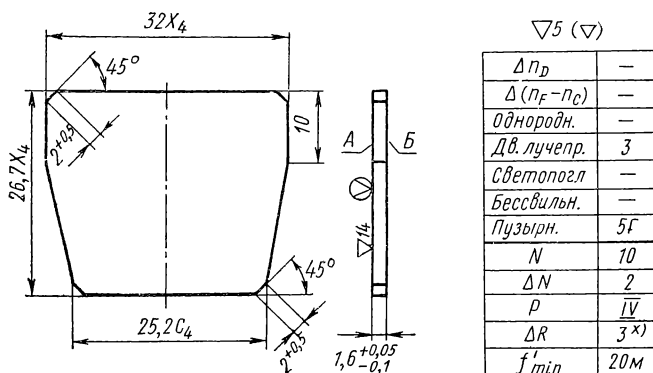


Рис. 53. Элементы чертежа зеркала, расположенного под углом  $45^\circ$  к оси фотоаппарата «Зенит» за объективом на расстоянии 20—25 мм от пленки; материал: стекло К8 или СВВ

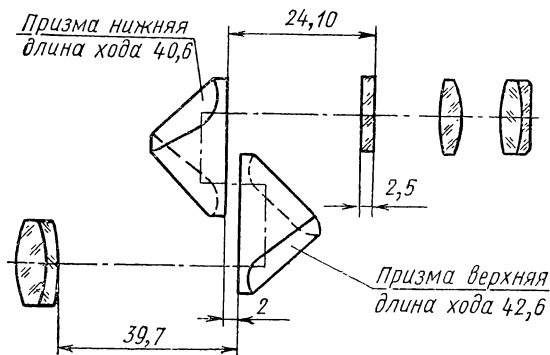


Рис. 54. Оптическая схема бинокля

**Призмы бинокля.** Требуется рассчитать допуски на подгонку под пробное стекло отражающих поверхностей призм бинокля, расположенных за объективом (рис. 54). Увеличение бинокля  $6\times$ , фокусное расстояние объектива  $f' = 122,94$  мм; фокусное расстояние окуляра  $f'_{\text{ок}} = 20,6$  мм; стекло призм К8 ( $n_D = 1,5163$ ).

Принимаем величину допустимого астигматизма со стороны глаза вследствие отклонения отражающих поверхностей призм от плоскостности в  $0,1$  дптр, равное действию этих поверхностей на

появление астигматизма (для каждой поверхности и призмы) и арифметическое сложение предельных отклонений. Тогда на долю одной поверхности можно принять допустимый астигматизм 0,025 дптр. Поверхность верхней призмы от фокальной плоскости находится (в среднем) на расстоянии

$$l_1 = f' - 39,7 - \frac{42,6}{2 \cdot 1,5} = 122,94 - (39,7 + 14,2) \approx 69 \text{ мм}$$

и поверхность нижней призмы на расстоянии

$$l_2 = l_1 \frac{1}{1,5} \left( \frac{42,6}{2} + \frac{40,6}{2} \right) = 69 \cdot 27,7 = 41,3 \text{ мм.}$$

Допуск на отклонение от плоскостности поверхности верхней призмы вычисляем по формуле (80а):

$$N_{\text{доп}} \leq \frac{0,208 D^2 a_{\text{то, доп}}}{6^2} \left( \frac{f'}{l_1} \right)^2 = \frac{0,208 \cdot 31^2 \cdot 0,025}{6^2} \times \\ \times \frac{(122,94)^2}{69^2} = 0,208 \cdot 26,6 \cdot 0,025 \cdot 3,16 = 0,44 \approx 0,5;$$

$$N_{\text{доп, нижн}} \leq 0,208 \cdot 26,6 \cdot 0,025 \cdot 8 = 1,23 \approx 1,0.$$

Отклонение от правильной сферы для поверхностей, расположенных под углом  $45^\circ$ , можно взять из табл. 6 равным 0,5  $N_{\text{доп}}$ , т. е. для верхней призмы  $\Delta N = 0,25$  и для нижней  $\Delta N = 0,5 \div 0,3$ . Допуски можно несколько расширить (до  $N_{\text{верхн}} = 1$  и  $N_{\text{нижн}} = 2$ ), если известно, что оптический цех изготавливает лишь небольшое число призм с предельными отклонениями поверхностей от плоскостности и в этом случае можно принять квадратичное сложение предельных отклонений.

В чертежах серийного производства указаны неправильные, слишком узкие допуски: для верхней призмы  $N = 0,3$ ;  $\Delta N = 0,1$  и нижней  $N = 0,3$ ;  $\Delta N = 0,1$ .

**Зеркала прибора для чтения.** Рассчитать допуски на подгонку под пробное стекло отражающих поверхностей зеркал прибора для чтения, размеры которых и расположение указаны на рис. 55. Увеличение прибора переменное:  $10\times$  и  $20\times$ , визуальная разрешающая способность объектива И50 в центре поля не менее 200 полос на 1 мм. Зеркала не должны снижать разрешающую способность.

Допускаем астигматизм в плоскости диапозитива не более

$$a_{\text{то, доп}} \leq 0,005 \cdot 3,5 \left( 1 + \frac{\Delta x'}{f'_{\text{об}}} \right) = 0,005 \cdot 3,5 \left( 1 + \frac{5,6}{52,4} \right) \approx 0,02,$$

так как в этом случае относительное отверстие равно  $D_p/(f' + x)$ . В плоскости экрана этой величине соответствует

$$a_{\text{то, доп}} \leq 0,02 \beta^2 = 0,02 \cdot 10^2 = 2 \text{ мм для } \beta = 10\times;$$

$$a_{\text{то, доп}} \leq 0,005 \cdot 3,5 \left( 1 + \frac{3,1}{52,4} \right) 20^2 = 7,3 \text{ мм для } \beta = 20\times.$$

Этот допуск берем для первого зеркала, так как допуски на второе зеркало широкое. Допуск на подгонку под пробное стекло первого зеркала определяем по формуле (79а): при  $\beta=10^x$

$$N = \frac{320 \cdot 205^2 \cdot 2}{510^2} = 103,5 \text{ на весь диаметр (205 мм).}$$

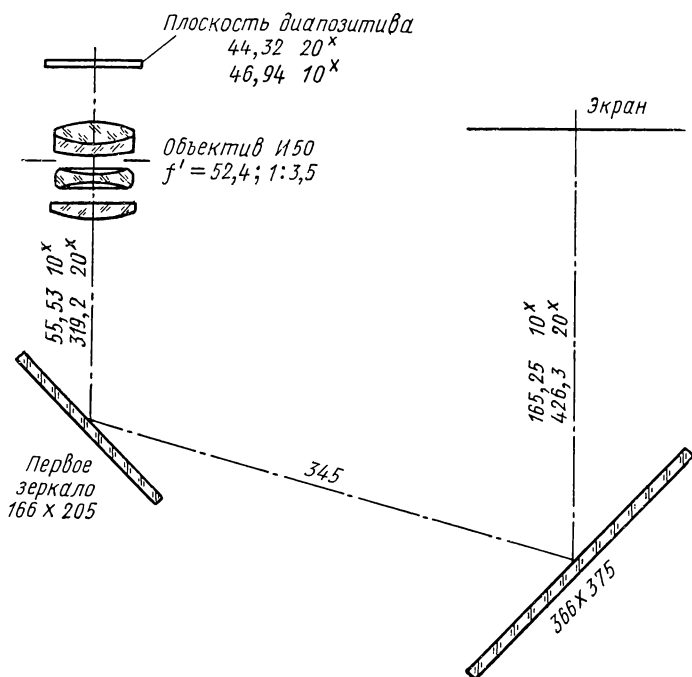


Рис. 55. Оптическая схема прибора для чтения

При проверке качества поверхности пробным стеклом диаметром 50 мм  $N = \frac{103,5}{\left(\frac{205}{50}\right)^2} = 6; \Delta N = 0,5N = 3$ .

При  $\beta=20^x$   $N = \frac{320 \cdot 205^2 \cdot 7,3}{770^2} = 166$ ; на поверхность диаметром 50 мм приходится  $N=10$ .

