

Глава V

КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 33. РОЛЬ АБЕРРАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИИ

Для определения точки изображения в идеальной оптической системе достаточно найти в пространстве изображений точку пересечения двух лучей. Такая система образует резкое изображение, и каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения. В действительности, в реальных оптических системах изображение образуется в виде кружков или пятен рассеяния.

Широкие пучки лучей, вышедшие из одной точки предмета, преломляясь оптической системой, не образуют одну точку схода. Ошибка, или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе, называется *абберацией*.

Изучая изображение точки, образованное различными лучами, можно заметить характерные aberrации, присущие только этим лучам. Поэтому отдельно рассматривают прохождение различных лучей через оптическую систему и каждой aberrации присваивают свое наименование.

В области нулевых лучей образуется безабберационное изображение. Такое изображение позволяет найти положение плоскости изображения M' (рис. 33), оптически сопряженное с плоскостью предметов M .

Из точки A , расположенной на оптической оси, выходит осевой пучок лучей. Эти лучи в плоскости M' образуют геометрически правильный кружок рассеяния. Здесь достаточно рассмотреть преломление лучей в одной меридиональной плоскости, так как во всех меридиональных плоскостях существуют одинаковые условия для преломления лучей.

Из точки B , удаленной от оптической оси, выходит наклонный пучок лучей, образующий изображение в виде пятна рассеяния

B' . Чаще всего ограничиваются рассмотрением хода лучей в меридиональной и сагиттальной плоскостях. В первом случае имеем дело с *меридиональным* наклонным пучком лучей, рассматриваемым в плоскости чертежа, а во втором — с *сагиттальным*, ему перпендикулярным, содержащим главный луч меридионального пучка лучей. Меридиональные лучи в отверстии системы опираются на отрезок ab , а сагиттальные на cd .

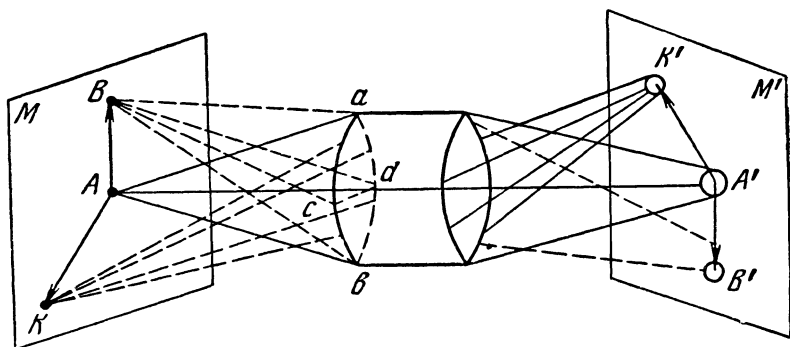


Рис. 33. Образование изображений широкими пучками лучей

Более точное знание структуры точек изображения дают *внемеридиональные*, или *косые* лучи, составляющие большую часть широкого пучка лучей. Широкий пучок лучей опирается на все отверстия и содержит меридиональные и сагиттальные лучи. Косые лучи не лежат в меридиональной плоскости. Такие лучи показаны выходящими из точки K . Любой пучок лучей, выходящих из точки вне оптической оси, например из точек B и K , имеет косые лучи.

Вычисление координат точек изображения, образованных выбранными для анализа лучами, дает возможность рассмотреть структуру точки изображения и найти размеры кружков и пятен рассеяния. Однако геометрические размеры этих кружков еще не указывают на достаточность приближения изображения реальной оптической системы к идеальной. Обычно их размеры достаточно велики, и для определения истинной картины изображения необходимо знать распределение световой энергии в кружках и пятнах рассеяния. Действительно, если преобладающая часть световой энергии соберется в одну точку, то именно эта точка будет определять изображение. В другой части пятна рассеяния образуется изображение с несравненно меньшей световой интенсивностью.

До недавнего времени к вычислению распределения световой энергии в «точке» изображения прибегали в исключительных случаях. В практике вычисления оптических систем ограничивались рассмотрением аберраций осевых и наклонных меридиональных

и сагиттальных лучей, и в особых случаях в сложных объективах — косых лучей. В настоящее время применение быстродействующих электронных вычислительных машин позволило выполнять сложные вычисления в кратчайшее время и сделало возможным не только быстро вычислять распределение световой энергии в кружке (пятне) рассеяния, но и контраст изображения.

При создании всякого рода наблюдательных приборов, работающих совместно с глазом, обычно ограничиваются рассмотрением аберраций осевого и наклонного пучков лучей, лежащих в меридиональной плоскости. Кроме того, рассматривают меридиональные и сагиттальные лучи, бесконечно близкие к главному лучу, иногда называемые элементарным астигматическим пучком. Сложные же объективы (фотографические, микрообъективы и др.) требуют при этом еще знания аберраций лучей, лежащих в сагиттальной плоскости.

Большое значение для оценки аберраций имеет сравнительный анализ с аберрациями известных систем. Сопоставление аберраций какой-либо новой оптической системы с аберрациями известной системы, близкой по назначению и устройству, позволяет с большей степенью вероятности установить допустимость той или иной аберрационной картины.

Условия наблюдения изображения являются решающими в вопросе о допустимости тех или иных аберраций. Существуют четыре главных вида наблюдения изображения:

1. Глаз человека рассматривает изображение через оптическую систему. Оптические системы, предназначенные для этой цели, называются *визуальными*. К ним, например, относятся зрительные трубы, микроскопы, спектроскопы и другие.

2. Глаз человека рассматривает изображение на экране. Оптические системы, образующие такие изображения, называются *проекционными*. К их числу относятся эпидиаскопы, проекторы, трансформаторы и др.

3. Изображение фиксируется каким-нибудь светочувствительным слоем. Глаз человека рассматривает изображение, зафиксированное этим слоем, без оптической системы, его образовавшей. Оптические системы для образования таких изображений называются *фотографическими*. К их числу относятся: киносъёмочные объективы, фотографические объективы, спектрографы и др. К этому же виду наблюдения изображений относят телевизионные объективы и объективы электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

4. Изображение образуется на фотокатод светоприемника (фотоэлемент, ФЭУ, термоэлемент и т. п.) и интегрально отображает яркость предмета. В этом случае изображение не имеет структуры, подобной предмету, а представляет собой площадку, равномерно освещенную в единицу времени. Изображение такого вида называется *интегральным*, а оптические системы, образующие такие изображения, называются *фотоэлектрическими*.

Глаз человека выполняет важную роль в наблюдении изображения — с его помощью человек оценивает качество изображения. Если недостатки оптической системы в изображении не могут быть обнаружены глазом, то такие изображения представляются человеку совершенными. Следовательно, знание разрешающей способности глаза для тех или иных случаев наблюдения позволяет более точно определять оптимальные размеры кружков (пятен) рассеяния. Например, если для визуальных приборов за предел разрешения глаза в угловой мере принимают 30—60 сек., то для проекционных систем в условиях кинотеатра — 2—3 мин..

Качество изображения оптических систем — это общий термин, включающий в себя два понятия:

1. Способность оптической системы отдельно передавать разные изображения. Это свойство называется *разрешающей способностью*.

2. Способность оптической системы правильно изображать контраст предмета.

Представим себе, что фотографируется предмет в виде чередующихся белых и черных полос. Оптическая система позволяет получить изображение этих отличающихся друг от друга по контрасту полос, малых по ширине. Но изображение имеет между полосами весьма малый контраст, и сами полосы не выглядят резкими, хотя и различны. Такая оптическая система имеет высокую разрешающую способность, но плохое качество изображения, так как не выполнено второе условие.

Качество изображения оптической системы определяется ее aberrациями. При рассмотрении aberrаций различают: 1) сферическую aberrацию, 2) отступление от условия синусов, 3) сферическую aberrацию наклонного пучка лучей, 4) меридиональную кому, 5) сагиттальную кому, 6) aberrации косых лучей, 7) астигматизм, 8) кривизну поля, 9) хроматизм положения, 10) сферическую aberrацию в зрачках, 11) хроматизм увеличения, 12) хроматизм увеличения, 13) хроматическую разность сферических aberrаций, 14) хроматическую aberrацию наклонного пучка лучей.

Сферическая aberrация и отступление от условия синусов определяются при рассмотрении в меридиональной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси.

Сферическая aberrация наклонного пучка лучей, меридиональная кома, дисторсия и сферическая aberrация в зрачках определяются при рассмотрении в меридиональной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной вне оптической оси.

Сагиттальная кома наклонного пучка лучей определяется при рассмотрении в сагиттальной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной вне оптической оси.

Aberrации косых лучей определяются из рассмотрения хода пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной вне

оптической оси, и опирающегося на все отверстия входного зрачка.

Астигматизм и кривизна поля изображения определяются при рассмотрении элементарного астигматического пучка, бесконечно близкого к главному лучу, выходящему из точки предмета вне оптической оси.

Хроматизм положения определяется из рассмотрения хода параксиальных лучей с различной длиной волны, выходящей из точки предмета, расположенной на оптической оси. Хроматическая разность сферических aberrаций определяется из рассмотрения в меридиональной плоскости хода лучей различной длины волны, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси. Хроматизм увеличения и хроматическая aberrация наклонного пучка лучей определяются из рассмотрения в меридиональной плоскости хода лучей различной длины волны, выходящих из точки предмета вне оптической оси.

§ 34. СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Под сферической aberrацией принято понимать aberrацию оптической системы, которая рассматривается для пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной на оптической оси.

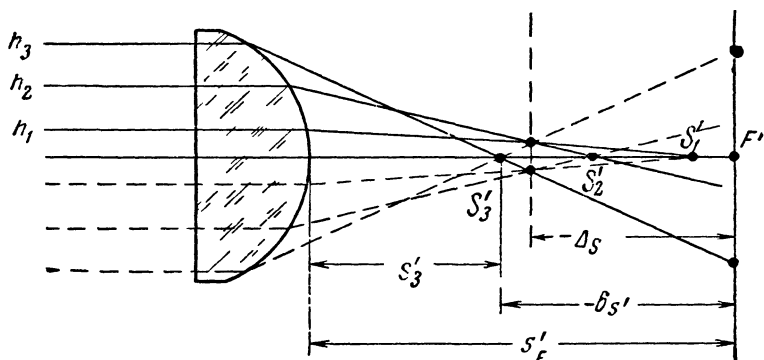


Рис. 34. Сферическая aberrация

Сферическая aberrация имеет место и для других пучков лучей, выходящих из точек предмета, удаленных от оптической оси, но в таких случаях она рассматривается как составная часть aberrаций всего наклонного пучка лучей.

