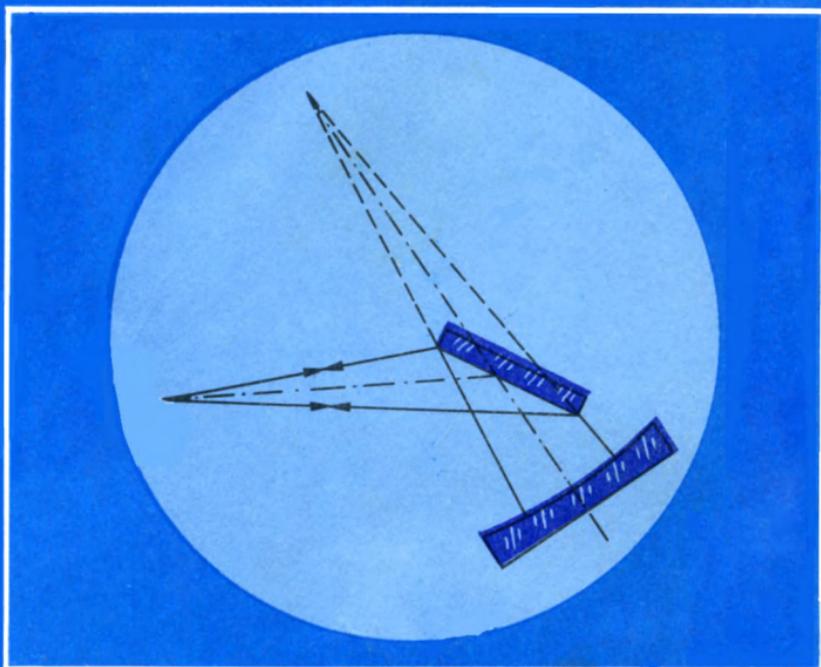


БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



Д. А. НАУМОВ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ОПТИКИ  
ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЬСКИХ  
ТЕЛЕСКОПОВ-  
РЕФЛЕКТОРОВ  
И ЕЕ КОНТРОЛЬ

**БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ**



**Д. А. НАУМОВ**

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ОПТИКИ  
ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЬСКИХ  
ТЕЛЕСКОПОВ-  
РЕФЛЕКТОРОВ  
И ЕЕ КОНТРОЛЬ**



**МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1988**

ББК 22.34  
Н34  
УДК 520.2(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

ХРОМОВ Г. С. (председатель), ДАГАЕВ М. М. |,  
ПОРЦЕВСКИЙ К. А., СПАССКИЙ Н. Н., ШУВАЕВ Г. В.

Рецензент доктор технических наук *Н. Н. Михельсон*

**Наумов Д. А.**

Н34 Изготовление оптики для любительских телескопов-рефлекторов и ее контроль.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988 (Библиотека любителя астрономии).— 160 с.  
ISBN 5-02-013869-X

Популярный рассказ о всех этапах изготовления оптики для любительского телескопа-рефлектора. Рассмотрены вопросы общей теории формирования изображения в оптической системе, методы расчета оптических схем, способы изготовления и контроля оптических поверхностей, описываются различные типы окуляров и даются рекомендации по их использованию.

Для членов астрономических кружков, любителей астрономии и телескопостроения, преподавателей средней школы.

Н  $\frac{1704050000-052}{053(02)-88}$  151-88

ББК 22.34

ISBN 5-02-013869-X

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1988

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В утвержденной XXVII съездом новой редакции Программы КПСС говорится, что осуществляемая в нашей стране реформа образовательной и профессиональной школы направлена на то, чтобы еще выше поднять уровень образования и воспитания молодежи, улучшить ее подготовку к самостоятельной и трудовой жизни.

Огромная роль в этой работе отводится научно-техническому творчеству молодежи, способствующему формированию у нее широкого кругозора и требующему применения специальных знаний. Особое место здесь принадлежит увлечению астрономией. Будучи тесно связанной с математикой и физикой, химией и биологией, географией и геологией, она самым активным образом способствует становлению диалектико-материалистического мировоззрения. Вместе с тем ее изучение немыслимо без элементарных астрономических наблюдений. Чрезвычайно большую пользу и привлекательность придают увлечению астрономией любительские наблюдения, проводимые в телескоп, особенно если он сделан собственными руками. В процессе работы над ним любитель получает все необходимые навыки как физического, так и умственного труда. Вопросам расчета, изготовления и контроля оптических деталей — основы любого инструмента и посвящена данная книга.

Со времени последнего издания замечательной книги М. С. Навашина «Телескоп астронома-любителя» (М.: Наука, 1975) вышел целый ряд статей и книг как отечественных, так и зарубежных, посвященных вопросам любительского телескопостроения. Следует признать, что в настоящее время любителей уже не удовлетворяют упрощенные методы и способы изготовления астрономической оптики. Вызывают несомненный интерес специальные приемы обработки и контроля, позволяющие улучшить качество изготавливаемой оптической поверхности, а также ускорить

процесс ее получения. С другой стороны, обидные неточности в некоторых переводных изданиях приводят к неправильному пониманию описываемого процесса, что отрицательно сказывается на конечном результате работы. Поэтому основную свою задачу автор видел в систематизации наиболее доступных и универсальных способов изготовления и контроля оптических поверхностей, причем все внимание уделено исключительно зеркальным телескопам. В книге не нашли своего отражения вопросы, посвященные созданию рефракторов, менисковых систем Д. Д. Максудова, Шмидта, внеосевых параболоидов, являющихся сложными не только для оптика-любителя, но и для мастера самого высокого класса. Читателя, интересующегося изготовлением трубы, штатива, других механических узлов, мы отсылаем к специальной литературе, в частности, к книге Л. Л. Сикорука «Телескопы для любителей астрономии» (М.: Наука, 1982, 240 с.), где эти процессы описаны очень подробно.