В чертеж вносим  $N=5; \Delta N=1$ .

Для второго зеркала:

при  $\beta=10^x$   $N = \frac{320 \cdot 380^2 \cdot 2}{165^2} = 3400$  на диаметр 380 мм; на диаметр 50 мм  $N=60$ ;

при  $\beta = 20^\circ$   $N = \frac{320 \cdot 380^2 \cdot 7,3}{426^2} = 320 \cdot 7,3 \cdot 0,8 = 1870$ ; на диаметр 50 мм приходится  $N=30$ .

В чертеж вносим  $N=10$ ;  $\Delta N=2$ . Требования к точности не строгие, можно взять стекло К8 и толщину зеркал 8—10 мм.

**Призмы стереотрубы.** Рассчитать допуски на подгонку под пробное стекло отражающих поверхностей призм стереотрубы, увеличение которой  $10^\times$ , фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 275,76$  мм, фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок} = 27,46$  мм, диаметр выходного зрачка 5 мм.

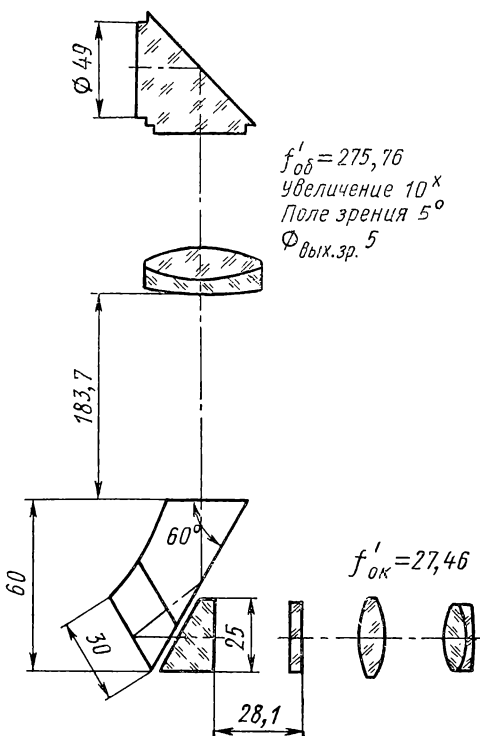


Рис. 56. Оптическая схема стереотрубы: увеличение  $10^\times$ , поле зрения  $5^\circ$ , объектив  $f' = 275,76$ ; окуляр  $f' = 27,46$

Размеры и положение призм в системе указаны на рис. 56. Угол  $i$  осевого луча с нормалью к поверхности крыши призм определяют по формуле

$$\cos i = \cos 45^\circ \cos \varphi,$$

где  $\angle 45^\circ$  — угол проекции осевого луча с нормалью к поверхности;  $\varphi$  — угол наклона ребра крыши к осевому лучу (нормали к ребру крыши).

Для башмачной призмы  $\varphi = 15^\circ$ , и тогда  $\cos i = \cos 45^\circ \cos 15^\circ = 0,707 \cdot 0,967 = 0,683$ .

В первом приближении принимаем равное действие отклонений от плоскостности всех четырех отражающих поверхностей и арифметическое сложение предельных. Допускаем астигматизм со стороны глаза не более 0,1 дптр, на одну поверхность — не более 0,025 дптр.

Для головной призмы

$$N_{\text{доп}} \leq 0,208 \frac{D^2 a_{\text{то. доп}}}{\Gamma^2},$$

т. е.

$$N_{\text{доп}} \leq 0,208 \frac{75^2 (0,025)}{10^3} = 0,3; \quad \Delta N = 0,15.$$

Для отражающей поверхности призмы Пехана

$$N_{\text{доп}} \leq \frac{0,227 \cdot 70^2 \cdot 0,025}{1,5 \cdot 10^2 \left(0,5 - \frac{1}{0,5}\right)} \left(\frac{275,76}{75}\right)^2 = 1,77 \approx 2;$$

$$\begin{aligned} \Delta N &\leq \frac{0,227 D^2 a_{\text{то. доп}} \cos i}{\Gamma^2 n} \left(\frac{f'_{\text{об}}}{l}\right)^2 = \\ &= \frac{0,227 \cdot 49 \cdot 0,025 \cdot 0,5 \cdot 14,4}{1,5} = 1,32 \approx 0,75 N_{\text{доп}}. \end{aligned}$$

Для одной из поверхностей крыши

$$\begin{aligned} N_{\text{доп}} &\leq \frac{0,227 \cdot 30^2 \cdot 0,025}{1,5 \cdot 10^2 \left(0,683 - \frac{1}{0,683}\right)} \left(\frac{275,76}{50}\right)^2 = \\ &= \frac{0,227 \cdot 9 \cdot 0,025}{1,5 \cdot 0,78} \cdot 30,3 = 1,3; \end{aligned}$$

$$\Delta N \leq \frac{0,227 \cdot 30^2 \cdot 0,025 \cdot 0,683}{1,5 \cdot 10^2} \cdot 30,3 = 0,7 \approx 0,5 N_{\text{доп}}.$$

В последнем случае мы получили сравнительно широкие допуски. Это объясняется тем, что ребро крыши призмы Пехана расположено почти перпендикулярно к осевому лучу ( $i \ll 45^\circ$ ), и в основном тем, что оно находится близко от фокальной плоскости.

Так как для головной призмы оказался слишком узкий допуск на подгонку под пробное стекло, целесообразно для нее допуск расширить до  $N=1$ ;  $\Delta N=0,3$ , сузив допуски на отражающие поверхности призмы Пехана, т. е. взяв на отражающую поверхность  $N=1$ ;  $\Delta N=0,5$  и на поверхности крыши  $N=1$  и  $\Delta N=0,5$ . Эти допуски можно дополнительно расширить, если известно, что оптический цех изготавливает лишь небольшое число поверхностей, с пре-



дельными отклонениями (можно допустить не арифметическое, а квадратичное сложение предельных отклонений поверхностей от плоскостности).

В чертежах серийного производства указаны допуски: для отражающей поверхности головной призмы  $N=1$ ;  $\Delta N=0,2$ ; для призмы Пехана: отражающей поверхности  $N=2$ ;  $\Delta N=0,5$ ; поверхности крыши  $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,1$ , т. е. на поверхности крыши допуски слишком узкие. Допуск на угол крыши  $90^\circ$  составляет  $\pm 5''$ , на клин —  $N=3$ ;  $\Delta N=0,5$ . Также слишком узки и допуски  $\Delta N$  для головной призмы и поверхностей крыши.

## **32. ДОПУСКИ НА ПОДГОНКУ ПОД ПРОБНОЕ СТЕКЛО СКЛЕЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Из литературы следует, что склеивание оптических деталей впервые применил Алексис-де-Рошон, известный под именем аббата Рошона. В своих трудах, изданных почти 200 лет назад (в 1783 г.), он пишет, что применение прозрачной жидкости между поверхностями ахроматического объектива значительно улучшает его и ослабляет влияние неточностей изготовления четырех внутренних поверхностей тройного объектива. Вначале применяли чистую воду, затем масло, однако в связи с постепенным испарением их применение оказалось нецелесообразным. В 1785 г. Грателу предложил использовать для склеивания смолу, родственную пихтовому бальзаму. С тех пор для склейки линз и других деталей в основном применялся бальзам и только для склейки поляризационных призм — льняное масло и затем винилит и акриловый клей ( $n_D=1,48$ ). Однако бальзам не обеспечивает необходимой прочности склейки при изменении температуры от  $-60$  до  $+60^\circ \text{C}$ , чувствителен к появлению натяжений при креплении линз в оправе, легко растворяется в растворителях при чистке. Были разработаны новые клеи — бальзамин (в 1938 г.) и в последние годы ОК50, ОК72ф, бальзамин М, которые не имеют недостатков, свойственных бальзаму.