Допустим, что предмет находится в бесконечности, и в оптическую систему поступает параллельный пучок лучей. Рассмотрим лучи, падающие на поверхность линзы, на высотах h_1 , h_2 и h_3 от оптической оси (рис. 34).

Первую плоскую поверхность линзы лучи проходят без преломления. Вторую поверхность они встречают под весьма значи-

тельными углами падения. Вследствие этого наиболее удаленные от оптической оси лучи преломляются всего сильнее и образуют точку схода, наиболее удаленную от фокальной плоскости.

В результате этого явления цилиндрический пучок лучей в пространстве предметов, после преломления линзой, в пространстве изображений получает вид не конуса, а некоторой воронкообразной фигуры, наружная поверхность которой вблизи узкого места называется каустической поверхностью. Световая энергия распределяется на значительную по величине каустическую поверхность а тем самым нарушается образование точечного изображения.

Расстояние по оптической оси между точками схода нулевых и крайних лучей называется *продольной* сферической аберрацией

$$\delta s' = s'_k - s'_F. \quad (34,1)$$

Если предмет расположен вблизи оптической системы, то вместо величины заднего вершинного фокусного расстояния берут расстояние от вершины последней поверхности системы до изображения s'_0 , и формула (34,1) приобретает вид

$$\delta s' = s'_k - s'_0. \quad (34,2)$$

В плоскости изображения получаем кружок рассеяния, диаметр которого δ' с достаточной точностью находим из выражения

$$\delta' = \frac{2h_1 \delta s'}{a'}, \quad (34,3)$$

где $2h_1$ — диаметр отверстия системы; a' — расстояние от системы до точки изображения; $\delta s'$ — продольная аберрация. Если предмет расположен в бесконечности, то $a' = f'$.

Сферическая аберрация объектива может быть выражена и в угловой мере:

$$\operatorname{tg} u' = \frac{h_1 \delta s'}{f'^2}. \quad (34,4)$$

Наименьший диаметр кружка рассеяния образуется на расстоянии Δ_s от плоскости изображения. Плоскость, соответствующую наименьшим кружкам рассеяния, называют *плоскостью наилучшей установки*. Однако не всегда в этой плоскости получается наилучшая резкость изображения, так как основным является распределение световой энергии в кружке рассеяния. Однако для некоторых оптических систем, например для осветительных (конденсоры), плоскость наилучшей установки, найденная по положению наименьшего диаметра кружка рассеяния, практически является наилучшей плоскостью изображения.

Сферическая аберрация положительной линзы отрицательна, а отрицательной линзы — положительна. Комбинируя положи-

тельные и отрицательные линзы, можно сконструировать объектив, отличающийся несравненно меньшей сферической aberrацией.

Все aberrации, в том числе и сферическую, обычно представляют в виде характеристических кривых.

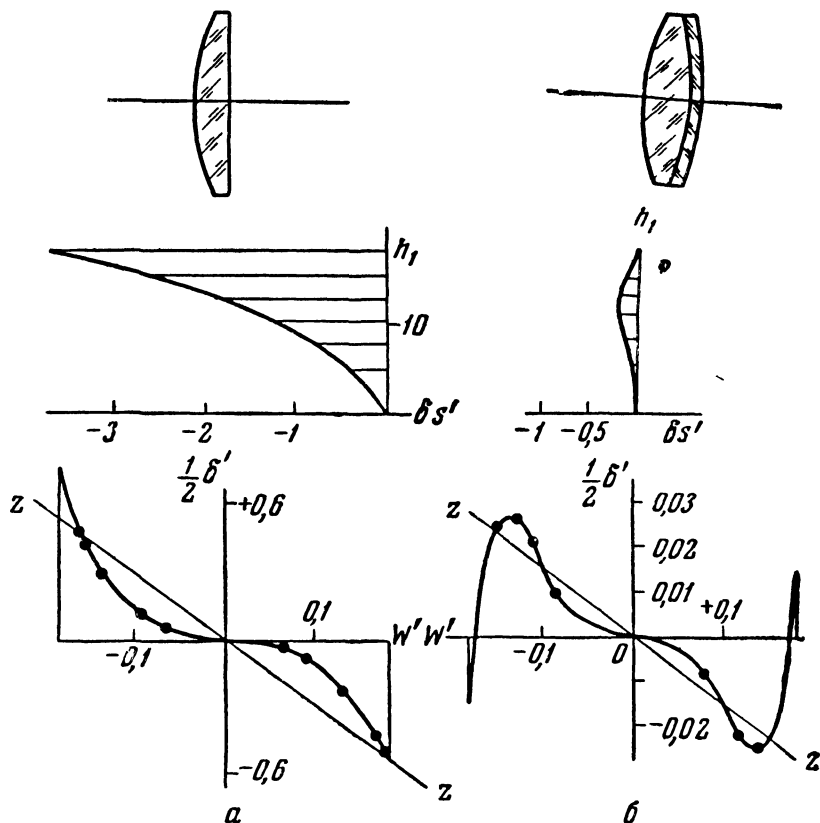


Рис. 35. Характеристические кривые сферической aberrации: сверху — продольные aberrации, внизу — поперечные aberrации: а — $f'=100$; $l:2,7$; $r_1=52$; $r_2=\infty$; $d=6,6$; $n=1,52$; б — $f'=100$; $l:2,7$; $r_1=62,61$; $r_2=-44,612$; $r_3=-126,34$; $d_1=11$; $d_2=2$; К8; ТФ2

Для построения характеристической кривой продольной сферической aberrации по оси абсцисс откладывают продольную сферическую aberrацию $\delta s'$, а по оси ординат — высоты лучей на входном зрачке h . Для построения аналогичной кривой поперечной aberrации по оси абсцисс откладывают тангенсы апертурных углов в пространстве изображений, а по оси ординат — радиусы кружков рассеяния.

На рис. 35 показаны характеристические кривые продольной

и поперечной сферических aberrаций одиночной линзы и двухлинзового склеенного объектива. Продольные aberrации показаны в одинаковом масштабе. В сложной системе aberrации значительно уменьшены. Такая система называется коррегированной на сферическую aberrацию. Поперечные aberrации по оси ординат показаны в разных масштабах, в отношении 1:30. В данном примере поперечные aberrации одиночной линзы примерно в 30 раз больше, чем у объектива, при равных фокусных расстояниях и относительных отверстиях.

Для положительной одиночной линзы характерным является отрицательное значение продольной сферической aberrации. Такая aberrация называется недокоррегированной. Если же вся характеристическая кривая сферической aberrации или ее большая часть находилась бы справа от оси ординат, aberrация была бы положительной и называлась бы перекооррегированной.

На графиках поперечных aberrаций через центр координат проведем вспомогательные прямые таким образом, чтобы кривая aberrации вверх и вниз от нее имела одинаковые отступления. На графике одиночной линзы это выдержано почти полностью, а для двухлинзового объектива имеем отступления от этого условия для обоих краев кривой, соответствующих aberrациям лучей, идущих в самой краевой зоне отверстия. Неточность проведения вспомогательной прямой оправдывается незначительным влиянием небольшого участка площади зрачка по сравнению со всем отверстием. Эти вспомогательные прямые позволяют определить положение плоскости наилучшей установки.

Тангенсы угла наклона этой прямой указывают на величину смещения плоскости наилучшей установки. Изображая поперечные aberrации так, как показано на рис. 35, Δ_s можно вычислить по следующей формуле*:

$$\Delta_s \cong \frac{\delta'}{w'} \quad (34,5)$$

Так, например, для случая одиночной линзы имеем

$$\Delta_s \cong 3,0 \text{ мм},$$

а для объектива

$$\Delta_s \cong 0,15 \text{ мм}.$$

Вспомогательная прямая является как бы новой ординатой для кривой, относительно которой можно определять поперечные aberrации в плоскости наилучшей установки. Так, например, для одиночной линзы имеем поперечные aberrации (кружок) в 0,3 мм, а для объектива 0,01 мм.

Если сферическая aberrация уничтожена (коррегирована) для

* См. Д. С. Волосов. Методы расчета сложных фотографических систем. Л.— М, Гостехиздат, 1948, стр. 186.

края входного зрачка, то величина Δ_s может быть определена по формуле

$$\Delta_s \cong 0,8\delta s'_{\text{зоны}}. \quad (34,6)$$

Зоной входного зрачка называют ординату на зрачке, равную $0,35D$. Для этой высоты луча сферическая абберация обычно приобретает наибольшее значение, тогда как для края отверстия она равна нулю.

Пример 17. Продольная сферическая абберация объектива $f'=200$ мм для пучка лучей диаметром 40 мм составляет 0,16 мм. Определить диаметр кружка рассеяния и сферическую абберацию в угловой мере.

Решение. Дано $f'=200$ мм; $h_1=20$ мм и $\delta s'=0,16$ мм. Применив формулы (34,3) и (34,4), получим

$$\delta' = 0,032 \text{ мм}, \quad \text{tg } u' = 0,00008 \text{ и } u' = 2,7''.$$

§ 35. ОТСТУПЛЕНИЕ ОТ ЗАКОНА СИНУСОВ

Немецким физиком Аббе в прошлом веке было сформулировано условие образования совершенного изображения бесконечно малого элемента площади предмета широкими пучками лучей. Это условие, известное под названием *апланатизма*, требует, чтобы, во-первых, была уничтожена сферическая абберация для центра предмета и, во-вторых, был выполнен для всего отверстия закон синусов. При невыполнении условия апланатизма точки изображения, лежащие вне оптической оси, не будут иметь совершенного изображения в сопряженной плоскости.

Закон синусов имеет вид

$$n l \sin u = n' l' \sin u', \quad (35,1)$$

или через линейное увеличение

$$\beta = \frac{n \sin n}{n' \sin u'}. \quad (35,2)$$

Обозначая через β линейное увеличение для нулевого луча, а через β_k увеличение, вычисляемое для конкретного луча, выходящего из точки на оси оптической системы, получим отступление от закона синусов:

$$\delta\beta = \beta_k - \beta. \quad (35,3)$$

Если же предмет расположен в бесконечности, то отступление от закона синусов принимает следующий вид:

$$\delta f' = \frac{h_k}{\sin u'_k} - f'. \quad (35,4)$$

Здесь h_k — высота луча на зрачке входа, а u'_k — апертурный

угол в пространстве изображений, соответствующий данному лучу.