Глава 1 книги посвящена вопросам, относящимся к формированию изображения телескопической системой. Глава 2 освещает достоинства и недостатки реальных зеркальных систем, методы их расчета. В главах 3 и 4 рассмотрены соответственно способы изготовления и контроля астрономических оптических поверхностей средствами, доступными любителю, причем все они неоднократно проверены не только самим автором, но и членами отдела любительского телескопостроения Московского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества (МОВАГО). В главе 5 приводятся характеристики окуляров различных систем и даются рекомендации по их практическому использованию. Номера в квадратных скобках означают отсылку к списку литературы в конце книги.

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук Н. Н. Михельсону, а также М. М. Шемякину и Г. В. Шуваеву за ряд ценных замечаний и предложений, сделанных при прочтении рукописи книги.

Письма просьба направлять по адресу: 103001 Москва К-1, Садовая-Кудринская, 24, Центральный совет астрономо-геодезического общества, отдел любительского телескопостроения.

## ВВЕДЕНИЕ

Под оптической системой обычно понимают совокупность оптических деталей, предназначенных для определенного формирования пучков световых лучей. В телескопических системах используются детали, ограниченные как сферическими или плоскими поверхностями, являющимися частным случаем сферической поверхности, у которой кривизна равна нулю, так и несферическими (асферическими) поверхностями. В обоих случаях поверхности могут быть преломляющими и отражающими. Выбор конкретного типа поверхности зависит от целого ряда условий, которым должна удовлетворять телескопическая система, о чем будет подробно изложено в дальнейшем. Здесь мы приводим условные обозначения основных оптических параметров и понятий, которые будут использоваться в дальнейшем. Некоторые устоявшиеся термины, имеющие широкое хождение среди любителей телескопостроения, будут введены по ходу изложения материала.

Длина волны излучения	$\lambda$
Показатель преломления	$n$
Предел разрешения:	
в угловой мере	$\psi$
в линейной мере	$\delta$
Коэффициент:	
пропускания	$\tau$
отражения	$\rho$
Видимое увеличение	$\Gamma$
Видимое увеличение окуляра	$\bar{\Gamma}$
Видимое увеличение телескопа	$\Gamma_T$
Увеличение:	
линейное	$\beta$
угловое	$\gamma$
Оптическая сила	$\Phi$

Осевая точка предмета	$A$
Осевая точка изображения	$A'$
Главные плоскости	$H, H'$
Фокусы: передний и задний	$F, F'$
Фокусные расстояния: переднее и заднее	$f, f'$
Отрезки: передний и задний	$s, s'$
Расстояние от переднего фокуса до осевой точки предмета	$z$
Расстояние от заднего фокуса до осевой точки изображения	$z'$
Фокальные отрезки: передний и задний	$s_F, s_{F'}$
Угол падения	$\varepsilon$
Угол преломления (отражения)	$\varepsilon'$
Радиус кривизны поверхности	$r$
Высота луча над оптической осью	$h$
Толщина и воздушные промежутки	$d$
Относительное отверстие	$D : f'$
Диаметр входного зрачка	$D$
Диаметр выходного зрачка	$D'$
Линейное поле телескопической системы в пространстве изображений	$2y'$

В некоторых случаях для однозначного представления оптической системы необходимо учитывать общепринятые правила знаков, несоблюдение которых может привести к неправильному результату.

1. За положительное направление распространения света считают направление слева направо (рис. 1).

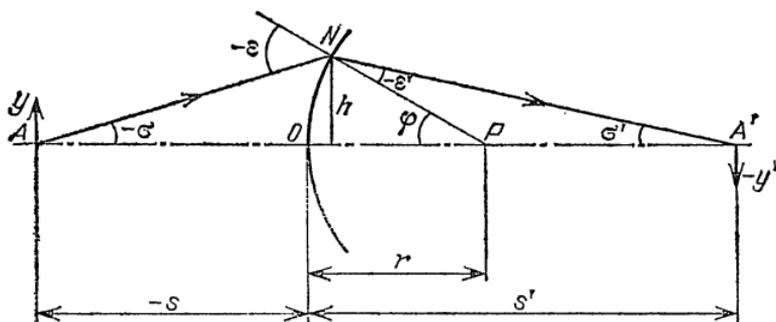


Рис. 1. Знаки отрезков и углов в оптической системе

2. Отрезки вдоль оптической оси считаются положительными, если направление их измерения совпадает с положительным направлением световых лучей, и отрицательными — в противном случае. В некоторых случаях начало от-

счета и направление допускается указывать, обозначая отрезки в виде стрелок.

3. Радиусы кривизны поверхностей, ограничивающих среды, положительны, если центры кривизны находятся справа от поверхностей, и отрицательны, если центры кривизны находятся слева от поверхностей.

4. Толщину оптических деталей и воздушных промежутков между оптическими поверхностями считают положительной, если последующая поверхность расположена (по ходу луча) справа от предыдущей, и отрицательной — в противном случае.

5. Отрезки, перпендикулярные оптической оси, считаются положительными, если они расположены над оптической осью, и отрицательными, если они расположены под осью.

6. Угол считается положительным, если для того, чтобы описать часть плоскости между его сторонами, ось, от которой ведется отсчет, нужно вращать вокруг вершины угла в направлении движения часовой стрелки, и отрицательным — в противном случае.

7. При отражении от поверхности меняется знак у угла отражения и показателя преломления среды распространения светового луча.