При выборе клея необходимо учитывать его термостойкость, нерастворимость, устойчивость к действию влаги, тропического климата и морской воды, надежность склейки линз большого диаметра, простоту приготовления и склейки. Эти основания для выбора являются, несомненно, важными, однако необходимо при этом принимать во внимание и допустимую погрешность изготовления склеиваемых поверхностей, зависящую от разности показателей преломления клея и стекла, от кривизны склеиваемых поверхностей и места поверхности склейки в оптической системе. За последнее время разработаны и применяются новые марки стекол с большим показателем преломления — сверхтяжелые кроны и флинты, тяжелые баритовые флинты, и широко применяются тяжелые кроны, баритовые и тяжелые флинты. Это обстоятельство при выборе клея необходимо и целесообразно учитывать. В настоящее время имеются клеи с различными показателями преломления: от 1,48 до 1,58, что позволяет с достаточной степенью оптимальности осуществлять его выбор. Однако желательно иметь клеи с еще большими показателями преломления для склейки линз из сверхтяжелых кронов, тяжелых баритовых и тяжелых флинтов. При расчете допуска на склеенные поверхности можно исходить или из допустимого изме-

нения фокусного расстояния, или из допустимого изменения аберраций системы, например, сферической. Отклонение поверхностей оптических деталей от заданной правильной сферы вызывает изменение фокусного и вершинного фокусного расстояния системы и ее аберраций.

В некоторых системах, например в фотообъективах, работающих с дальномером или по шкале дистанций, или в объективах геодезических приборов с нитяным дальномером, допустимое отклонение поверхностей от пробного стекла можно определить исходя из допустимого изменения фокусного расстояния; в этом случае [формула (65)] допуски на подгонку под пробное стекло оказываются такими узкими, что изменения аберраций остаются незначительными



Рис. 57. Оптическая схема фотообъектива «Индустар»

Рис. 58. Оптическая схема двухлинзового склеенного объектива



и не снижают качества изображения. Например, если принять для объектива И50 с  $f'=52,4$  мм; относительным отверстием  $1:3,5$  (рис. 57)  $\Delta f'_{\text{доп}}=0,2\% f'$  (так как имеются и другие погрешности параметров, которые изменяют  $f'$  системы), то при  $D_{1,2}=16$ ;  $n_{1,4}=1,6130$ ;  $h_1/h_4=1$ ;  $p=6$  по формуле (65) найдем

$$N_{1,2} = \frac{450 \cdot 16^2 \cdot 0,1}{\sqrt{6 \cdot 1 \cdot 0,6130 \cdot 52,4^2}} = 2,8;$$

$$N_8 = \frac{450 \cdot 14^2 \cdot 0,1}{\sqrt{6 \cdot 0,8 \cdot 0,6130 \cdot 52,4^2}} = 2,7,$$

так как  $h_8/h_1=0,8$ ;  $D_8=14,0$ .

Соответственно для 2 и 3-й линз  $n_D=1,5749$  (ЛФ5) и  $n_D=1,5294$  (ОФ1) при  $h_3, 4, 5/h_1=0,8$

$$N_{3,4} = \frac{450 \cdot 0,1 \cdot 14^2}{6 \cdot 0,8 \cdot 0,5749 \cdot 52,4^2} = 2,8;$$

$$N_5 = 3,0.$$

Для поверхностей склейки допуск на подгонку под пробное стекло, очевидно, шире, так как разность показателей преломления стекла  $n_D=1,5294$  детали 3 и  $n_D=1,6130$  детали 4 и бальзамина ( $n_D=1,54$ ) заметно меньше, чем для поверхностей, граничащих с воздухом (для объектива И50  $n_D-1=0,6130-0,5294$ ). По формуле (63) получим для склеиваемой поверхности детали 3  $N_{\text{доп}}=150$  и для склеиваемой поверхности детали 4  $N=22,0$ . Практически  $f'$  не изменяется, если взять  $N_6=10$  и  $N_7=5$  с тем, чтобы обеспечить надежную склейку бальзамином, не допуская неравномерной толщины слоя клея при неблагоприятном сочетании отклонений на склеиваемых поверхностях (например, на обеих поверхностях «бугор»).

Однако во многих системах отклонение фокусного расстояния может быть грубым, например, более  $1\% f'$ , и тогда отклонение  $N$

от пробного стекла следует подсчитывать исходя из допустимого изменения аберраций и в первую очередь сферической аберрации, изменение которой может ухудшить качество изображения уже в центре поля оптических систем — объективов зрительных труб и фотообъективов с умеренным полем зрения ( $2\omega = 10 \div 50^\circ$ ). Это же справедливо для поверхностей большой кривизны и с заметной разностью  $n_D$  стекла и  $n_D$  клея.

Задавшись величиной допустимого изменения продольной сферической аберрации  $\Delta \delta s'_{\text{к доп}}$ , например, равной  $1/3 - 1/5$  глубины резкости, можно определить допустимое число колец  $N$  на подгонку под пробное стекло каждой поверхности оптической системы, в том числе и склеенных, по формуле (73):

$$N_v = \frac{D_v^2 \Delta \delta s'_{\text{к доп}}}{4 \cdot 0,5 \sqrt{p} h_1^2 f'^2 \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \lambda dA_v} \approx \\ \approx \frac{900 D_v^2 \Delta \delta s'_{\text{к доп}}}{\sqrt{p} h_1^2 \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 f'^2 dA_v}.$$

Если допустить из-за отклонения  $N$  каждой поверхности от заданной сферы одинаковые изменения сферической аберрации, то между допусками на подгонку под пробное стекло на первую и  $v$ -ую поверхность можно установить такую зависимость:

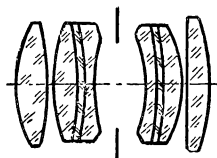
$$N_v = \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 \left( \frac{h_1}{h_v} \right)^4 \frac{dA_1}{dA_v} N_1.$$

Если в формуле (68а) за скобку вынести разность показателей преломления стекла и клея, то отдельные слагаемые в скобках станут примерно одинаковы как для первой, так и для второй склеенной поверхности кроновой и флинтовой линз, т. е. величина  $dA_v$  для склеенных поверхностей определяется в основном разностью показателей преломления стекла и клея и она тем меньше, чем меньше эта разность, вследствие этого станет шире допуск на  $N$  и  $\Delta N$ .

Напримр, для двухлинзового объектива, рассчитанного нами к скоростному фоторегистратору СФР (рис. 58) с  $f' = 750$  мм; относительным отверстием 1:5; берут одну деталь из стекла К8 ( $n_D = 1,5163$ ); другую деталь — из стекла ТФ2 ( $n_D = 1,6725$ ), при склейке бальзамом ( $n_D = 1,52$ ) для поверхности крон-клей принимают  $dA_2 = 0,099 d\rho_2$ , а для поверхности клей-флинт  $dA_3 = 3,2 d\rho_3$ . При склейке клеем ОК50 ( $n_D = 1,58$ ) соответственно  $dA_2 = 1,624 d\rho_2$  и  $dA_3 = 1,37 d\rho_3$ , при этом для наружной первой и последней поверхности  $dA_1 = 5,13 d\rho_1$ ;  $dA_4 = -6,61 d\rho_4$  при склейке как бальзамом, так и клеем ОК50. Таким образом, можно сделать вывод, что при склейке бальзамом или бальзамином ( $n_D = 1,52 \div 1,54$ ) допуск на подгонку под пробное стекло ( $N$ ,  $\Delta N$ ) на склеиваемую поверхность линзы с  $n_D = 1,50 \div 1,55$  (ЛК, К, БК, ФК, ЛФ, ОФ, ФК) может быть назначен широким ( $N = -$ ;  $\Delta N = -$ ) или может определяться условиями склейки ( $N = 5 \div 10$ ;  $\Delta N = -$ ); а на склеиваемую поверхность линзы с  $n_D = 1,60$  (ТК, Ф, ТФ, БФ, СТК) допуски  $N$  и  $\Delta N$  остаются

почти такими же узкими, как и на наружную кроновую поверхность. При склейке клеем ОК 50 ( $n_D=1,58$ ) точность изготовления склеиваемой поверхности кроновой линзы необходимо повысить (она должна быть такой же, как и наружная поверхность), а точность флинтовой линзы понизится в 2 раза по сравнению со склейкой бальзамом и в 3—4 раза по сравнению с точностью наружной флинтовой поверхности. Выгода становится весьма существенной, т. е. допуски  $N$  и  $\Delta N$  на склеенные поверхности могут быть шире, если переходить от склейки бальзамом к склейке клеем с  $n_D=1,58$  и выше (ОК50, ОК72Ф) линз из тяжелых кронов и флинтов с показателем преломления более 1,58.