Штебле и Лигоцкий выдвигали условие подобия каустических поверхностей всех косых пучков лучей, если сферические аберрации не уничтожены. Такое условие получило наименование *изопланатизма*, а его выражения явились обобщением закона синусов.

В ряде случаев выполнение условий апланатизма и изопланатизма позволило получить достаточно хорошие практические результаты, в частности улучшить качества изображения объективов микроскопов. Однако выполнение этих условий для широкоугольных и светосильных оптических систем не означает достижения совершенных изображений.

Опыт показал, что при вычислении оптических систем отступление от закона синусов является удобным математическим параметром, выражающим некоторую закономерность в исправлении аберраций наклонных пучков лучей и, в частности, сферической аберрации наклонного пучка лучей и меридиональной комы.

Точки, в которых отсутствует сферическая аберрация и соблюден закон синусов, называются *апланатическими*. А точки, образуемые подобными каустическими поверхностями пучков лучей, — *изопланатическими*.

В фотографической оптике объективы, в которых соблюдено условие апланатизма, называются *апланатами*. Эти объективы в настоящее время имеют весьма малое распространение из-за небольшого поля зрения и малой светосилы.

§ 36. КОМА

В наклонном пучке лучей, кроме сферической аберрации, обнаруживается и нарушение симметрии всего строения, которое называют *комой*. Из точек *B* и *K* (рис. 33) выходят пучки лучей, опирающиеся на входной зрачок оптической системы. Лучи этих пучков образуют в плоскости изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях, меридиональном и сагиттальном, несимметричное пятно рассеяния. Кому в меридиональном сечении называют *меридиональной*, в сагиттальном сечении — *сагиттальной*.

Основной причиной комы является, как и в случае сферической аберрации, кривизна поверхности. Но в осевом пучке, вверх и вниз от оптической оси, существует полная симметрия в условиях преломления, а для наклонного пучка лучей этой симметрии нет. Поэтому верхние и нижние части пучка после преломления получают различные погрешности. Например, нижние лучи преломляются сильнее (рис. 36,а), а верхние слабее. Здесь показана меридиональная кома, характерная для одиночной положительной линзы.

Несимметричность пятна рассеяния в меридиональной плоскости определяется формулой

$$k = \frac{l'_{+m} + l'_{-m}}{2} - l'_{гл.} \quad (36,1)$$

Меридиональная кома отсутствует в том случае, если выражение (36,1) равно нулю. Но этого условия недостаточно для образования совершенного изображения. На рис. 36,б в плоскости изображения F' видно большое пятно рассеяния, обусловленное сферической aberrацией. Возможен и такой случай, когда все меридиональные лучи пересекаются вблизи точки B' (рис. 36,в) та-

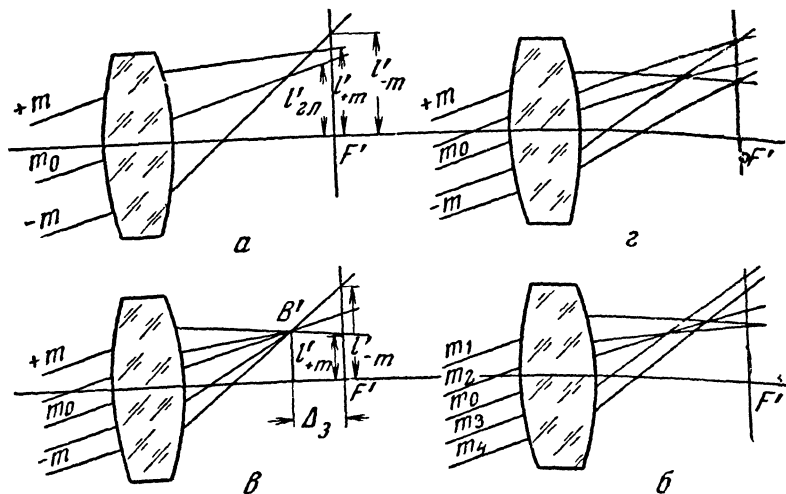


Рис 36. Аберрации наклонного пучка лучей

ким образом, что меридиональная кома, определяемая уравнением (36,1), равна нулю. Но в плоскости изображения нет одной точки, а есть пятно рассеяния $\delta' = l'_{-m} - l'_{+m}$.

Меридиональную кому в чистом виде можно наблюдать, когда каждая пара лучей пересекается в плоскости изображения (рис. 36,г), но точки пересечения не лежат на главном луче, а значит, отсутствует сферическая aberrация пар лучей. Только в том случае, когда все лучи пересекаются в одной точке и эта точка находится в плоскости изображения, отсутствуют и меридиональная кома, и сферическая aberrация наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости. Аналогичным образом можно рассмотреть явление и в сагиттальной плоскости.

Из рассмотрения рис. 36 можно сделать вывод о том, что собственно меридиональную кому и сферическую aberrацию пучка в меридиональной плоскости следует рассматривать совместно. Так и делают в действительности, употребляя общий термин «кома», понимая под этим aberrации лучей в меридиональной плоскости.

Для определения погрешностей лучей вычисляют несколько наклонных лучей от m_1 до m_k (рис. 36,б), направляющихся во входной зрачок оптической системы. Вверх от главного луча ординаты получают положительное значение, а вниз — отрицательное. Результаты вычисления дают ординаты этих лучей в плоскости изображения.

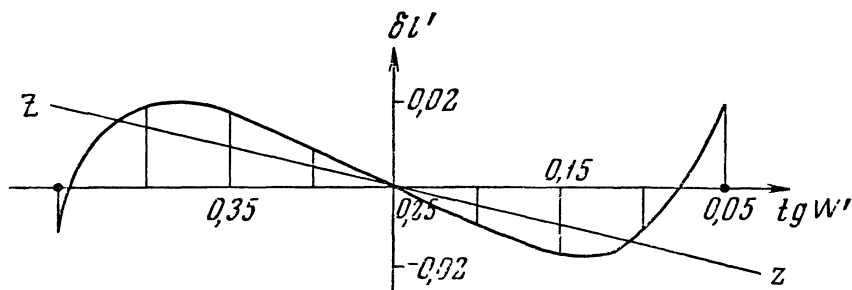


Рис. 37 Характеристическая кривая aberrаций наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости

Откладывая по оси абсцисс величины изображений различных лучей, вышедших из одной и той же точки предмета, или их разности от теоретической величины изображения, а по оси ординат — разности углов наклона вычисляемого и главного лучей, получим характеристическую aberrацию наклонного пучка лучей. Эта кривая позволяет судить о степени коррекции оптической системы на aberrации наклонного пучка лучей.

Погрешность отдельного луча определяется

$$\delta l' = l'_m - l'. \quad (36,2)$$

Эта формула справедлива и для меридиональной и для сагиттальной плоскостей. Индекс m означает ординату на входном зрачке.

Характеристическая кривая aberrации наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости показана на рис. 37. Вспомогательная прямая zz указывает на положение плоскости наилучшей установки Δ_s для данного угла наклона лучей. Очевидно, что для случая, показанного на рис. 36,в, кривая превратилась бы в прямую, совпадающую со вспомогательной прямой. Но нам необходимо получить в пределах всей площади изображения наилучшую резкость. Следовательно, для всех наклонов лучей плоскость наилучшей установки должна быть в одном и том же месте. Отсюда вытекает условие: наклоны вспомогательных прямых на всех графиках поперечных aberrаций должны быть одинаковыми.

При изучении или вычислении реальных систем ограничиваются одним наклоном лучей в случае поля зрения до 3° , двумя наклонами при поле зрения 30° , тремя наклонами в случае поля зре-

ния 60° и т. д. Как уже указывалось, для ответственных сложных оптических систем, главным образом для фотографических объективов, необходимо знать полный контур пятна рассеяния. Для этого недостаточно ограничиться знанием aberrаций в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Необходимо по специальным схемам вычислить косые лучи. Для этого на зрачке входа выбираются точки, для которых и вычисляются лучи. Результатом вычисления являются меридиональная и сагиттальная составляющие точки изображения, позволяющие построить контуры «точки» отражения.

На рис. 38 показаны aberrации косых лучей (внемеридиональных) лучей объектива «Иниар» $f' = 360$ мм, 1 : 3, вычисленные для угла поля зрения 14° .

Слева на входном зрачке показаны точки 1, 2, 3, 4 и 5, определяющие координаты лучей, для которых был построен контур aberrаций. Для точек 1 и 2 вычисления производятся по обычным схемам вычисления главных лучей в меридиональной плоскости.

Кома является важнейшей aberrацией. Если кома и сферическая aberrация для всего отверстия и всех наклонов лучей полностью устранены, то для монохроматического света образуется безукоризненное изображение.

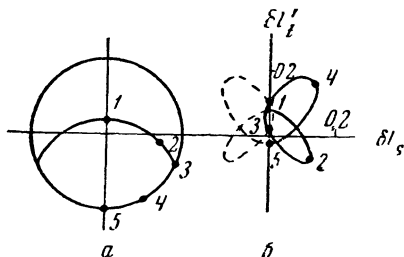


Рис 38 Aberrации косых лучей *a* — координаты на зрачке; *b* — контур пятна рассеяния

§ 37. АСТИГМАТИЗМ

Астигматизм называется явление, которое заключается в том, что лучи одного и того же пучка, идущие по отношению друг к другу в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, после преломления в оптической системе не собираются в одну точку, а образуют две точки схода.

В точку *C* направляется главный луч, под углом к оптической оси (рис. 39). Рассмотрим условия преломления лучей, как бы выделяемых крестообразной диафрагмой. Одни лучи, в меридиональной плоскости, падают на элементарную площадку по меридиану *mm*, а другие, в сагиттальной плоскости, падают на параллель *ss*.

Так как кривизны по параллели и меридиану различны, то и преломление лучей различно. Сагиттальные лучи образуют точку схода P'_s . В этом месте изображение представлено в виде вертикальной линии или овала. Меридиональные лучи пересекаются в точке P'_m . Здесь изображение имеет вид линии или овала, расположенного горизонтально. Астигматизм в изображении прояв-

ляется в том, что вертикальные и горизонтальные элементы изображаются различно, а точка стремится изобразиться в виде линии, а практически — в виде овала.