Случаи, для которых правила знаков можно не учитывать, будут оговорены особо.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Действие телескопической системы основано на использовании законов преломления и отражения. Первый был выведен экспериментально В. Снеллиусом (1580—1626) и Р. Декартом (1596—1650). Он состоит в том, что лучи света изменяют свое направление, преломляются на границе раздела двух сред с показателями преломления  $n$  и  $n'$  по определенному закону (рис. 2, а): нормаль к поверхности в точке падения луча, падающий и преломленный лучи лежат в

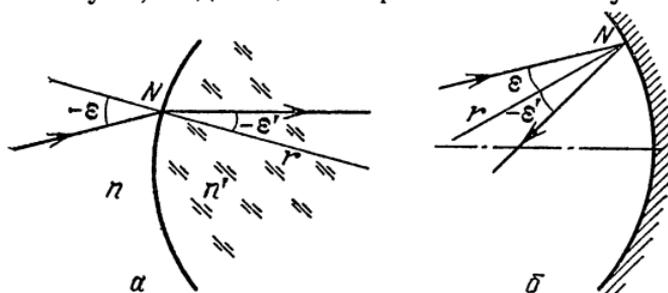


Рис. 2. Преломление и отражение световых лучей

одной плоскости, и *угол падения* (угол между падающим лучом и нормалью) и *угол преломления* (угол между нормалью и прошедшим лучом) связаны соотношением

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \vare' . \quad (1)$$

В неоднородных средах, у которых  $n'$  меняется от точки к точке, как, например, у некоторых специальных оптических стекол с переменным показателем преломления, луч претерпевает непрерывное искривление.

Закон отражения является частным случаем закона преломления при  $n' = -n$ , поскольку отражение происходит в ту же среду, но направление распространения света меняется на обратное. Угол между нормалью и отраженным лучом называется *углом отражения*. В этом случае углы  $\varepsilon$  и  $\vare'$  численно равны друг другу (рис. 2, б).

## § 2. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Телескопические системы представляют собой класс так называемых оптических *афокальных систем*, для которых рассматриваемый предмет и его изображение находятся в бесконечности.

Такие системы являются также и центрированными системами, т. е. центры сферических поверхностей, а также оси симметрии других поверхностей лежат на одной прямой, которую называют *оптической осью*. Сразу отметим, что процесс центрировки телескопической системы является необходимой и ответственной операцией для достижения требуемого качества изображения.

Пусть на произвольную оптическую систему, состоящую из центрированных поверхностей (т. е. центры кривизны которых лежат на одной прямой), направлен осевой пучок лучей, образующих с оптической осью малые углы и падающих на оптическую систему на малой высоте. Раздел оптики, изучающий свойства такой системы, называется *гауссовой оптикой*. С помощью нее достаточно удобно и просто можно произвести расчет ее отдельных слагаемых элементов, что для любителя телескопостроения является положительным моментом при выборе исходного варианта оптической системы. Однако в гауссовой оптике не рассматривается структура получающегося изображения. В этом смысле ее выводы являются достаточно абстрактными, и их следует рассматривать в плане предварительного анализа работы оптической системы.

В основу геометрической оптики положены следующие представления о световых явлениях. В однородной среде от каждой точки предмета свет распространяется прямолинейно; каждая из таких прямых линий распространения света называется *световым лучом*. Если пучок лучей, исходящих из точки, обратить каким-либо образом в сходящийся пучок, то в соответствующем месте пространства получится изображение точки в виде точки же. Рассматривая предмет как совокупность бесконечно большого числа точек, можно построить изображение предмета как совокупность изображений его точек.

Если сформированное оптической системой изображение плоского предмета, перпендикулярного ее оптической оси, полностью подобно самому предмету, то такую систему называют идеальной. Необходимо отметить, что ни одна реальная система не удовлетворяет этим условиям.

Будем называть область пространства, в которой оптические лучи распространяются до встречи с первой поверхностью оптической системы *пространством предметов*, а область их распространения после встречи с последней ее поверхностью — *пространством изображений*.

На рис. 3 изображены первая и последняя поверхности оптической системы, состоящей из нескольких сферических поверхностей. Ось  $OO'$  — оптическая ось. При наблюдении бесконечно удаленных объектов луч  $A_1M_1$  в пространстве предметов параллелен оптической оси  $OO'$  и в пространстве

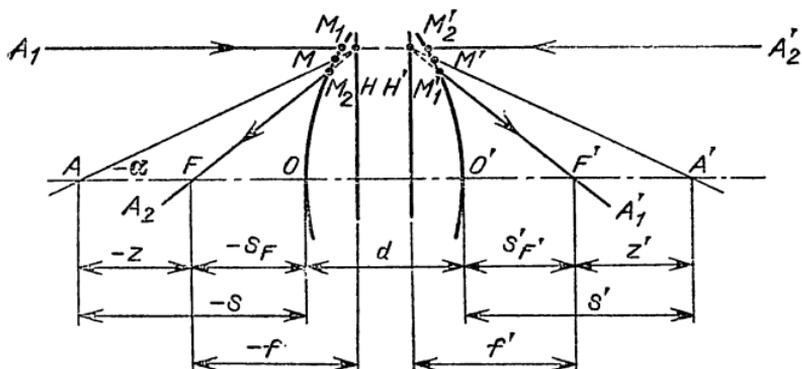


Рис. 3. Основные плоскости, отрезки и точки в геометрической оптике

изображений пересекает ее в точке  $F'$  — *заднем главном фокусе* системы. Введем понятие *задней главной плоскости* оптической системы. Она представляет собой воображаемую плоскость  $H'$ , перпендикулярную оптической оси системы и определяемую точкой пересечения продолжения луча  $A_1M_1$ , входящего в систему, и луча  $M'_1A'_1$ , выходящего из системы. Аналогично определяется *передняя главная плоскость* с помощью точки пересечения продолжения лучей  $A'_2M'_2$  и  $M_2A_2$ . Хотя реально главные плоскости в оптической системе не существуют, тем не менее их введение является очень важным, так как одна из основных характеристик оптической системы — *фокусное расстояние* (отрезок  $f'$ ) определяется как расстояние от точки пересечения луча с оптической осью до соответствующей главной плоскости, а не до последней поверхности линзы (отрезок  $s_{F'}$ ). Эта разница особенно заметна для так называемых телеобъективов, у которых задняя главная плоскость  $H'$  вынесена из системы далеко вперед, в результате чего величина фокусного расстояния и заднего вершинного фокусного расстояния  $s_{F'}$  могут отличаться по своему абсолютному значению в несколько раз.