Рис. 59. Оптическая схема фотообъектива «Гелиос»



Например, в кинематографических объективах РО, ОКС, «Гелиос» и др. точность подгонки под пробное стекло склеиваемых поверхностей можно снизить в 2—3 раза и более и нижняя граница допусков  $N$  и  $\Delta N$  определяется только условиями склейки. К тому же известно, что склейка клеями ОК50 и ОК72Ф оказывается более надежной, чем склейка бальзамом и бальзамином при грубых отклонениях склеиваемых поверхностей, тогда для указанных поверхностей можно взять  $N>10$ ;  $\Delta N = -$ , что подтверждается табл. 8 изменений значений  $dA_v$  для склеенных поверхностей объектива «Гелиос-РОЗ» (рис. 59) при переходе от склейки бальзамом к склейке клеем ОК50.

При склейке клеем ОК50 величины  $dA_v$  заметно меньше, чем при склейке бальзамом, следовательно, и допуски  $N$  и  $\Delta N$  могут быть грубее ( $N = -$ ;  $\Delta N = -$ ).

Потери при преломлении за счет отражения снижаются с 0,1 и 0,14% до 0,01 и 0,03% соответственно, а при склейке деталей из стекла ТФ5 и ТФ12 (объектив ТО5) — с 0,7 до 0,35%.

Допуск на  $\Delta N_{\text{скл}}$  склеиваемых поверхностей можно определить по допуску  $\Delta N$  на наружную, граничащую с воздухом поверхность по формуле

$$\Delta N_{\text{скл}} = \left( \frac{D_{\text{скл}}}{D} \right)^2 \frac{h}{h_{\text{скл}}} \cdot \frac{n_D - 1}{n_{\text{дет}} - n_{\text{кл}}} \Delta N.$$

Из формулы следует, что допуск  $\Delta N$  на склеиваемые поверхности больше допуска  $\Delta N$  на наружные поверхности во столько раз, во сколько раз разность показателей преломления стекла и клея меньше разности  $(n_D - 1)$  для этой же детали. При малой разности  $n_{\text{дет}} - n_{\text{кл}}$   $\Delta N$  можно не нормировать ( $\Delta N$  — полировка на сукне). Наличие различных клеев, пригодных для склейки деталей, работающих в необходимом температурном диапазоне, позволяет выбирать клей исходя из того, чтобы допуск на подгонку под пробное стекло был возможно шире. При этом допуски  $N$  и  $\Delta N$  должны быть шире или к обоим поверхностям склейки деталей,

Таблица 8

Значения  $dA_v$  для склеенных поверхностей объектива «Гелиос»

№ поверх- ности	№ детали	Марка стекла	$n_D$	$dA_v$	Марка стекла	$n_D$	$dA_v$
4	2 Бальза- мин	ТК16	1,6126	2,12	ТК16	1,6126	0,82
			1,5200		ОК50	1,58	
5	3 4	Ф1 ТФ1	1,6128	3,73	Ф1	1,6128	0,15
			1,6475		ТФ1	1,6475	
8	Бальза- мин		1,5200	2,86	ОК50	1,58	1,66
9	5	БФ13	1,6395	2,88	БФ13	1,6395	1,40

когда их показатели преломления близки к  $n_D$  клея возможно ближе к  $n_D$  стекла, или к одной из них, изготовление которой труднее (недостаточная или чрезмерная твердость стекла детали). В последнем случае  $n_D$  клея должен быть возможно ближе к  $n_D$  детали.

### 33. ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ НА ПРОПУСКАНИЕ СВЕТОФИЛЬТРОВ

На производстве приходится решать задачи по назначению допусков и требований на светофильтры, определению эффекта или допустимости отклонений параметров светофильтра, которые имеют место в процессе их изготовления. Ниже приводятся выводы и формулы, облегчающие во многих случаях правильное решение таких задач.

**Общие положения и формулы.** Оптическая плотность  $D_\lambda$  стекла светофильтра представляет собой логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания  $\tau_\lambda$ , т. е.

$$D_\lambda = \lg \frac{1}{\tau_\lambda} \quad \text{или} \quad 10^{D_\lambda} = 1/\tau_\lambda; \quad \tau_\lambda = \frac{1}{10^{D_\lambda}}.$$

В каталоге цветного стекла обычно приводится величина  $k_\lambda$  — показатель поглощения слоя стекла толщиной 1 мм для длины волны  $\lambda$ . Для слоя стекла толщиной  $l$

$$D_\lambda = k_\lambda l; \quad \tau_\lambda = 1/10^{k_\lambda l} = 10^{-k_\lambda l}.$$

Если учитывать потери  $D_r$  на отражение от двух поверхностей светофильтра, то оптическая плотность светофильтра

$$D'_\lambda = D_\lambda + D_r; \quad \tau'_\lambda = 10^{-k_\lambda l} \cdot 10^{-D_r},$$

где  $\tau'_\lambda$  — коэффициент пропускания светофильтра для длины волны света  $\lambda$  с учетом потерь на отражение от двух поверхностей светофильтра. Обычно  $D_r=0,038$  — величина постоянная для большинства марок стекла в видимой области спектра для данного (обычно по оптической оси) угла падения лучей и для поверхностей светофильтра без просветления.

Если взять коэффициент пропускания стекла светофильтра толщиной 1 см, а не 1 мм, величину  $10^{-D_r}$  обозначить буквой  $p_r$  и величину  $10^{-10k_\lambda}$  буквой  $p_\lambda$ , то получим выражение для коэффициента пропускания  $\tau'_\lambda$ , аналогичное выражению для коэффициента пропускания, известного из курсов оптики:

$$p_r = 10^{-D_r}; \quad p_\lambda = 10^{-10k_\lambda}$$

и

$$\tau'_\lambda = p'_{\text{см}} p_r. \quad (124)$$

Если  $D_r=0,038$ , то в этом случае  $p_r = 10^{-D_r} = 0,912$ .

**Влияние изменения толщины.** Представив формулу (124) в виде

$$\tau'_\lambda = p_r \cdot 10^{-k_\lambda l}, \quad (124a)$$

затем дифференцируя по  $l$  и считая величины  $p_r$  и  $k_\lambda$  постоянными для выбранной марки стекла, найдем зависимость коэффициента пропускания светофильтра от изменения толщины

$$\Delta \tau'_\lambda = -p_r \ln 10 \cdot 10^{-k_\lambda l} \Delta l_{\text{мм}},$$

т. е. после упрощения получим

$$\Delta \tau'_\lambda = -2,3 \tau'_\lambda k_\lambda \Delta l \quad (125)$$

или

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = -2,3 k_\lambda \Delta l. \quad (126)$$

Из формулы (126) следует, что влияние отклонения толщины на изменение коэффициента пропускания может оказаться заметным для темных, плотных светофильтров ( $k_\lambda$  большое) или для тонких при грубых отклонениях толщины. Последнее становится более ясным после преобразования формулы (126). Так как

$$k_\lambda = D_\lambda / l,$$

то

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = -2,3 D_\lambda \Delta l / l,$$

т. е. относительное изменение коэффициента пропускания светофильтра прямо пропорционально оптической плотности и относительному изменению толщины светофильтра.

Например, для светофильтра КС14 толщиной  $l=10$  мм, при  $k_\lambda=0,005$  для  $\lambda=680$  нм и  $\Delta l=\pm 0,3$  мм получим  $\Delta \tau'_\lambda/\tau'_\lambda = -2,3k_\lambda \Delta l = -2,3 \cdot 0,005 (\pm 0,3) = \mp 0,00345 = \mp 0,345 = \mp 0,34\%$  — практически незначительная величина.