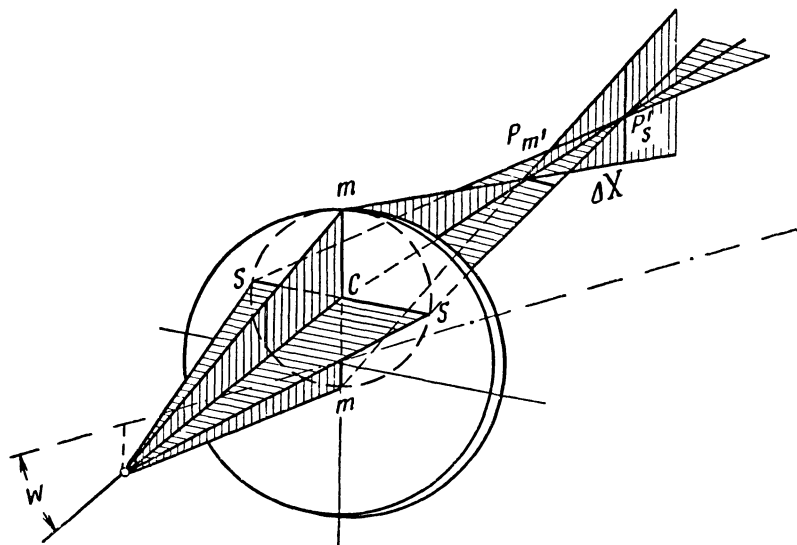


Рис. 39. Астигматизм

Расстояние между точками схода меридиональных и сагиттальных лучей Δ_a называется *астигматической разностью*. Астигматическая разность является мерой астигматизма.

Для пучка лучей, идущего из точки на оси оптической системы, астигматизм отсутствует, так как в обоих направлениях кривизны поверхностей одинаковы. Наличие астигматизма в центре поля указывает на нарушение центрированности оптической системы. С этим явлением приходится встречаться в практике сборки оптических деталей приборов.

Для определения астигматизма в реальной оптической системе производят вычисление меридиональных и сагиттальных лучей, идущих бесконечно близко к главному лучу. Результат вычисления представляется в виде кратчайших расстояний точек фокусов меридиональных x'_m и сагиттальных x'_s лучей от плоскости изображения. Найденные значения x'_m и x'_s позволяют построить характеристические кривые астигматизма, указывающие сечения фокальных поверхностей.

На рис. 40 показаны характерные для фотографических объективов кривые астигматизма объектива «Орто-Ниар» $f' = 180$ мм; $1:7,7$; $2\omega = 58^\circ$, для положения предмета в бесконечности. Эти кривые показывают расположение фокальных поверхностей и указывают на отступление от плоского изображения.

Посередине между сагиттальной и меридиональной фокальными поверхностями располагается поверхность, в которой пятна рассеяния имеют наименьшую абсолютную величину. Такая усредненная поверхность определяет поверхность изображения и называется *кривизной поля*. Она указывает степень отступления фокальной поверхности от плоскости. Наличие кривизны поля показывает, что изображение образуется не на плоскости, а на некоторой кривой поверхности. Исправление астигматизма и кривизны поля имеет наибольшее значение для фотографических и проекционных систем, в которых изображение фиксируется или рассматривается на плоскости.

Для визуальных систем кривизна поля имеет меньшее значение, так как глаз человека, обладая способностью аккомодации, может последовательно осматривать различные участки поля изображения.

В параллельных пучках лучей астигматизм оценивается в диоптриях:

$$L_m = -\frac{1000x'_m}{f'^2} \cos \omega \quad (37,1)$$

и

$$L_s = -\frac{1000x'_s}{f'^2} \cos \omega, \quad (37,2)$$

где f' — фокусное расстояние окуляра, а x'_m и x'_s — суммарные аберрации всей оптической системы в передней фокальной плоскости окуляра. Практика показывает, что для визуальных систем изображение остается хорошим, если L_m , L_s и разность между ними не превосходит двух диоптрий. Оптическая система, свободная от астигматизма, называется *анастигматом*.

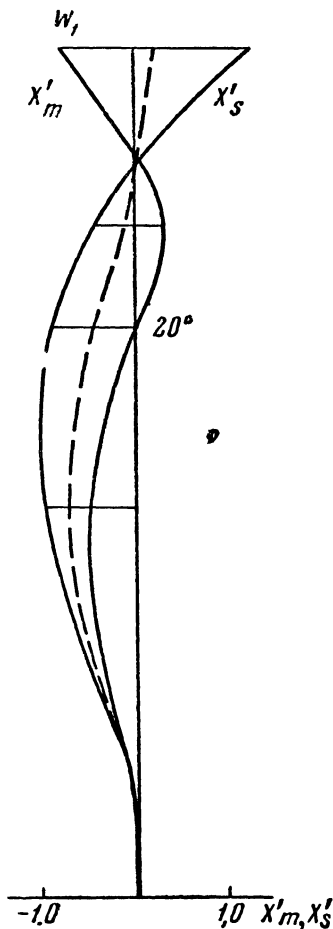


Рис. 40. Характеристические кривые аберраций астигматического бесконечно тонкого пучка лучей объектива «Орто-Нипар» $f' = 180$ мм, 1.7,7

§ 38. ДИСТОРСИЯ

Дисторсия есть аберрация, которая проявляется в том, что нарушается подобие изображения предмету. В этом случае отношение тангенсов углов поля зрения и поля изображения не сохра-

няет своего постоянного значения для точек по всему полю изображения. Дисторсия не влияет на резкость изображения. Оптическая система, свободная от дисторсии, называется *ортоскопической*.

Дисторсия проявляется в том, что правильный квадрат изображается в виде подушки или бочки или еще более сложной фигуры.

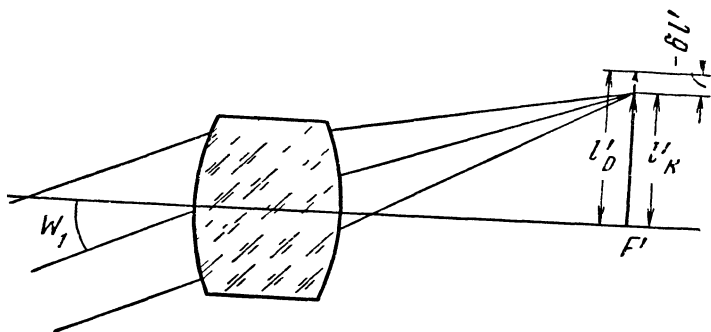


Рис 41 Дисторсия

В первом случае дисторсия называется *подушкообразной*, или *положительной*, так как величина действительного изображения больше теоретического. Во втором случае — *бочкообразной*, или *отрицательной*. Обычно одна часть изображения является бочкообразной, а другая — подушкообразной. Особо важное значение имеет дисторсия в оптических измерительных приборах, в частности в объективах для фотографических и картографических работ.

Абсолютная дисторсия, называемая *оптической*, выражается уравнением

$$\delta l' = l'_k - l'_0. \quad (38,1)$$

Теоретическая величина изображения l'_0 (рис. 41) находится по формуле (12,5) без учета знака:

$$l'_0 = f' \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,2)$$

Если предмет l_1 расположен на конечном расстоянии от системы, то l'_0 можно найти из формулы линейного увеличения (11,1). Величина изображения l'_k вычисляется или измеряется по главному лучу, проходящему через центр входного зрачка.

Коррегирование оптических систем на абберации производят таким образом, чтобы наименьшие абберации соответствовали точке изображения на главном луче. В этом случае можно предполагать, что максимум световой энергии в пятне рассеяния также соответствует точке пересечения главного луча с плоскостью изображения.

Подставив V_0 из формулы (38,2) в уравнение (38,1), получим

$$\delta l' = l'_k - f' \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,3)$$

В этой формуле величина f' может и не быть равна величине заднего главного фокусного расстояния, вычисляемого по нулевому лучу. Справедливость этого положения вытекает из того, что фокусное расстояние определяет масштаб изображения, и, если дисторсия пропорционально увеличивает изображение, то изменяется размер изображения, а форма его не искажается. В этом случае остаточная дисторсия называется *фотограмметрической*, или *истинной*.

В отличие от оптической, формула этой дисторсии имеет вид

$$\delta l' = l'_k - f'_k \operatorname{tg} \omega_1, \quad (38,4)$$

где f'_k — фотограмметрическое значение фокусного расстояния, в действительности указывающее на масштаб изображения.

Введение фотограмметрического фокусного расстояния всегда уменьшает дисторсию по сравнению с оптической, кроме того редкого случая, когда оптическая система в изображении имеет одновременно одинаковые положительные и отрицательные по абсолютной величине искажения. В этом случае заднее фокусное расстояние равно фотограмметрическому.

Характеристическая кривая дисторсии показана на рис. 42, где по оси абсцисс отложены величины искажения $\delta l'$, а по оси ординат — углы поля зрения. График дисторсии позволяет перейти от оптической дисторсии к фотограмметрической. Для этого через начало координат проводится прямая, пересекающая кривую оптической дисторсии на две половины таким образом, чтобы по отношению к этой прямой дисторсия была одинаковой по обе ее стороны.