Для телескопической системы, работающей в воздухе,  $f$  и  $f'$  численно равны друг другу, и обычно эта величина носит название *главного фокусного расстояния*. Если объект наблюдения находится на конечном расстоянии от оптической системы, то световые лучи от него (например, луч  $AM$ ) попадают в оптическую систему под некоторым углом  $|\alpha|$  к оптической оси. В этом случае изображение объекта (плоскость изображения) оказывается сдвинутым вправо от точки  $F'$  к точке  $A'$  на отрезок  $z'$ . Это смещение плоскости изображения зависит от фокусного расстояния системы и дистанции до объекта наблюдения и может быть найдено по формуле Ньютона

$$z \cdot z' = -f'^2, \quad (2)$$

где  $z$  — расстояние до объекта наблюдения минус фокусное расстояние объектива. Так, если мы наблюдаем объект, находящийся от нас на расстоянии 100 м, в телескоп с фокусным расстоянием 1 м, то смещение плоскости изображения относительно положения, которое она занимала при наблюдении бесконечно удаленных объектов, составит  $z' \approx \frac{1^2}{100} = 0,01$  м.

### § 3. ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Элементы телескопической системы — объектив, окуляр, вторичные и вспомогательные зеркала, линзы имеют определенные поперечные размеры, которые ограничивают площадь сечения световых пучков, а также угловые и линейные размеры предметов, изображаемые системой.

Ограничения световых пучков в той или иной степени свойственны любой оптической системе. С одной стороны, они влияют на освещенность изображения в фокальной плоскости и ее распределение от центра поля зрения к его краям, а с другой — определяют размер полезного поля зрения. Кроме того, существует также ряд специальных *диафрагм*, предназначенных для предотвращения попадания паразитных световых лучей в фокальную плоскость оптической системы, т. е. служащих для уменьшения влияния рассеянного света на качество изображения. Следует иметь в виду, что их введение в оптическую систему, создавая известный положительный эффект, обычно сопровождается нежелательными явлениями, связанными с ухудшением ее световых энергетических характеристик, но с этим обычно приходится мириться.

В некоторых случаях диафрагмы используются для улучшения качества изображения. Так, если в плоскости, проходящей через центр кривизны вогнутого сферического зеркала, установить диафрагму, ограничивающую его действующее отверстие, то такая система окажется свободной от всех присущих ей наиболее опасных aberrаций, кроме сферической (см. гл. 2).

Почти в каждой оптической системе, создающей изображение, имеется особая диафрагма, которая ограничивает пучок световых лучей. Она носит название *апертурной*, или *действующей*, и обозначается буквой  $Q$ . Применительно к телескопу апертурной диафрагмой является одна из линз объектива, главное зеркало, корректирующая пластина и т. д.

С апертурной диафрагмой тесно связаны понятия *входного* и *выходного зрачков* оптической системы, которые являются особенно важными в определении ее свето-энергетических характеристик. Так, изображение апертурной диафрагмы, построенное предшествующей ей частью оптической системы в пространстве предметов, называется входным зрачком оптической системы  $D$ , а изображение апертурной диафрагмы, построенное последующей частью оптической системы в пространстве изображений, называется выходным зрачком оптической системы  $D'$ . Поскольку перед зеркалом объектива или корректирующей пластиной никаких других оптических фокусирующих элементов нет, постольку для них положение входного зрачка совпадает

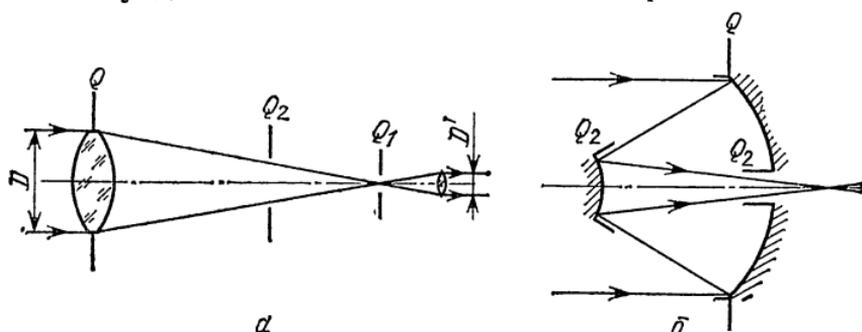


Рис. 4. Ограничения пучков лучей в телескопической системе

с апертурной диафрагмой. В то же время у целого ряда фотографических объективов апертурная диафрагма располагается между его линзами, а входной зрачок — где-то перед ними и обычно не совпадает с первой поверхностью первой линзы. Положение упомянутой диафрагмы и зрачков телескопической преломляющей системы приведено на рис. 4, а.

На нем, кроме того, показана *полевая диафрагма*  $Q_1$ , ограничивающая размер линейного поля  $2y'$ . В практическом исполнении она запрессовывается в оправу окуляра на расстоянии его переднего фокуса и при наводке на резкость совмещается с фокальной плоскостью объектива. Обычно имеет форму круга.

Другая диафрагма  $Q_2$  уменьшает вредное влияние рассеянного света на контраст изображения. Любая материальная диафрагма, за исключением апертурной и полевой, которая ограничивает наклонные пучки лучей, называется *виньетирующей* (затеняющей). Так, если использовать диафрагму  $Q_2$  несколько меньшего размера, то это приведет к дополнительному падению освещенности на краях поля зрения окуляра.