**Влияние изменения показателя поглощения  $k_\lambda$ .** Дифференцируя формулу (124а) по  $k_\lambda$ , получим

$$\Delta \tau'_\lambda = -p_r \lg 10 \cdot 10^{-k_\lambda l} \Delta k_\lambda = -\tau'_\lambda \ln 10 l \Delta k_\lambda = -2,3 \tau'_\lambda l \Delta k_\lambda$$

или окончательно

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = -2,3 l \Delta k_\lambda. \quad (127)$$

Если в формулу (127) подставить вместо  $l$  величину, равную  $l = D_\lambda / k_\lambda$ , то тогда

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = -2,3 D_\lambda \Delta k_\lambda / k_\lambda. \quad (127a)$$

Из формулы (127а) следует, что относительное изменение коэффициента пропускания светофильтра прямо пропорционально оптической плотности светофильтра и относительному изменению коэффициента поглощения.

Существенное изменение коэффициента пропускания вследствие изменения коэффициента поглощения может иметь место у темных светофильтров (также и при малой величине  $k_\lambda$ , но при большой толщине светофильтра). Например, для светофильтра КС14 при

$$\frac{\Delta k_\lambda}{k_\lambda} = 10\%, l = 10 \text{ мм}, D_\lambda = 0,05; \quad \frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = -2,3 D_\lambda \frac{\Delta k_\lambda}{k_\lambda} = -2,3 \cdot 0,05 \times$$

$\times 0,1 = -0,0115 = -1,2\%$ , т. е. практически мало заметная величина.

**Влияние изменения коэффициента отражения.** Коэффициент отражения учитывает потери света за счет отражения от двух поверхностей светофильтра: потери света на одной поверхности светофильтра составляют примерно 4,5—5%, тогда с учетом потерь на отражение от двух поверхностей пропускание светофильтра составит  $p_r = 0,912$  ( $D_r = 0,038$ ). Просветление поверхностей светофильтра снижает потери за счет отражения до 1,5—2%, и в этом случае пропускание увеличивается до  $p_r = 0,97 \div 0,96$ . Таким образом,  $\Delta p_r = 0,06 \div 0,05$ .

Дифференцируя формулу (124а) по  $p_r$ , получим

$$\Delta \tau'_\lambda \approx 10^{-k_\lambda l} \Delta p_r \frac{p_r}{p_r};$$

так как  $10^{-k_\lambda l} p_r = \tau'_\lambda$ , то

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = \frac{\Delta p_r}{p_r}. \quad (128)$$

Из формулы (128) следует, что относительное изменение коэффициента пропускания равно относительному изменению коэффициента  $p_r$ , учитывающего потери света за счет отражения.

Просветление поверхностей оптических деталей дает наибольшее снижение потерь за счет отражения, т. е. можно получить

$$\Delta p_r = 0,06 \div 0,05, \quad \text{тогда} \quad \frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = \frac{0,05}{0,95} = 5,3 \div 6,5\% \text{ — достаточно за-}$$

метная величина, более значительная, чем изменение коэффициента пропускания за счет изменения толщины светофильтра в пределах  $\pm 0,3 \div 0,5$  мм или за счет изменения коэффициента поглощения в пределах 2—3-й категории (10—20%). Уменьшение коэффициента поглощения является нелегкой задачей, а увеличение пропускания важно как раз при съемке со светофильтрами, пропускающими мало света. Поэтому оказывается, что просветление светофильтров может повысить пропускание объективов на 3—4% (принимая пропускание объективов равным 70—80% и коэффициент пропускания светофильтров 0,80—0,85), т. е. просветление светофильтров так же целесообразно, как и просветление поверхностей объектива. Просветление следует производить для тех длин волн, для которых светофильтр имеет наибольшее пропускание. Наибольшее пропускание обычно должно совпадать с длиной волны в максимуме спектральной чувствительности приемника.

**Кратность светофильтров.** Светофильтры обычно характеризуются еще и кратностью, т. е. числом раз, в которое должна быть увеличена выдержка при съемке со светофильтром по сравнению с выдержкой при съемке без светофильтра. Кратность зависит, помимо пропускания светофильтра, также от типа применяемой пленки, типа объекта и условий освещения. Она может быть точнее вычислена делением площади, ограниченной осью абсцисс и кривой с ординатами, полученными от перемножения ординат кривых спектрального состава света от объекта и чувствительности пленки, на площадь, ограниченную осью абсцисс и той же кривой, ординаты которой дополнительно умножены на ординаты пропускания светофильтра. Однако при изготовлении светофильтров кратность определяется фотографированием белого экрана без светофильтра и со светофильтром: отношение плотности снимка при съемке без светофильтра к плотности снимка при съемке со светофильтром и является кратностью для данного типа пленки.

Для нейтральных светофильтров зависимость кратности от коэффициента пропускания проще: это обратная величина коэффициента пропускания нейтрального светофильтра, т. е.

$$k = 1/\tau'_\lambda \quad (129)$$

или

$$\tau'_\lambda = 10^{-k_{\text{ср}} l} \cdot 10^{-D_r}. \quad (129a)$$

В формуле (129a) величина  $k_{\text{ср}}$  — средний показатель поглощения стекла толщиной 1 мм для длин волн в рабочем их интервале. Зависимость изменения кратности от изменения коэффициента пропускания имеет вид

$$\Delta k = - \frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'^2_\lambda} \quad (130)$$



или так как

$$\frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = -2,3l\Delta k_\lambda.$$

то

$$\Delta k = 2,3l\Delta k_\lambda/\tau'_\lambda = 2,3kl\Delta k_\lambda; \quad \Delta k/k = 2,3l\Delta k_\lambda. \quad (131)$$

Например, для нейтрального светофильтра из стекла НС1 толщиной 12 мм, кратностью 8\*,  $k_{\lambda_{\text{ср}}} = 0,05$  при  $\Delta k/k = \pm 10\%$  (2-я категория), т. е.  $\Delta k_\lambda = 0,005$ , получим  $\Delta k = 2,3kl\Delta k_{\lambda_{\text{ср}}} = 2,3 \cdot 12 \cdot 0,005 =$

$$= 1,1 \text{ или } \frac{\Delta k}{k} = 2,3l\Delta k_{\lambda_{\text{ср}}} = 2,3 \cdot 12 \cdot 0,005 = 13,8\%.$$

В зависимости от изменения толщины кратность светофильтра изменяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \tau'_\lambda/\tau'_\lambda &= -2,3k_{\lambda_{\text{ср}}} \Delta l; \\ \Delta k &= \Delta \tau'_\lambda/\tau'^2_\lambda = 2,3kk_{\lambda_{\text{ср}}} \Delta l \end{aligned} \quad (132)$$

и окончательно

$$\frac{\Delta k}{k} = 2,3k_{\lambda_{\text{ср}}} \Delta l. \quad (133)$$

Для того же самого нейтрального светофильтра при  $\Delta l = \pm 0,3$  мм  $\Delta k = 2,3 \cdot 8 \cdot 0,05 (\pm 0,3) = \pm 0,28$ ;  $\Delta k/k = \pm 3,45\%$ .

Если принять для цветных светофильтров, что в основном, кроме типа пленки и спектрального состава излучения источника света, отклонение кратности светофильтра зависит от изменения показателя поглощения  $k_{\lambda_0}$  для длины волны в максимуме пропускания и изменения толщины светофильтра и в меньшей мере от изменения крутизны его спектральной кривой, то в этом случае можно прийти к тем же самым формулам, что и формулы (131) и (133) для нейтральных светофильтров, т. е. можно принять, что

$$\Delta k/k = 2,3l\Delta k_{\lambda_0}$$

и

$$\Delta k/k = 2,3k_{\lambda_0} \Delta l.$$

Например, для красного светофильтра КС14 при  $k_{\lambda_0} = 0,005$ ;  $\Delta k_{\lambda_0} = 0,0005 (\pm 10\% k_{\lambda_0})$ ;  $l = 10$ ;  $\Delta l = \pm 0,03$  получим  $\Delta k/k = 2,3 \times 10 (\pm 0,0005) = 1,15\%$  от изменения коэффициента светопоглощения и  $\Delta k/k = 2,3k_{\lambda_0} \Delta l = 2,3 \cdot 0,0005 (\pm 0,3) = 0,35\%$  от изменения толщины — заметно меньше того изменения кратности светофильтра, которое получается за счет потерь на отражение на поверхностях светофильтра:

$$\Delta k/k = -\frac{\Delta \tau'_\lambda \tau'_\lambda}{\tau'^2_\lambda}, \text{ так как } \Delta k = -\Delta \tau'_\lambda/\tau'_\lambda; \quad k = 1/\tau'_\lambda;$$

$$\Delta k/k = -\Delta\tau'_\lambda/\tau'_\lambda = -\frac{\Delta p_r}{p_r} \quad (134)$$

и для красного светофильтра  $\Delta k/k = -\Delta p_r/p_r = -0,03/0,91 = -3,3\%$ .