Дисторсия равна нулю в симметричном объективе при увеличении $\beta = -1$. Если $\beta \neq -1$, то отношение фокусных расстояний половинок объектива должно быть по абсолютной величине равно линейному увеличению. Один и тот же объектив обычно используется при различных увеличениях. Для того чтобы при этом не

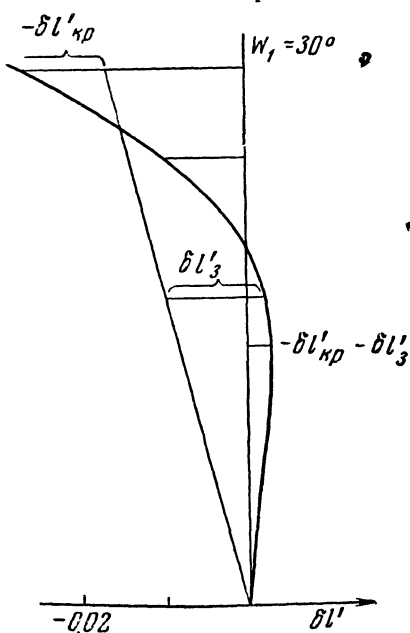


Рис. 42. График дисторсии

возникла дисторсия, нужно, чтобы отсутствовала сферическая aberrация в зрачках. Сферическая aberrация в зрачках заключается в том, что главные лучи, проходящие через центр действующей диафрагмы под различными углами, после преломления при выходе из половины объектива не пересекаются с оптической осью в центре выходного зрачка. Для определения сферической aberrации в зрачках вычисляют главные лучи из центра действующей

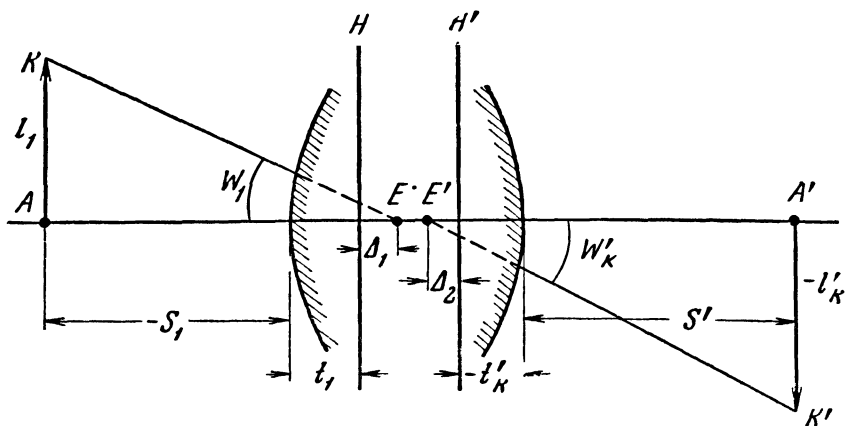


Рис. 43 Влияния сферической aberrации в зрачках на дисторсию

диафрагмы под одними и теми же углами, через левую и правую половинки объектива. Для того чтобы главный луч, направляющийся в центр входного зрачка, выходил из центра зрачка системы под тем же углом, необходимо, чтобы зрачки совпадали с главными плоскостями оптической системы, так как угловое увеличение в главных плоскостях равно 1. При этих условиях дисторсия объектива зависит от линейного увеличения aberrации в зрачках и углов поля зрения и изображения.

На рис. 43 в соответствии с общепринятыми правилами знаков показаны отрезки и углы, известные из вычислений главных лучей.

Луч KE есть главный луч, проходящий через переднюю половину объектива, а луч $E'K'$ — через заднюю половину объектива, Δ_1 и Δ_2 — сферическая aberrация в зрачках, H и H' — плоскости входного и выходного зрачков. В общем случае углы w_1 и w'_k не равны друг другу.

Для определения дисторсии всего объектива определим дисторсию передней половины, затем ее перенесем с учетом линейного увеличения в пространство изображения и прибавим собственно дисторсию задней половины объектива. Величина l_1 есть величина действительного предмета. Из рис. 43 следует:

$$l_1 = (t_1 - s_1) \operatorname{tg} w_1.$$

Величина же теоретического предмета находится по формуле

$$l_0 = (t_1 + \Delta_1 - s_1) \operatorname{tg} \omega_1.$$

Разность этих предметов есть дисторсия передней половины объектива, т. е.

$$\delta l_I = -\Delta_1 \operatorname{tg} \omega_1.$$

Таким же образом найдем дисторсию задней половины объектива:

$$\delta l'_{II} = \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k. \quad (38,5)$$

Дисторсия передней половины объекта в плоскости изображения A' увеличена пропорционально увеличению

$$\delta l'_I = -\Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,6)$$

Дисторсия объектива в целом

$$\begin{aligned} \delta l' &= \delta l'_I + \delta l'_{II}, \\ \delta l' &= \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k - \Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \end{aligned} \quad (38,7)$$

Если объектив строго симметричен, то $\Delta_1 = -\Delta_2$ и $\omega_1 = \omega'_k$, тогда, согласно уравнению (38,7),

$$\delta l' = \Delta_2 (1 + \beta) \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,8)$$

Пример 18. Дисторсия симметричного объектива при масштабе съемки 1 : 2 в пределах некоторого поля зрения составляет 0,08 мм. Определить дисторсию этого объектива в пределах этого же поля зрения для масштаба съемки 2 : 1.

Решение. Дано: $\delta l'_1 = 0,08$ мм, $\beta_1 = -0,5$.

Необходимо найти $\delta l'_2$ при $\beta_2 = -2$.

На основании формулы (38,8) имеем

$$\delta l'_2 = \frac{\delta l'_1 (1 + \beta_2)}{1 + \beta_1} = -0,16 \text{ мм.}$$

§ 39. ХРОМАТИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Оптическая система, преломляя лучи света и разлагая белый свет на составные части, смещает изображения в различных лучах спектра относительно друг друга. Это явление называется *хроматической aberrацией*, или *хроматизмом*. Хроматическая aberrация проявляется в окрашивании изображения.

Аберрации, ранее рассмотренные для монохроматического света, характерны для всех лучей спектра. Но полный анализ всех aberrаций для лучей с определенными длинами волн был бы весьма сложен, поэтому ограничиваются рассмотрением отдельных видов хроматической aberrации.

Основными видами хроматической aberrации являются: 1) хроматизм положения, или хроматическая aberrация нулевых лучей; 2) хроматическая разность сферических aberrаций; 3) хроматизм увеличения; 4) хроматическая разность aberrаций наклонных лучей в меридиональной плоскости. В особых случаях рассматривают и астигматизм цветных лучей.

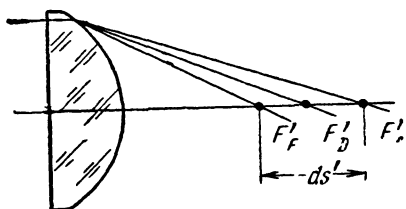


Рис 44 Хроматическая aberrация

Хроматизм рассматривается для определенных лучей спектра. Таковыми лучами для приборов, работающих совместно с глазом наблюдателя, называемых визуальными, являются лучи в диапазоне длин волн от линии F с длиной волны 486 нм и до линии C с длиной волны 656 нм . Эти лучи для нашего глаза определяют видимый спектр.

Если приборы предназначаются для фотографирования изображения в других лучах спектра (инфракрасных, ультрафиолетовых, лучах Рентгена и др.), то хроматизм рассматривается для лучей с соответствующей длиной волны.

Если луч света падает на линзу на конечном расстоянии от оптической оси (рис. 44), то при разложении на составные части он образует различные точки пересечения с оптической осью F'_F , F'_D , F'_C и т. д.

Хроматическая aberrация положения по оптической оси находится по формуле

$$ds' = s'_\lambda - s'_{0,D}. \quad (39,1)$$

Хроматическая aberrация положения всегда определяется по отношению к положению теоретической плоскости изображения. Эта плоскость от оптической системы расположена на расстоянии $s'_{0,D}$. Если за основной луч принимается не желтый D , а какой-нибудь иной, то вместо $s'_{0,D}$ принимается луч $s'_{0,\lambda}$.

Хроматическая aberrация положения одиночной тонкой линзы для бесконечно удаленного предмета может быть найдена путем дифференцирования формулы (20,1), при $d=0$:

$$df'_{xp} = -\frac{dnf'}{n-1}.$$

Заменяя $\frac{n-1}{dn} = v$ по формуле (7.2), получим

$$df'_{xp} = -\frac{f'}{v}. \quad (39,2)$$

Разность положения фокусов нулевых лучей различных длин волн по оптической оси указывает на хроматизм положения оптической системы любой сложности.

Комбинируя положительные и отрицательные линзы с различным коэффициентом дисперсии, удается в значительной степени уменьшить хроматизм положения. Такие оптические системы называются *ахроматическими*, а объективы — *ахроматами*. Процесс исправления хроматической aberrации называется *ахроматизацией*. Хроматическую aberrацию нулевых лучей можно изобразить

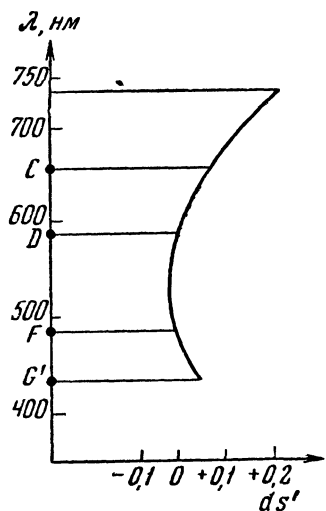


Рис 45 Хроматизм положения и вторичный спектр

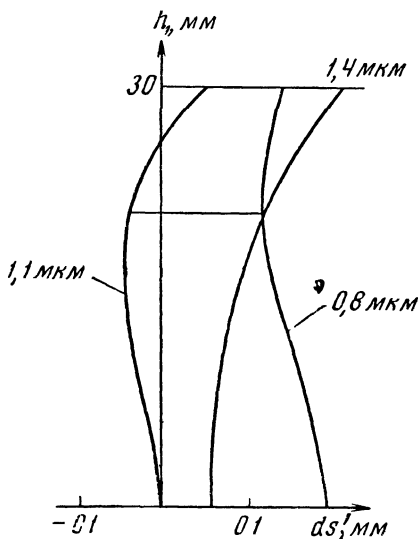


Рис 46 Сферохроматическая aberrация объектива пеленгатора $f' = 360$ мм.

1 6

жать графически, откладывая по оси ординат длины волн, а по оси абсцисс хроматическую aberrацию вдоль оптической оси. Хроматическая кривая хроматизма положения ахроматической системы показана на рис. 45.

Здесь для двух лучей спектра хроматизм отсутствует, например для лучей спектра G' и C или для лучей с длинами волн 450 и 620 нм.

Если для двух лучей спектра хроматическая aberrация положения уничтожена, то остаточная хроматическая aberrация называется *вторичным спектром*. При этом рассматривают весь участок изучаемого спектра. Так, например, на рис 45, рассматривая ахроматизацию в пределах лучей спектра G' и C , имеем вторичный спектр в 0,09 мм. Часто график хроматизма положения называют графиком вторичного спектра. Если хроматизм положения исправлен для трех лучей спектра, то остаточную aberrацию называют третичным спектром и т. д. Но не только для нулевых лучей должен быть исправлен хроматизм, он должен быть исправлен и для всех осевых и наклонных пучков лучей.

Полного устранения хроматической aberrации в наклонных пучках достигнуть не удается. Разности величины изображения, образованных различными лучами спектра, должны быть существенно малы. Кроме того, эти изображения должны быть расположены в одной плоскости.