Введение диафрагм, «срезающих» вредные паразитные лучи, попадающие в окуляр, минуя оптическую систему, обычно применяется в некоторых зеркальных и зеркально-линзовых системах (рис. 4, б). Вопросы, связанные с определением их размеров, более подробно будут освещены в гл. 2.

Теперь после рассмотрения основных свойств оптической системы в представлении геометрической оптики кратко остановимся на структуре изображения, создаваемой реальной оптической системой.

#### § 4. ФИЗИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ТОЧКИ

Размер входного зрачка объектива по-разному влияет на даваемое им качество изображения. Сильно задиафрагмированный объектив хорошо подчиняется законам гауссовой оптики. Однако в этом случае не учитывается волновая природа светового излучения. В реальных условиях подобный объектив не в состоянии построить изображение светящейся точки в виде точки — изображение получается в виде маленького кружка, окруженного кольцами быстро спадающей яркости. Кроме того, по мере роста диаметра свободного отверстия объектива и увеличения угла поля зрения даже с «точки зрения» только геометрической оптики изображение также начинает уклоняться от идеального. Вследствие этого происходит размазывание изображения как на оси системы, так и вне ее, контуры предмета теряют четкость. Искажается подобие изображения и предмета. Эти свойства, присущие в той или иной мере всем реальным оптическим системам, называются *абберациями*, о чем более подробно будет рассказано в гл. 2.

Искажение изображения точечного источника связано с двумя явлениями, хорошо известными из курса физики, — *дифракцией* и *интерференцией*. Так, безабберационный объектив преобразует расходящийся сферический *волновой фронт* от источника, расположенного на конечном расстоянии, или плоский волновой фронт от бесконечно удаленного источника в сходящийся к фокусу сферический волновой фронт. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля каждую точку волновой поверхности можно рассматривать как центр самостоятельных колебаний. Таким образом, каждая точка трансформированного объективом волнового фронта является в свою очередь источником новых световых колебаний. Это означает, что направление распространения световых лучей явно уклоняется от геометрического. Поэтому можно предположить, что энергия распределяется по всему полю изображения объектива. Это действительно так, хотя оно и сугубо неравномерно. Если просуммировать воздействие всех бесконечно малых элементов сферической волны с учетом элементарных амплитуд и фазовых сдвигов, то окажется, что в центре изображения точки интенсивность

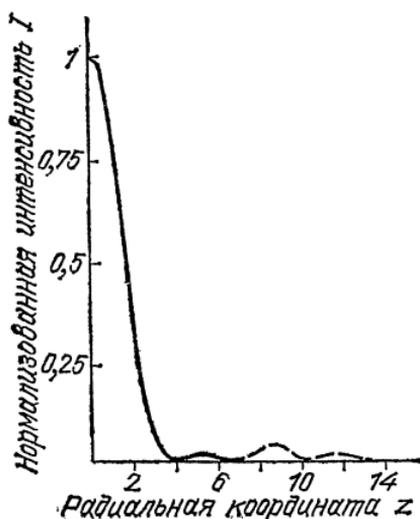


Рис. 5. Распределение интенсивности в дифракционном изображении идеального объектива. Часть кривой, представленная штриховой линией, выполнена в 10-кратном вертикальном масштабе (симметричная левая часть на рисунке не показана)

имеет наибольшее значение (рис. 5). При смещении от центра она падает и достигает нуля. На этом расстоянии яркое ядро дифракционной картины (так называемый *кружок Эри*) окружено первым темным кольцом. За ним следует бесконечное число светлых колец быстро убывающей интенсивности, разделенных темными кольцами. Этот результат был впервые получен в 1835 г. Дж. Эри. Угловое расстояние, обозначим его через  $\psi_R$ , соответствующее первому

темному кольцу дифракционного изображения, будет

$$\psi_R = 1,2197 \frac{\lambda}{D} \text{ рад.} \quad (3)$$

Таким образом, угловой радиус центрального кружка Эри дифракционного изображения точечного объекта, даваемого идеальным объективом, зависит только от диаметра объектива телескопа  $D$  и длины световой волны  $\lambda$ . Если полученное значение угла  $\psi_R$  умножить на коэффициент 206 265 (число угловых секунд в одном радиане), то результат окажется выраженным в секундах дуги:

$$\psi_R = 251\,581 \frac{\lambda}{D}. \quad (4)$$

В связи с тем, что звезда излучает световую энергию в широком диапазоне длин волн, края диска Эри и дифракционные кольца оказываются окрашенными. Внешние края приобретают красноватый оттенок, внутренние — голубоватый. Ясно, что чем короче длина волны излучающего точечного источника, тем мельче получается его дифракционное изображение. При визуальных наблюдениях максимум спектральной чувствительности глаза приходится примерно на длину волны  $\lambda = 0,000555$  мм, поэтому

$$\psi_R = \frac{140}{D} \text{ секундам дуги,} \quad (5)$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка объектива телескопа, выраженный в мм.

Величина, обратная *относительному отверстию*  $D/f'$ , называется *относительным фокусным расстоянием*. Будем обозначать ее, в соответствии с введенным Д. Д. Максудовым обозначением, через  $\nabla$ :  $\nabla = \frac{f'}{D}$ . Если  $f'$  есть фокусное расстояние объектива телескопа, то линейный радиус  $\delta$  центрального дифракционного кружка в фокальной плоскости составит

$$\delta = f' \psi_R = 1,2197 \lambda \frac{f'}{D} = 1,2197 \lambda \nabla. \quad (6)$$

Таким образом, линейный радиус кружка Эри прямо пропорционален длине волны и обратно пропорционален относительному отверстию объектива.