Конечно, по формуле  $k=1/\tau'_\lambda$  нельзя вычислять кратность цветных светофильтров, так как при этом не принимается во внимание пропускание светофильтра во всем интервале чувствительности пленки и спектральное излучение объекта съемки.

Отклонение  $\lambda_{\text{пр}}$  по 2-й категории ( $\Delta\lambda_{\text{пр}}=\pm 10$  нм) практически не влияет на пропускание прибора, если области пропускания светофильтра, излучения объекта и спектральной чувствительности достаточно широки. Однако для светофильтров ОС14 с  $\lambda_{\text{пр}}=570\div 585$  и КС14 с  $\lambda_{\text{пр}}=630\div 650$  нм при съемке на пленку Панхром, которая чувствительна до  $\lambda=650\div 670$  нм, отклонение  $\Delta\lambda_{\text{пр}}=10$  нм уже заметно влияет на выдержку.

#### **34. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СВЕТОФИЛЬТРОВ ДЛЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

В работе [7] показана необходимость учета дифракционных явлений, наблюдаемых в оптической системе не только в максимуме, но и во всей области спектральной чувствительности глаза. Там же указано, что эту область с целью получения наивысшего контраста, качества изображения и разрешающей способности следует ограничивать как со стороны синих, так и со стороны красных лучей.

В настоящее время светофильтры в геодезических приборах, применяемые для усиления контрастности изображения, должны изготавливаться из цветного стекла марок ОС17 толщиной 1—2 мм, ЖЗС1 и ЖЗС6 толщиной 1—2,5 мм (ГОСТ 9411—66 «Стекло цветное оптическое»). Для наблюдательных приборов с этой же целью должен применяться светофильтр из стекла ОС17 толщиной 1—2 мм. Однако эти светофильтры имеют недостатки. Например, светофильтр ЖЗС6 не имеет резких границ в синей и красной частях спектра и хорошо пропускает красную часть спектра, что приводит к снижению контраста, разрешающей способности и точности визирования и не позволяет получить их наивысшими для данной оптической системы. Светофильтр ЖЗС1 имеет такие же недостатки и к тому же пропускает мало света. Светофильтр ОС17 очень хорошо пропускает и красную часть спектра, имеет те же недостатки, что и светофильтры ЖЗС6 и ЖЗС1, хотя и незначительно увеличивает субъективную яркость изображения.

На рис. 60, а приведены спектральные кривые коэффициентов  $\tau_\lambda$  пропускания светофильтров: ОС17 — толщиной 1 и 2 мм и ЖЗС6 и ЖЗС1 толщиной 1,2 и 3 мм.

Для измерения вместо светофильтров ЖЗС6 и ЖЗС1 целесообразно применять светофильтр, пропускающий область спектра 460—580 нм (560 нм) с максимумом пропускания около 500 нм, а вместо светофильтра ОС17, предназначенного для увеличения контрастности при наблюдении предметов в дымке на больших расстояниях, использовать светофильтр для наблюдений, пропускающий область спектра 480—620 нм с более резкими границами пропускания как

в сине-фиолетовой, так и в красной областях спектра. Эти светофильтры по сравнению со светофильтрами ЖЗС6, ЖЗС1 и ОС17 увеличивают пропускание системы и контрастность изображения, повышают разрешающую способность, а следовательно, и точность визирования и облегчают распознавание целей. Эти светофильтры

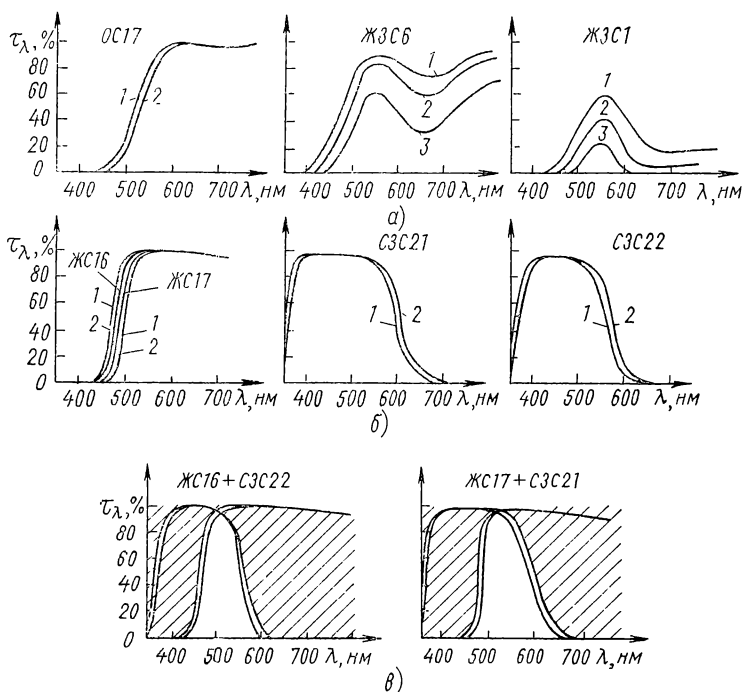


Рис. 60. Пропускание светофильтров для наблюдательных приборов

могут быть интерференционные или комбинированные из двух цветных стекол ЖС16 и СЗС22 толщиной каждый 1—1,5 мм и ЖС17 и СЗС21 толщиной каждый 1—2 мм.

На рис. 60, б приведены спектральные кривые коэффициентов пропускания отдельных светофильтров ЖС16, ЖС17, СЗС21 и СЗС22 толщиной 1 и 2 мм и на рис. 60, в — комбинированных светофильтров ЖС16+СЗС22 и ЖС17+СЗС21 толщиной каждый 1—2 мм.

Аналогичное положение создавалось и со светофильтрами для лабораторных и контрольно-измерительных приборов, применяемыми для увеличения контрастности изображения и снижения утомляемости глаз наблюдателя в процессе наблюдения, контроля и измерения. Эти светофильтры должны изготавливаться из цветного стекла (ГОСТ 9411—66) ЖЗС9 и ЖЗС1 толщиной от 1 до 5,0 и ЗС2 толщиной 1,5 мм. Однако они имеют существенные недостатки. На-

пример светофильтры ЖЗС9 и ЖЗС1 толщиной 1—3 мм пропускают широкую область спектра, в том числе и красную часть спектра, что особенно нежелательно в контрольно-измерительных приборах.

Светофильтры ЖЗС9 и ЖЗС1 толщиной 5 мм не имеют резких границ пропускания в оранжевой и красной частях спектра и мало пропускают света. Светофильтр ЗС2 толщиной 1—1,5 мм немного лучше, чем светофильтр ЖЗС1, но мало пропускает света и также не имеет резкой границы пропускания в коротковолновой и длинноволновой частях спектра.