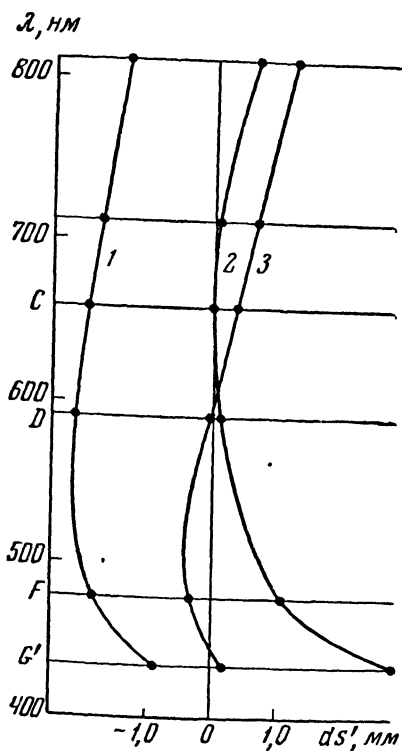


Рис. 47. Хроматическая aberrация фотообъектива «Индустар-17», $f' = 500$ мм, 1 : 5; 1 — зона, 2 — край, 3 — ось

Если оптическая система образует совпадающие изображения для различных лучей спектра, например для трех, то она называется *апохроматом*. Апохромат, как правило, имеет уменьшенный вторичный спектр, а если его хроматизм положения характеризуется третичным спектром, то он значительно меньше вторичного. Апохроматы предназначаются для фотографирования цветных картин (полиграфия, кинематография, телевидение).

Лучи, падающие на линзу, на различных высотах преломляются, разлагаясь на составные части по-разному. Это явление аналогично сферической aberrации и может быть графически показано на графике сферической aberrации (рис. 46). Оно называется *сферохроматической aberrацией*. Иногда разность сферических aberrаций для различных лучей спектра называют *хроматической разностью сферических aberrаций*. Она полностью характеризует резкость изображения точки на оптические оси.

Часто характеристические кривые хроматической разности сферических aberrаций показываются на графике вторичного спектра (рис. 47). Здесь показана хроматическая aberrация фотографического объектива «Индустар-17», $f' = 500$ мм, 1 : 5. В обоих случаях идеальным было бы то положение, если бы все три кривые выпрямились, сделались вертикальными и слились бы вместе.

Для точек изображения вне оптической оси существуют те же причины возникновения хроматизма. На оптической оси встречаемся с окрашиванием кружков рассеяния, а вне оптической оси — с окрашиванием пятен рассеяния.

Наклонный пучок лучей также разлагается на составные части, и лучи с различной длиной волны пересекают плоскость изображения в различных точках. Разность величин цветных изображений называется *хроматизмом увеличения* (рис. 48)

$$dl' = l'_F - l'_C, \quad (39,3)$$

или в общем случае

$$dl' = l'_{\lambda_1} - l'_{\lambda_2}. \quad (39,4)$$

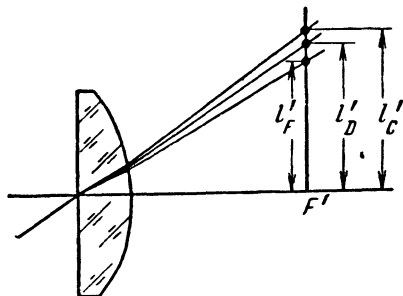


Рис. 48. Хроматизм увеличения

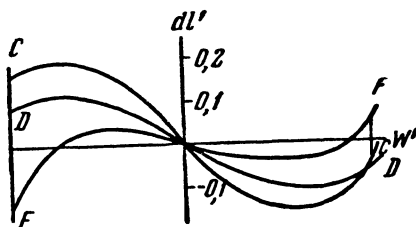


Рис. 49. Хроматическая разность aberrаций наклонных лучей

При рассмотрении хроматизма увеличения учитывают хроматическую разность aberrаций наклонных лучей в меридиональной плоскости. Это явление аналогично меридиональной коме и сферической aberrации наклонного пучка лучей, но рассматривается для различных длин волн. Она может быть графически показана на графике меридиональной комы (рис. 49). В данном примере для главного луча хроматизм увеличения отсутствует, но хроматическая aberrация наклонных лучей значительна, и можно предполагать, что изображение точки окрашено.

Исправление aberrаций в оптической системе для видимой части спектра называется *оптической*, или *визуальной*, коррекцией. Для этой части спектра (C, D и F) производят исправление хроматизма в приборах, работающих совместно с глазом человека, а также фотографических объективах, предназначенных для съемок на панхроматических и цветных светочувствительных материалах. В остальных случаях мы встречаемся с *актиничной*, или *фотографической*, коррекцией.

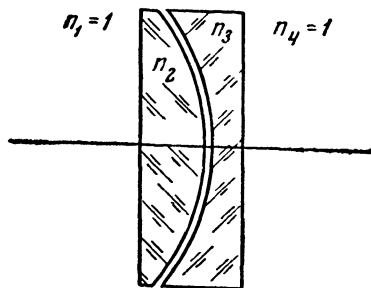


Рис. 50. Гиперхроматическая линза $f' = \infty$, $n_2 = n_3$, $v_2 \neq v_3$

Фотографические объективы для обычной штриховой, тоновой и полутоновой съемки исправляются для лучей спектра D и G, так как диапозитивные эмульсии мало чувствительны к красным лучам спектра.

Объективы апохроматы для полиграфических репродукционных цветных съемок должны иметь исправление для лучей спектра от C до G' . Специальные объективы для съемок в инфракрасных лучах спектра имеют диапазон длин волн, соответствующий условиям работы. При этом за основной луч во многих случаях выбирают не D , а луч, соответствующий максимуму светочувствительности при съемке. В таких случаях рассматривают совместно спектральные свойства светофильтров, фотокатодов или фотографических слоев и на основании этого выбирают длину волны света, соответствующую максимуму освещенности в плоскости изображения.

Для осуществления перехода от одного состояния коррекции в другое служит *гиперхроматическая* линза (рис. 50) с оптической силой, равной нулю. Показатели преломления ее составляющих для основного луча равны, но коэффициенты дисперсии различны, вследствие этого она влияет на изменение хроматизма положения той системы, совместно с которой применяется.

§ 40. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Разрешающей способностью, или разрешающей силой, называется способность оптической системы изображать отдельно две точки.

Если аберрации в системе полностью отсутствуют, то дифракция света устанавливает предел разрешению. Влияние дифракции света на разрешающую способность и теория последней рассматриваются в физической оптике.

Для нахождения разрешающей способности объектива воспользуемся формулой разрешаемого углового расстояния для самосвещающихся объектов *

$$\sin \psi = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (40,1)$$

где D — диаметр входного зрачка. Этой формуле соответствует такое положение дифракционных колец в изображении, когда первое темное кольцо одного кружка проходит через центр другого.

Максимум спектральной чувствительности глаза соответствует $\lambda = 560$ нм. Подставив в формулу (40,1) $\lambda = 560$ нм, выразив угол ψ в секундах, а диаметр входного зрачка в миллиметрах, получим известную формулу, определяющую разрешающую способность объектива (в секундах):

$$\psi = \frac{140}{D}. \quad (40,2)$$

В некоторых случаях, например в геодезии, принимают

$$\psi = \frac{122}{D}. \quad (40,3)$$

* См. Г. С. Ландсберг. Оптика. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 196.

Опыт показал справедливость этой формулы. Реальные оптические системы не превосходили этот предел, но многие геодезические и астрономические объективы его достигли.

Разрешающую способность оптических приборов определяют при помощи тест-объектов абсолютного контраста в виде так называемых *мир*. Различаются миры *штриховые* (рис. 51,а) и *ра-*

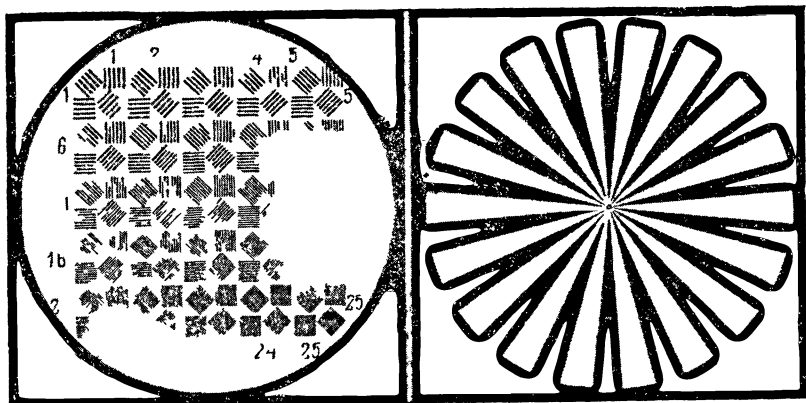


Рис 51 Миры а — штриховая, б — радиальная

диальные (рис. 51,б). Штриховая мира представляет собой группу семейств разноразмещенных штрихов. Штрихи четырех семейств ориентированы друг по отношению к другу под углом 45° . В пределах одного семейства штрихи параллельны и одинаковы по ширине. Таких групп семейств обычно бывает 16 или 25. Ширина штрихов от группы к группе растет в геометрической прогрессии.

Между серединами любых пар одноименных штрихов и разрешающей способностью в угловой мере имеется простая зависимость

$$\delta = p \operatorname{tg} \psi, \quad (40,4)$$

или

$$\delta = f' \operatorname{tg} \psi. \quad (40,5)$$

Мира может непосредственно наблюдаться на расстоянии p от глаза или объектива испытуемого прибора или устанавливаться в фокальной плоскости объектива коллиматора с фокусным расстоянием f' .

Разрешающая способность N в последнем случае определяется формулой

$$N = \frac{1}{f' \operatorname{tg} \psi}. \quad (40,6)$$

Штриховая мира весьма удобна для практических измерений разрешающей способности любых оптических приборов.

Радиальная мира преимущественно применяется для испытания фотографических объективов. Допустим, что диаметр разрешаемого круга H . В пределах длины окружности πH имеется m черных штрихов. За величину разрешения, как и ранее, принимается расстояние между центрами черных (или белых) штрихов. Отсюда ширина штриха

$$d = \frac{\pi H}{2m}, \quad (40,7)$$

а разрешаемое расстояние

$$\delta = \frac{\pi H}{m}. \quad (40,8)$$

Переходя к числу штрихов на 1 мм, получим

$$N = \frac{m}{\pi H}. \quad (40,9)$$

Пример 19. Определить разрешающую способность объектива в линиях на миллиметр, если фотографирование радиальной миры с числом секторов 72 дало неразрешаемый «круг» по наибольшему размеру в 1,04 мм.