В зеркальных системах телескопов обычно применяются дополнительные зеркала, предназначенные для изменения сходимости пучка лучей (вторичные зеркала) либо вводимые

по конструктивным соображениям и не изменяющие аберрационных свойств системы и ее оптической силы (вспомогательные плоские зеркала). Если они проектируются на плоскость входного зрачка, то, экранируя центральную часть главного зеркала, видоизменяют дифракционную картину изображения звезды. Отметим три основных эффекта (рис. 6):

- а) центральный максимум становится уже;
- б) расстояние вдоль оси между кольцами увеличивается;
- в) яркость внешних колец становится переменной — одни ярче, другие слабее.

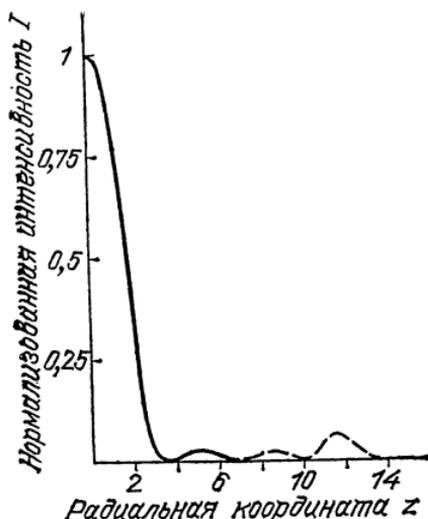


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при центральном экранировании  $\varepsilon=1/3$ . Часть кривой, представленная штриховой линией, выполнена в 10-кратном вертикальном масштабе (симметричная левая часть на рисунке не показана)

Таким образом, центральное экранирование, обозначим его  $\varepsilon$ , до некоторой степени повышает разрешающую способность телескопа (см. § 5), однако при этом снижается видимость малоконтрастных деталей у протяженных объектов. Так, осевое увеличение расстояния между кольцами становится пропорциональным выражению  $(1-\varepsilon^2)^{-1/2}$ . Величину  $\varepsilon$  определяют из отношения

$$\varepsilon = \frac{D_1}{D}, \quad (7)$$

где  $D_1$  — диаметр центрального экранирования,  $D$  — диаметр главного зеркала. Для того чтобы дифракционные искажения в этом случае были невелики, Д. Д. Максудов рекомендует, чтобы  $\varepsilon \leq 1/3$ .

Дополнительные искажения дифракционного изображения возникают из-за наличия спайдеров (растяжек), с помощью которых крепятся зеркала. Они проявляются в

виде прямых лучей с заостренными выступами, наблюдаемых в изображении наиболее ярких звезд. В малых телескопах любители телескопостроения свои зеркала часто крепят на стойке. В этом случае возникают два луча в направлении, перпендикулярном стойке. При наличии трех, четырех растяжек соответственно появляются шесть и четыре луча.

Многие авторы считают, что влияние дифракции, вызываемой растяжками, может быть значительно снижено путем придания им соответствующего искривления. При этом изогнутая форма растяжки вызывает чрезвычайно малую засветку изображения в некотором секторе вокруг яркого источника.

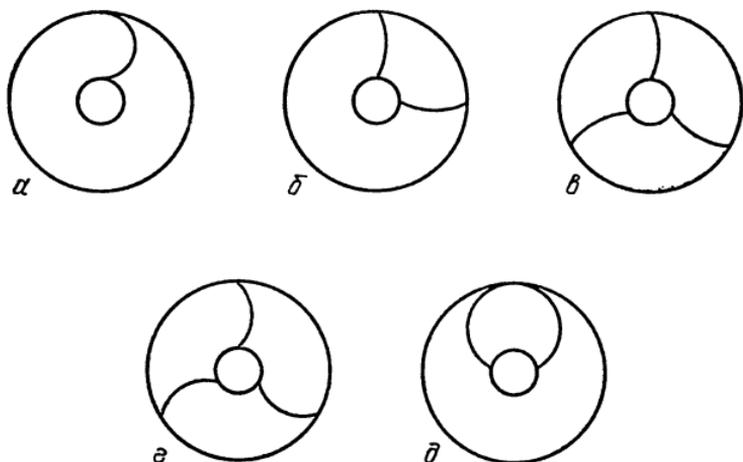


Рис. 7. Некоторые конфигурации растяжек, уменьшающих влияние дифракции на качество изображения

Некоторые конфигурации «невидимых» растяжек показаны на рис. 7. Необходимо отметить, что однолучевая (однолепестковая) растяжка (рис. 7, а) действует потому, что луч представляет собой точный полукруг (дуга в  $180^\circ$ ), который образует два веера в  $180^\circ$ , совместно образующие полный круг (ореол) вокруг изображения в виде звезды. На рисунке 7, б каждая из растяжек — лучей является дугой в  $90^\circ$ . В данном случае каждый луч образует пару противостоящих секторов по  $90^\circ$ , в результате чего снова имеем единообразный круг (ореол).

Однако большинство изготовителей телескопов выбирают трехэлементную конструкцию, так как она обеспечивает устойчивость и отличается минимальным экранированием. Возможно, что конструкцию, изображенную на рис. 7, в, легче изготовить, так как каждая дуга (или луч) составляет  $60^\circ$ . Однако вычисления свидетельствуют о том,

что при лучах в  $120^\circ$  (рис. 7, з) в круг попадает чуть меньше суммарного света. Каждая из этих специально изогнутых растяжек полностью исключает дифракционные заостренные выступы или лучи вокруг изображений звезд. И кривизна, и ориентация этих растяжек имеют большое значение.

Все углы, о которых шла речь выше, относятся только к той части каждой дуги, которая мешает прохождению света, а не к всей длине дуги вплоть до того места, где она соприкасается с трубой телескопа.