Применение перечисленных светофильтров не позволяет получить максимально возможную для данной оптической системы контрастность изображения, разрешающую способность и точность визирования. Поэтому следует также пересмотреть и комплект светофильтров, применяемых для контрольно-измерительных приборов; область пропускания должна быть более резко ограничена и несколько сдвинута в сторону сине-голубой части спектра, т. е. должна находиться в пределах 460—580 (560) нм. Эту область спектра пропускает и ограничивает интерференционный светофильтр ИС (рис. 61, б) или сложный светофильтр, состоящий из цветных стекол ЖС16 и СЗС22 толщиной каждый 1—2 мм или более светлый — из стекол ЖС16 и СЗС21 той же толщины. Эти сложные светофильтры не только пропускают в 3—10 раз больше света по сравнению со светофильтрами ЖЗС1 и ЗС2, но и повышают на 10—20 %

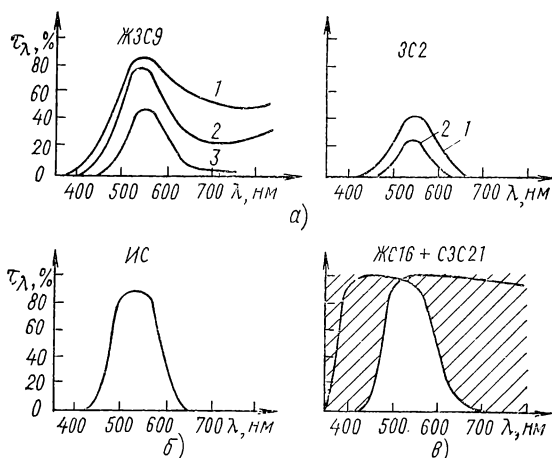


Рис. 61. Пропускание светофильтров для контрольно-измерительных приборов

контрастность, разрешающую способность и точность визирования приборов, в которых они применяются. Они также позволяют применять источники света меньшей мощности, что не только снижает расход энергии, но и уменьшает нагрев приборов, их расстраиваемость и погрешности измерения из-за изменения температуры.

На рис. 61, а показаны спектральные кривые коэффициентов  $\tau_\lambda$  пропускания светофильтров ЖЗС9 толщиной 1,2 и 3 мм и ЗС2 тол-

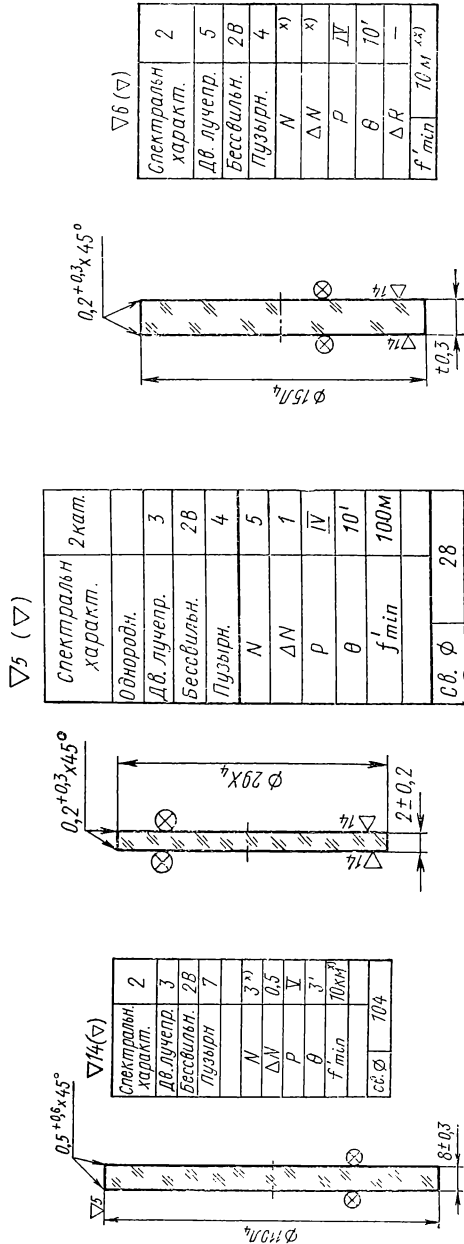


Рис. 62. Элементы чертежа светового фильтра, расположенного перед фотообъективом с  $f' = 500$ ; 1 : 5; 2w = 45°

Рис. 63. Элементы чертежа светового фильтра, расположенного перед фотообъективом с  $f' = 52,5$ ; 1 : 2; 2w = 45°

Рис. 64. Элементы чертежа светового фильтра, расположенного за окуляром зрительной трубы

щиной 1 и 2 мм и на рис. 61, б и 61, в — предлагаемых комбинаций ЖС16+СЗС22 и ЖС16+СЗС21. Преимущество последних очевидно: они имеют более резкое ограничение пропускания как в синей, так и в красной части спектра, максимум пропускания сдвинут в сине-зеленую часть спектра ( $\lambda_0=500\div520$  нм).

На рис. 62 показаны элементы чертежа светофильтра (из стекла ЖС18 ГОСТ 9411—66), расположенного перед фотообъективом с  $f'=500$  мм; относительным отверстием 1:5;  $2\omega=45^\circ$ . В примечании указывают: 1.  $\otimes$  просветл. 43Р по ТУ .....  $\lambda=560\pm30$  нм. 2. Фокусное расстояние  $f'_{\min}=10$  км соответствует алгебраической сумме колец на обеих поверхностях не более одного кольца. 3. Покрытие матовых поверхностей: Эм ... по ТУ .....

На рис. 63 приведены элементы чертежа светофильтра (из стекла ЖС17 ГОСТ 9411—66), расположенного перед фотообъективом с  $f'=52,5$  мм; относительным отверстием 1:2. В примечании приводят: 1.  $\otimes$ просветл. 43Р по ТУ .....  $\lambda=560\pm30$  нм. 2. Фокусное расстояние  $f'_{\min}=100$  м соответствует алгебраической сумме колец на обеих поверхностях не более одного кольца.

Элементы чертежа светофильтра (из стекла ОС17 ГОСТ 9411—66), расположенного за окуляром зрительной трубы перед глазом, приведены на рис. 64. В примечании указывают: 1.  $N^*$ ,  $\Delta N^*$  — полировать на сукне. 2. Фокусное расстояние  $f'_{\min}=10$  м соответствует алгебраической сумме колец на обеих поверхностях не более 10 колец. 3.  $\otimes$  просветл. 43Р по ТУ .....  $\lambda=520\pm30$  нм.

## 35. ТРЕБОВАНИЯ

### К ПРОСВЕТЛЕНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Целесообразное просветление преломляющих поверхностей оптических деталей широко применяют для повышения светопропускания системы, химической устойчивости некоторых марок стекол и уменьшения коэффициента отражения, которое сопровождается снижением светорассеяния.

По числу слоев просветление разделяют на однослойное, двухслойное и трехслойное, а по способу нанесения — на химическое из раствора (43Р, 44Р, 43Р и 45Р, 44Р, 43Р), химическое травлением (чаще в уксусной кислоте — 63Т) и физическое испарением в вакууме — чаще фтористого магния 24И. Просветление 43Р получают нанесением на вращающуюся предварительно очищенную деталь капли раствора эфира ортокремниевой кислоты, просветление 44Р, 43Р и 44Р·43Р ахромат — нанесением на вращающуюся очищенную деталь растворов эфира ортотитановой и ортокремневой кислоты и просветление 45Р, 44Р, 43Р — нанесением капель раствора смеси эфиров ортотитановой и ортокремниевой кислоты, эфиров — ортотитановой и ортокремниевой кислоты. Число оборотов детали и концентрацию растворов подбирают так, чтобы толщина пленки была равна  $\lambda/4$ , а показатель преломления  $n_{пл}=\sqrt{n}$ ; эти условия при химическом просветлении травлением выполняются путем подбора концентрации кислоты и времени выдержки, а при физическом просветлении — путем подбора времени испарения. Здесь  $n_{пл}$  и  $n$  — показатели преломления пленки и стекла, а  $\lambda_0$  — длина волны в максимуме пропускания, в минимуме отражения.