Решение. Применим формулу (40,9)

$$N = 22 \text{ лин/мм.}$$

§ 41. ВЫЧИСЛЕНИЕ ДВУХЛИНЗОВОГО СКЛЕЕННОГО ОБЪЕКТИВА

Двухлинзовый склеенный объектив наиболее часто встречается во всевозможных оптических приборах. Простота конструкции, возможность коррегирования его на хроматическую и сферическую абберации сделали его основным узлом различных оптических систем.

Каждый объектив характеризуется фокусным расстоянием (точнее, величиной заднего главного фокусного расстояния) и относительным отверстием. С конструктивной стороны объектив характеризуется диаметром, толщиной линз и радиусами кривизны. Толщина линз устанавливается в зависимости от диаметра объектива. Один из радиусов кривизны обеспечивает постоянство фокусного расстояния. Два других радиуса могут быть использованы как параметры для исправления аббераций. Таким образом, двухлинзовый склеенный объектив при заранее выбранной паре сортов оптического стекла как материала для деталей имеет два параметра для исправления аббераций. Этими двумя параметрами вместо радиусов для удобства вычислений являются углы нулевого луча с оптической осью. Оперирова двумя параметрами, можно исправить какие-нибудь две абберации. Таковыми обычно являются сферическая абберация для луча, идущего по краю отверстия объектива, и хроматическая разность сферических аббер-

раций лучей спектра с длиной волны λ_1 и λ_2 (для видимой области спектра S и F), идущих в объектив на высоте, равной 0,7 высоты луча, идущего по краю отверстия.

Объектив (рис. 52) представляет собой комбинацию двух линз, склеенных между собой пихтовым бальзамом или бальзаминном.

Положительная линза—из крона, отрицательная—из флинта. С точки зрения коррекции комбинации «крон—флинт» или «флинт—крон», строго говоря, не тождественны, но практически особых преимуществ комбинация «флинт впереди» не имеет. Но так как крон в большинстве случаев значительно более устойчив против механических, атмосферных и других воздействий, то комбинация «крон впереди» получила всеобщее распространение.

Также надо сказать, что с точки зрения коррекции, данным условиям работы объектива (относительное отверстие, положение зрачка входа) соответствует определенная комбинация марок оптического стекла, которая позволяет получить лучшее выполнение условий синусов. Однако практически оказывается возможным ограничиться немногими комбинациями марок оптического стекла.

Из теории аббераций 3-го порядка известна формула хроматизма положения ($f' = h_1$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha'_m = 1$)

$$ds' = \sum_{k=1}^{k=m} h_k U_k, \quad (41,1)$$

где

$$U_k = \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \left(\frac{1 - \mu_{k+1}}{\nu_{k+1}} - \frac{1 - \mu_k}{\nu_k} \right)^* \quad (41,2)$$

и

$$\mu_k = \frac{1}{n_k}. \quad (41,3)$$

Из формулы (41,1), принимая, что хроматизм равен нулю, получим

$$\sum_{k=1}^{k=3} h_k U_k = 0.$$

Оптическую систему будем полагать тонкой, предмет расположен в бесконечности, предмет и изображение — в воздухе, а фо-

* Здесь $\nu = \frac{n_{\lambda_0} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}$ и $\mu = \frac{1}{n_{\lambda_0}}$.

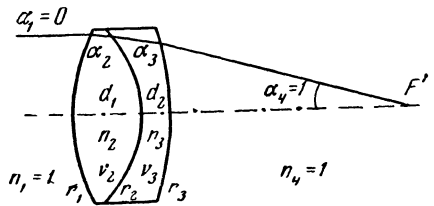


Рис 52. Двухлинзовый склеенный объектив

кусное расстояние примем за единицу ($f'=1$). Так как $d=0$ и $h_1=h_2=h_3=1$, то хроматизм положения выражается уравнением

$$\sum_{k=1}^{k=3} U_k = 0. \quad (41,4)$$

Раскроем значение U . Из (41,2) следует:

$$U_1 = -\frac{\alpha_2}{\nu_2},$$

$$U_2 = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\mu_3 - \mu_2} \left(\frac{1 - \mu_3}{\nu_3} - \frac{1 - \mu_2}{\nu_2} \right),$$

$$U_3 = -\frac{1 - \alpha_3}{\nu_3}.$$

Подставляя в (41,4), получим

$$-\frac{\alpha_2}{\nu_2} + \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\mu_3 - \mu_2} \left(\frac{1 - \mu_3}{\nu_3} - \frac{1 - \mu_2}{\nu_2} \right) - \frac{1 - \alpha_3}{\nu_3} = 0.$$

После преобразования

$$\alpha_3(1 - \mu_2)(\nu_2 - \nu_3) - \alpha_2(1 - \mu_3)(\nu_2 - \nu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\nu_2 = 0.$$

Разделив на $(\nu_2 - \nu_3)$ и обозначив

$$\varphi = \frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_3}, \quad (41,5)$$

получим

$$\alpha_3(1 - \mu_2) - \alpha_2(1 - \mu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\varphi = 0. \quad (41,6)$$

Примем для углов α_2 и α_3 значения

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \varphi, \quad (41,7)$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \varphi, \quad (41,8)$$

где Q — некоторый численный параметр.

Значения α_2 и α_3 введем в уравнение (41,6) и докажем справедливость выражений (41,7) и (41,8):

$$[(1 - \mu_3)Q + \varphi](1 - \mu_2) - [(1 - \mu_2)Q + \varphi](1 - \mu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\varphi = 0.$$

Преобразуя, получим тождество

$$\varphi(\mu_3 - \mu_2) = \varphi(\mu_3 - \mu_2).$$

Следовательно, формулы (41,7) и (41,8) справедливы.

Эти формулы позволяют легко осуществить вычисление объектива тригонометрическим методом. Два параметра, Q и φ , позволяют исправить в объективе две аберрации. Коэффициент φ , зависящий от коэффициентов обратных относительных дисперсий ν ,

является параметром хроматической aberrации, а Q — сферической aberrации.

Методы вычисления двухлинзового склеенного объектива для видимой области спектра хорошо и подробно разработаны Г. Г. Слюсаревым*.

Для других же областей спектра аналогичных разработок не имеется и выбор комбинации марок оптического стекла приходится делать на основании соображений об исправлении вторичного спектра.

Для объективов, предназначенных для работы в невидимой области спектра, обычно необходимо выполнить исправление сферохроматической aberrации, поэтому основным в расчете объектива является исправление хроматизма положения и сферической aberrации.

Вторичный спектр, как известно, в двухлинзовом склеенном объективе определяется формулой

$$ds' = \frac{\frac{n_{3\lambda_0} - n_{3\lambda_2}}{n_{3\lambda_1} - n_{3\lambda_2}} - \frac{n_{2\lambda_0} - n_{2\lambda_2}}{n_{2\lambda_1} - n_{2\lambda_2}}}{v_3 - v_2} f', \quad (41,9)$$

где λ_0 — длина волны луча, принятая за основную, а λ_1 и λ_2 — длины волн, ограничивающих рассматриваемую область спектра.

Числитель последнего уравнения состоит из разностей частных относительных дисперсий, известных по каталожным данным. Поэтому выбор оптимальной комбинации марок оптического стекла может быть совершен заранее.

Однако следует предупредить, что выполнение условия $ds=0$ обычно приводит к значительной кривизне радиуса склейки, что делает невозможным исправление сферической aberrации, поэтому отыскивается компромиссное решение между исправлением вторичного спектра и исправлением сферической aberrации.

В некоторых случаях необходимо иметь заданный хроматизм положения: $ds=C$, тогда aberrационный параметр Φ определяется выражением

$$\Phi_1 = \frac{v_2}{v_2 - v_3} (1 + v_3 C), \quad (41,10)$$

где C принимается в масштабе $f'=1$, т. е.

$$C = \frac{ds'}{f'}. \quad (41,11)$$

Параметр же Q , характеризующий сферическую aberrацию, находится из уравнения

$$aQ^2 + bQ + e - P = 0, \quad (41,12)$$

* См Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем Л.—М., ОНТИ, 1937.

где

$$a = 2(\mu_2 - \mu_3)\varphi_1 + 2\mu_3 + 1, \quad (41,13)$$

$$b = \frac{1}{n_3 - 1} \left[\frac{3(n_3 - n_2)}{n_2 - 1} \varphi_1^2 + 2(n_3 + 2)\varphi_1 - (2n_3 + 1) \right] \quad (41,14)$$

и

$$e = \frac{n_3^2}{(n_3 - 1)^2} \left[\frac{(n_3 - n_2)(n_2 n_3 - 1)}{n_3^2 (n_2 - 1)^2} \varphi_1^3 + (n_3 + 2)\mu_3 \varphi_1^2 - (2n_3 + 1)\mu_3 \varphi_1 + 1 \right]. \quad (41,15)$$

Величина P определяется из условия исправления сферической аберрации.

Из теории аберраций 3-го порядка известна формула сферической аберрации ($\alpha'_m = 1$; $n_1 = n_{m+1} = 1$)

$$\delta s_{III}' = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 u' \sum_{k=1}^{k=3} h_k P_k, \quad (41,16)$$

где

$$P_k = \left(\frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^2 (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k). \quad (41,17)$$

При определении P полагаем $d_1 = d_2 = 0$ и $h_1 = h_2 = h_3 = 1$, тогда

$$\sum_{k=1}^{k=3} h_k P_k = P,$$

или

$$P = -\frac{2\delta s_{III}'}{\operatorname{tg}^2 u'}. \quad (41,18)$$

Решение уравнения (41,12) дает два значения Q . Из этих значений принимаем Q меньшее по абсолютной величине. Если квадратное уравнение (41,12) не имеет решения, то экстремальное значение Q_0 находится путем его дифференцирования, т. е.

$$Q_0 = -\frac{b}{2a}. \quad (41,19)$$

Если при найденных значениях φ_1 и Q сферическая аберрация велика, то она может быть уменьшена путем интерполирования по Q , а в случае оперирования с Q_0 — путем изменения пары марок оптического стекла.

Вычисление объектива покажем отдельно по операциям:

1. Выбор марок оптического стекла линз объектива. В качестве первой линзы рекомендуется принимать кроновое стекло как более устойчивое против атмосферных влияний.