И, наконец, представляет особый интерес растяжка, приведенная на рис. 7, д, состоящая из одного сплошного кольца, проходящего через центр главного зеркала. Она сочетает в себе простоту изготовления, жесткость конструкции при сравнительно малых потерях света на экранирование и почти полное отсутствие вредных дифракционных лучей вокруг ярких звезд.

## § 5. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И УВЕЛИЧЕНИЕ

Обычно любителя астрономии, приступающего к изготовлению оптики для своего будущего телескопа, интересует то максимальное увеличение, которое сможет давать инструмент. Оно, в свою очередь, однозначно определяется *разрешающей способностью*, обеспечиваемой главным зеркалом, т. е. способностью раздельно видеть тесную пару звезд одинакового блеска. К сожалению, само понятие разрешающей способности оптической системы является в достаточной степени условным. Это связано прежде всего с тем, что для данной визуальной системы, находящейся в идеализированных условиях и обладающей с точки зрения теории идеальным дифракционным изображением, разрешающая способность зависит от индивидуальных особенностей каждого человеческого глаза. Здесь имеется в виду прежде всего его способность реагировать на малые контрасты изображения. Поэтому можно предположить, что существует некоторый предельный угол разрешения  $\psi$  для двух звезд, имеющих определенный угловой диаметр дифракционных изображений, при котором контраст между их центральными максимумами и образовавшейся между ними перемычкой соответствует наперед заданной величине. Ясно, что при этом возможно как уверенное, так и сомнительное разрешение двойственности звезды. Размеры дифракционных изображений при заданной длине волны, как следует из формулы (5), обратно пропорциональны диаметру действующего отверстия объектива. Согласно ан-

дийскому физику Дж. Рэлею, принято считать, что уверенное изображение достигается тогда, когда центральный максимум изображения одной звезды попадает на первое темное кольцо второй звезды. При этом контраст изображения звезд и промежутка достигает 26 %. В этом случае угол между звездами равен

$$\psi_R = \psi_{26} = \frac{1,2197}{D} \lambda \text{ (рад)}. \quad (8)$$

Предельным углом разрешения, по Д. Д. Максудову [1], считается такой, при котором перемычка в изображении двух звезд слабее самих звезд не менее чем на 1,5 %. Обозначим его вслед за Д. Д. Максудовым через  $\psi_{1,5}$ . Однако более уверенное разрешение наступает только в том случае, если контраст изображения звезд и промежутка достигает 5 %. Обозначим его  $\psi_5$ . Тогда зависимость углов  $\psi_{1,5}$ ,  $\psi_5$ ,  $\psi_{26}$  (они выражаются в секундах дуги) от диаметра объектива телескопа для  $\lambda=0,555$  мкм принимает вид

$$\begin{aligned} \psi_{1,5} &= \frac{114}{D}, \\ \psi_5 &= \frac{120}{D}, \\ \psi_{26} &= \frac{140}{D}. \end{aligned} \quad (9)$$

Понятно, что разрешающая способность объектива для звезд, максимум излучения которых приходится на более коротковолновую область, выше, чем для звезд «красных». Формулы (9) справедливы для случая, когда в инструмент, имеющий высококачественную оптику, наблюдаются две звезды равного блеска. В более общем случае две близко расположенные звезды имеют, как правило, разный блеск. При этом разрешающая способность телескопа падает, так как по отношению к интенсивности центрального максимума интенсивность промежутка между центрами дифракционных изображений становится меньше. Погрешности изготовления, даже небольшие, оптических поверхностей телескопов дополнительно снижают разрешающую способность, так как при этом часть энергии из центрального максимума кружка Эри переходит в соседние кольца. Дифракционная картина теряет свою четкость, контраст изображения ослабевает. Здесь хотелось бы подчеркнуть тот факт, что если для крупных инструментов основными сдерживающими факторами, препятствующими получению высококачественных изображений, сравнимых с дифракционными, являются

абберации оптической схемы, погрешности формы изготовления поверхностей, их разъюстировка за счет механического гнуптия трубы и всей системы в целом, атмосферная турбуленция и целый ряд других, то для небольших любительских инструментов, пожалуй, лишь дифракционные явления должны ставить предел разрешающей способности. Поэтому перед любителями телескопостроения стоит задача, чтобы, во всяком случае с точки зрения изготовленной оптики, его инструмент был безупречным и она удовлетворяла бы самым строгим требованиям к качеству даваемого ею изображения.

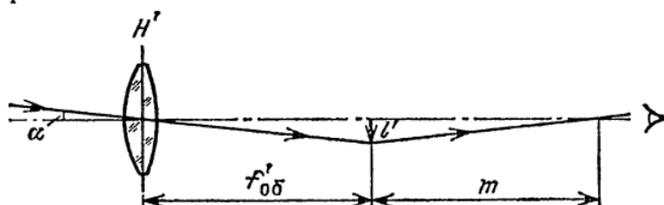


Рис. 8. К определению увеличения телескопической системы

Для того чтобы глаз полностью использовал разрешающую способность объектива, необходимо применять соответствующее увеличение, которое получается за счет совместного действия объектива и окуляра телескопа. Очевидно, что угол, под которым глаз видит изображение предмета в фокальной плоскости объектива с расстояния, равного фокусному расстоянию объектива, равен углу, под которым сам предмет представляется для невооруженного глаза (рис. 8),

$$\alpha = \frac{l'}{f'_{об}} = \frac{l'}{m} \text{ рад.} \quad (10)$$

В этом случае увеличение  $\Gamma = 1$ .