Однослойное и трехслойное просветления практически одинаково отражают (или пропускают) сложное излучение в сравнитель-

но широкой области спектра, и коэффициент отражения почти не меняется от длины волны. Коэффициент отражения однослойных пленок 43Р, 63Т (и в меньшей степени — 24И) уменьшается с увеличением показателя преломления детали, и если при  $n=1,5$   $r=2,5\%$ , то при  $n=1,7$   $r=1,4\%$ . Двухслойное покрытие 44Р, 43Р имеет низкий коэффициент отражения только для узкой области спектра (в 150—200 нм), а по краям этой области коэффициент отражения быстро растет (до 4—8% и более). Поэтому применение его для большого числа поверхностей сложной системы и особенно при грубых отклонениях толщины пленки ( $\lambda_0$ ) может привести к избирательному пропусканию только узкой области спектра. Это ведет к искажению цветопередачи в фотообъективах при съемке на цветную пленку, снижению коэффициента пропускания, увеличению светорассеяния в синей и красной частях спектра; с другой стороны, при этом еще более резко ограничивается область пропускания, что положительно сказывается в системах с узкой областью излучения объектов или спектральной чувствительностью приемника, например, в визуальных системах — зрительных трубах и мик-

Т а б л и ц а 9

Примеры применения просветления и допуски на  $\lambda_0$

Наименование приборов	$\lambda_0$ в нм	Цвет пленки в отраженном свете
Телескопические системы и микроскопы	520	Красноватый оттенок
Любительские фотообъективы и короткофокусные аэрофотообъективы	540—560	От красноватого до пурпурно-фиолетового
Аэрофотообъективы длиннофокусные, работающие со светофильтрами ЖС, ОС	600	Фиолетово-синий оттенок
Ночные приборы: объектив окуляр	900 520	Светло-голубой Красноватый оттенок
Репродукционные объективы для не-сенсibilизированных пленок	450	Кирпичный
Репродукционные объективы, работающие со светофильтрами ЗС1, ЗС2	520	Красноватый оттенок
Объективы для съемки экранов ЭОП и телевизоров	480—520	Кирпично-красноватый оттенок
Другие системы	$\lambda_0$ выбирают в зависимости от спектральной чувствительности приемника или излучения объекта	

Допуски на  $\lambda_0$

⊗ Просветл. 43Р, 63Т, 24И, 45Р. 44Р. 43Р:  $\Delta\lambda_0 = \pm 30 \div 50$  нм

⊗ Просветл. 44Р. 43Р:  $\Delta\lambda_0 = \pm 20$  нм.

⊗ Просветл. 44Р. 43Р ахромат:  $\lambda_0 \pm 30$  нм.

роскопах. Просветление 43Р и 63Т более прочное, чем 44Р. 43Р или 24И. Поэтому просветление 43Р и 63Т назначается на наружные поверхности или внутренние детали с большим  $n_D$ , когда коэффициент отражения так же мал, как и при просветлении 44Р. 43Р. Просветление 63Т требует много времени, и после просветления деталей из некоторых стекол на поверхностях проявляются царапины, поэтому оно применяется только с целью защиты налетоопасных стекол и для деталей большого диаметра, когда другие способы просветления невозможны. Просветление 24И не требует в процессе нанесения вращения детали, поэтому дефекты поверхностей (царапины, точки) не вызывают дефектов просветления («кометы» и т. п.) и позволяют получить более равномерное покрытие на поверхности прямоугольной формы (призмы). Если в процессе просветления 24И производится подогрев деталей до 200—250°С, то пленка становится прочнее и это просветление можно применять и для наружных поверхностей. Просветление 45Р, 44Р. 43Р имеет низкий коэффициент отражения (0,4—0,8%) независимо от показателя преломления и длины волны, не обладает избирательным отражением (пропусканием) в широкой области спектра, менее прочное, рекомендуется для внутренних поверхностей, более сложно и дорого в изготовлении. Длина волны  $\lambda_0$  в максимуме пропускания или минимуме отражения (т. е. толщина пленки) должна выбираться с учетом максимума спектральной чувствительности приемника и излучения приемника. Примеры выбора  $\lambda_0$  и допуска  $\Delta\lambda_0$  указаны в табл. 9.



---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каракулина Г. А. Влияние децентрировки на качество изображения в склеенных и несклеенных объективах. Известия вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, № 5.
2. Максutow Д. Д. Астрономическая оптика. М.—Л. ОГИЗ, 1946, 368 с.
3. Максutow Д. И. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.—Л., ОГИЗ, 1948, 280 с.
4. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М. «Мир», 1964.
5. Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические измерения. М., «Машиностроение», 1968, 472 с.
6. Мальцев М. Д. О дифракционных явлениях в оптических системах.—Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1967, № 3, стр. 131—136.
7. Мальцев М. Д. Об ахроматизации визуальных измерительных оптических систем.—Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1969, стр. 109—112.
8. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л., «Машиностроение», 1968, 292 с.
9. Русинов М. М. Юстировка оптических приборов. М., «Недра», 1969, 326 с.
10. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л., «Машиностроение», 1969, 670 с.
11. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Том 1. М.—Л. Изд. АН СССР, 1948, 662 с.
12. Фефилов Б. В. Прикладная оптика. М. Изд. геодезич. и картограф. литер., 1947, 532 с.
13. Справочная книга оптика-механика. Под ред. Л. Г. Титова, М.—Л., ОНТИ НКТП СССР, том I, 1936, стр. 750; том II, 1937, 980 с.
14. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под ред. М. Я. Кругера и В. А. Панова. Л., «Машиностроение», 1967, 760 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Условные обозначения . . . . .	5
Глава 1. Общие вопросы производства. . . . .	8
1. Некоторые особенности подготовки современного производства . . . . .	9
2. Свойства приемников лучистой энергии . . . . .	11
3. Критерии качества изображения . . . . .	12
4. Технические условия и требования к оптической части приборов . . . . .	15
5. Чертежи оптических деталей . . . . .	17
6. Рекомендуемые требования к оптическим деталям . . . . .	20
7. Пересчет фотообъективов на плавки стекла . . . . .	30
8. Комплектовка линз по толщине . . . . .	36
9. О комплектовке стекла по отклонениям показателя преломления . . . . .	41
10. О комплектовке стекла линз по отклонениям дисперсии . . . . .	45
Глава 2. Расчет допусков и обоснование требований к стеклу оптических деталей . . . . .	48
11. Расчет допуска на отклонение показателя преломления . . . . .	48
12. О расчете допуска на дисперсию стекла . . . . .	54
13. Об оптической однородности . . . . .	60
14. О двойном лучепреломлении стекла . . . . .	62
15. О светопоглощении стекла . . . . .	62
16. О выборе категории бесвильности . . . . .	64
17. Выбор категории и класса пузырности . . . . .	65
Глава 3. Расчет допусков и обоснование требований к изготовлению оптических деталей . . . . .	68
18. О подгонке оптических поверхностей под пробное стекло и допусках на радиусы пробных стекол . . . . .	68
19. Расчет допусков на пробные стекла и на подгонку под пробное стекло . . . . .	76
20. Расчет допусков на отклонение поверхностей оптических деталей от правильной сферы . . . . .	84
21. Расчет допусков на подгонку под пробное стекло зеркал и призм . . . . .	91
22. Расчет допусков на отклонение отражающих поверхностей от правильной сферы . . . . .	95
23. О допусках на асферические поверхности . . . . .	98
24. Чистота поверхностей оптических деталей . . . . .	101
25. Расчет допусков на углы призм . . . . .	102
26. Децентрировка поверхностей линз оптических систем . . . . .	117
27. О конструкции оправ некоторых оптических систем . . . . .	124
28. О модернизации оправ фотообъективов . . . . .	130
29. Влияние изменения температуры на расфокусировку оптической системы . . . . .	137
30. Влияние изменения температуры на качество изображения . . . . .	141
Глава 4. Расчет допусков на некоторые оптические детали . . . . .	145
31. Примеры расчета допусков на отражающие поверхности зеркал и призм . . . . .	145
32. Допуски на подгонку под пробное стекло склеенных поверхностей . . . . .	152
33. Влияние отклонения толщины и показателя поглощения на пропускание светофильтров . . . . .	156
34. Рекомендации по выбору светофильтров для наблюдательных и контрольно-измерительных приборов . . . . .	161
35. Требования к просветлению оптических деталей . . . . .	165
Список литературы . . . . .	168

51 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»