Подбор комбинации пары марок стекла следует делать на основании их частных относительных дисперсий, стремясь получить их разность, близкую к нулю. Для объективов в ближней инфракрасной области ($\lambda=0,8\div 2,4$ мкм) рекомендуется пара стекол марок ФК4 и ОФ3.

2. Установление толщин линз. Толщина положительной (первой) линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при данном диаметре D толщина по краю была не меньше величины d_0 , указанной в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр линзы, мм	d_0	Диаметр линзы, мм	d_0
До 6	0,5	Свыше 30 до 50	2,0
Свыше 6 до 10	0,8	Свыше 50 до 80	2,5
Свыше 10 до 18	1,2	Свыше 80 до 120	3,0
Свыше 18 до 30	1,5	Свыше 120	4,0

Тогда толщину по центру можно найти по формуле

$$d_1 = 0,75 \frac{D^2}{f'} + d_0, \quad (41,20)$$

округляя в сторону увеличения до целого числа.

Толщина второй отрицательной линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при ее изготовлении не происходило «коробления» цвета поверхности, т. е. линза была бы достаточно прочна, не деформировалась. Для этого толщину отрицательной линзы в зависимости от ее диаметра рекомендуется брать из табл. 3.

Таблица 3

Диаметр линзы, мм	d_2	Диаметр линзы, мм	d_2
До 6	0,6	Свыше 30 до 50	4
Свыше 6 до 10	1,0	Свыше 50 до 80	6
Свыше 10 до 18	2,0	Свыше 80 до 120	10
Свыше 18 до 30	2,5	Свыше 120	15

3. Определение аберраций объектива. Вследствие сложности данного вопроса ограничимся здесь лишь общими соображениями.

Обычно выбирают величину сферической аберрации $\delta s'$ для луча, падающего на объектив на высоте $h_{кр}=D/2$, и хроматическую разность сферических аберраций $ds'=0$ для лучей спектра λ_1 и λ_2 , идущих на высоте $h_{зона}=0,7 h_{кр}$.

В случае малосветосильных объективов с относительным отвер-

стием не более 1 : 6 рекомендуется иметь $\delta s' = 0$. В случае более светосильных объективов $\delta s'$ должна быть положительна и тем больше, чем больше относительное отверстие.

Таблица 4 дает представление о величинах продольной сферической аберрации, имеющейся у ряда объективов с большим относительным отверстием, для луча, идущего по краю объектива (для видимой области спектра).

Таблица 4

Относительное отверстие	$\delta s'; z f'$	Относительное отверстие	$\delta s'; z f'$
	z		z
1:2,0	0,0150	1:3,3	0,0030
1:2,2	0,0100	1:3,5	0,0020
1:2,5	0,0080	1:4,0	0,0010
1:2,7	0,0060	1:4,5	0,0006
1:3,0	0,0040	1:5,0	0,0003

Если за объективом установлена призма (эквивалентная плоскопараллельной пластине), то ее аберрации следует учесть, принимая $\delta s'$ и ds' отрицательными, так как аберрации призмы положительны. При этом сферическая аберрация призмы определяется по формуле

$$\delta s' = \frac{1}{2} d \mu (1 - \mu^2) \sin u' \operatorname{tg} u', \quad (41,21)$$

а хроматическая по формуле

$$ds' = \frac{d}{v} \cdot \frac{n-1}{n^2}, \quad (41,22)$$

где d — длина хода луча в призме.

4. Определение $h_{\text{кр}}$ и $h_{\text{зона}}$.

$$h_{\text{кр}} = \frac{D}{2} \quad \text{и} \quad h_{\text{зона}} = 0,35 D.$$

5. Вычисление C по формуле (41,11).

6. Определение φ_1 по формуле (41,10).

7. Вычисление a по формуле (41,13).

8. Вычисление b по формуле (41,14).

9. Вычисление e по формуле (41,15).

10. Определение P по формуле (41,18).

11. Составление квадратного уравнения вида (41,12).

12. Решение квадратного уравнения, нахождение его корней. В дальнейшем принимается Q меньше по абсолютной величине.

13. Вычисление α_2 и α_3 по формулам

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \Phi_1,$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \Phi_1.$$

14. Вычисление высот для расчета радиусов:

$$h_1 = f',$$

$$h_2 = f' - \alpha_2 d_1,$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2.$$

15. Вычисление радиусов по формуле

$$r_k = h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}.$$

Вычисления, указанные в пп. 14 и 15, удобно вести по схеме 2 вычисления радиусов.

Схема 2

Вычисление радиусов

Дано: $\alpha_1 = 0$ $n_1 = 1$
 α_2 d_1 n_2 $h_1 = f'$ \varnothing
 α_3 d_2 n_3
 $\alpha_4 = 1$ $n_4 = 1$

$\alpha_1 = 0$	$\alpha_1 n_1 = 0$		$\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1 = \alpha_2 n_2$	$\alpha_2 d_1$	$h_1 = f'$		$n_1 = 1$
α_2	$\alpha_2 n_2$		$\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2$	$\alpha_3 d_2$	$h_2 = f' - \alpha_2 d_1$	r_1	d_1
α_3	$\alpha_3 n_3$		$\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3 = 1 - \alpha_3 n_3$		$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2$	r_2	d_2
$\alpha_4 = 1$	$\alpha_4 n_4 = 1$					r_3	n_3
							$n_4 = 1$
	$\lg(n_2 - n_1)$		$\lg(n_3 - n_2)$		$\lg h_3$		
	$\lg h_1$		$\lg h_2$				
	$\frac{\text{clg}(\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1)}{\lg r_1}$		$\frac{\text{clg}(\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2)}{\lg r_2}$		$\frac{\text{clg}(\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3)}{\lg r_3}$		

16. Вычисление нулевых лучей λ_0 , λ_1 и λ_2 производится по схеме 3.

17. Вычисление крайних лучей λ_0 , λ_1 и λ_2 производится по схеме 4 при $h_1 = h_{\text{кр}}$ и $h_1 = h_{\text{зона}}$, причем показатели преломления берутся соответственно лучам λ_0 , λ_1 и λ_2 .

18. Составление таблицы аберраций.

19. Вычерчивание графика аберраций, подобно графику, приведенному на рис. 46.

20. Установление полного диаметра объектива. Полный диаметр линзы устанавливается в зависимости от способа крепления линз в оправе. Рекомендуется установить полный диаметр линзы по табл. 5, причем полученный из таблицы

Вычисление нулевого луча

Дано: r_1 d_1 $n_1 = 1$
 r_2 d_2 n_2
 r_3 n_3
 $n_4 = 1$ Примечание: предмет находится в бесконечности

	$\frac{\lg h_2}{\lg(n_3 - n_2)}$	$\frac{\lg h_3}{\lg(n_4 - n_3)}$	
	$\frac{\text{clg } r_2}{\lg N_2}$	$\frac{\text{clg } r_3}{\lg N_3}$	
$\frac{n_2 - n_1}{\gamma_2}$	$\frac{N_2}{\gamma_2}$	$\frac{N_3}{\gamma_3}$	
γ_2	γ_3	γ_4	
$\frac{\lg \gamma_2}{\lg d_1}$	$\frac{\lg \gamma_3}{\lg d_2}$	$\frac{\lg h_1}{\text{clg } \gamma_4}$	$f' =$
$\frac{\text{clg } n_2}{\lg N'_1}$	$\frac{\text{clg } n_3}{\lg N'_2}$	$\frac{\text{clg } \gamma_4}{\lg f'}$	
$-N'_1$	$-N'_2$	$\frac{\lg h_3}{\text{clg } \gamma_4}$	$s' =$
$\frac{h_1 = r_1}{h_2}$	$\frac{h_2}{h_3}$	$\frac{\text{clg } \gamma_4}{\lg s'}$	

Схема 4

Вычисление крайнего луча

Дано: r_1 $n_1 = 1$
 r_2 d_1 n_2
 r_3 d_2 n_3
 $n_4 = 1$ $a_1 = 0$; $s_1 = -\infty$; $h_1 =$

	$\frac{K_2}{q_1}$	$\frac{K_3}{q_2}$	$\frac{r_3}{-q_3}$	
	q_2	q_3	$\frac{s'_3}{-s'}$	
			$\delta s'$	
$\frac{\lg h_1 - \text{clg } r_1}{\lg \sin i_1}$	$\frac{\lg q_2}{\lg \sin \alpha_2}$	$\frac{\lg q_3}{\lg \sin \alpha_3}$	$K_2 = r_2 - r_1 + d_1$	
$\frac{\lg(n_1 \cdot n_2)}{\lg \sin i'_1}$	$\frac{\lg(n_2 \cdot n_3)}{\lg \sin i'_2}$	$\frac{\lg(n_3 \cdot n_4)}{\lg \sin i'_3}$	$K_3 = r_3 - r_2 + d_2$	
$\frac{\lg r_1}{\text{clg } \sin \alpha_2}$	$\frac{\lg r_2}{\text{clg } \sin \alpha_3}$	$\frac{\lg r_3}{\text{clg } \sin \alpha_4}$	$\frac{\lg h_1}{\text{clg } \sin \alpha_4}$	
$\lg q'_1$	$\lg q'_2$	$\lg q'_3$	$\lg f'_3$	
$-i'_1$	$-i'_2$	$-i'_3$		
i'_1	i'_2	i'_3		
α_2	$\frac{\alpha_2}{\alpha_3}$	$\frac{\alpha_3}{\alpha_4}$	$\frac{f'_3}{-f'}$	
	α_3	α_4	$\delta f'$	

диаметр следует увеличить до ближайшего нормального диаметра по ГОСТу (от 3 до 13 мм через 0,5 мм, далее до 48 мм через 1 мм и от 50 до 102 мм через 2 мм, в том числе 55, 65, 85 и 95 мм). На диаметры линз устанавливаются допуски, на положительную L_4 , а на отрицательную X_3 , кроме особых случаев (например, C_3)

Таблица 5

Световой диаметр, мм	Полный диаметр	
	способ крепления в оправе	
	закаткой	кольцом
До 6	+0,6	не применяется
Свыше 6 до 10	+0,8	+1,0
Свыше 10 до 18	+1,0	+1,5
Свыше 18 до 30	+1,5	+2,0
Свыше 30 до 50	+2,0	+2,5
Свыше 50 до 80	+2,5	+3,0
Свыше 80 до 120	не применяется	+3,5
Свыше 120	не применяется	+4,5

Вычисление рекомендуется производить на арифмометре и с помощью шестизначных таблиц логарифмов.