Если наблюдать изображение предмета с расстояния ясного зрения, равного для нормального глаза 250 мм, то угол в общем случае изменится, и увеличение станет равным  $\Gamma = \frac{f'_{об}}{250}$ . Для близорукого глаза этот угол возрастет еще более. Чтобы хорошо рассмотреть мелкие детали предмета, необходимо воспользоваться окуляром, для которого видимое увеличение  $\bar{\Gamma} = \frac{250}{f_{ок}}$ . В этом случае увеличение телескопической системы

$$\Gamma_{т} = \Gamma \cdot \bar{\Gamma} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}}. \quad (11)$$

Такой подход к определению увеличения системы ничего не говорит о физических условиях наблюдения, которые однозначно определяются только одним параметром — зрачком выхода системы  $D'$ :

$$\Gamma_{\tau} = \frac{D}{D'}. \quad (12)$$

Из изложенного выше ясно, что при хорошей оптике и приемлемых атмосферных условиях предельное максимальное увеличение ограничивается диаметром объектива, так как только им определяется угловой размер дифракционного изображения. С учетом физиологии зрения человеческого глаза опытным путем установлено, что максимальное увеличение телескопа равно коэффициенту 1,4, умноженному на диаметр объектива, выраженный в миллиметрах. Тогда с учетом (12) выходной зрачок составляет 0,7 мм. Увеличение, при котором глаз четко распознает дифракционную структуру изображения и для которого  $D' \approx 0,7$  мм, Д. Д. Максудов называет *разрешающим увеличением*.

В заключение приравняем правые части формул (11) и (12):

$$\Gamma_{\tau} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}} = \frac{D}{D'}. \quad (13)$$

Тогда фокусное расстояние окуляра можно выразить через выходной зрачок системы и ее относительное фокусное расстояние следующим образом:

$$f_{ок} = D' \nabla. \quad (14)$$

Для достижения разрешающего увеличения эта величина, следовательно, будет равна

$$f_{ок} \approx 0,7 \nabla \text{ (мм)}. \quad (15)$$

Для наиболее слабого окуляра, при котором выходной зрачок системы полностью заполняет зрачок глаза наблюдателя, адаптированного к темноте,

$$f_{ок} \approx 6 \nabla \text{ (мм)}. \quad (16)$$

Простая телескопическая система, состоящая всего из двух положительных компонентов — объектива и окуляра, строит перевернутое изображение, что, однако, не мешает наблюдению небесных объектов. Сделать изображение прямым, пригодным для наблюдения земных предметов, можно за счет введения в схему линзовых или призмных обрабатывающих систем. К сожалению, усложнение конструкции

приводит к ухудшению качества изображения и уменьшению количества света, которое попадает в глаз наблюдателя. Поэтому этот прием астрономами не используется.

В этой главе мы очень коротко изложили принципы, лежащие в основе действия любого телескопа. Они прямо вытекают из геометрической и физической оптики. В следующей главе мы обратимся к некоторым известным схемам зеркальных телескопов со всеми им присущими достоинствами и недостатками, которые любителю телескопостроения приходится учитывать в своей работе. Основные же положения, которые мы рассмотрели в этой главе, найдут свое отражение в дальнейшем изложении.

## ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПОВ

## § 1 ПРОСТАЯ ОДНОЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА

При изготовлении телескопов своими силами перед любителями астрономии обычно встают вопросы, связанные с расчетом оптической системы, правильным выбором ее конструктивных параметров, определяемых тем кругом задач, для решения которых предназначен инструмент.

Как правило, телескопическая система содержит различный набор линз или зеркал или тех и иных вместе. Оптическая система называется *диоптрической*, если ее объектив состоит из линзовых элементов. Телескопы подобного типа носят название *рефракторов* от латинского слова «refractus» — преломленный. К ним относятся зрительная труба Галилея, труба Кеплера и целый ряд других. Чисто зеркальные системы, а также системы, содержащие дополнительный набор линзовых элементов, предназначенных для улучшения качества изображения и имеющих размеры значительно меньше, чем главное зеркало, называются *катаптическими*, а телескопы — *рефлекторами* от слова «reflexus» — отражение. Примером могут служить такие наиболее известные системы, как системы Ньютона, Кассегрена, Грегори. Комбинированные системы, содержащие как линзы, так и зеркала примерно одинаковых размеров, носят название *катадиоптрических*. Эти системы представлены зеркально-линзовыми телескопами типа камеры Шмидта, системы Максудова и некоторых других.

Рассмотрение оптических свойств систем, наиболее часто используемых в любительской практике, начнем с однозеркальной системы, представляющей собой в простейшем случае одиночное вогнутое зеркало  $A$  (рис. 9).

Если поверхность зеркала имеет наиболее просто изготавливаемую сферическую форму, то лучи света от бесконечно удаленного объекта, даже находящегося на оптической оси зеркала, не пересекутся все в одной точке. Сферическое зеркало собирает в фокус параллельный пучок лучей света с искажением: чем больше высота луча,

тем ближе к вершине зеркала окажется его точка пересечения с оптической осью (рис. 10). Измеренная по оптической оси разность отрезков  $-s'_i$  и  $-s'_{F'}$  называется *продольной сферической aberrацией* или просто *сферической aberrацией*. Обозначим ее  $\Delta s'$ ; тогда  $-\Delta s' = s'_{F'} - s'_i$ . Как видим, сферическая aberrация сферического зеркала всегда отрицательна и равна

$$\Delta s' = -\frac{h^2}{4r} = -\frac{h^2}{8f'} . \quad (17)$$

Рис. 9. Одиночное вогнутое зеркало

Таким образом, изображение точки получается в виде кружка, называемого *пятном рассеивания*. Его относительный размер и распределение в нем освещенности зависят от положения плоскости установки, т. е. плоскости, проходящей через точки  $M'_i$ .  $F'$  перпендикулярно оптической оси. Например, если она совпадает с плоскостью Гаусса (проходит через точку  $F'$ ), то пятно представляет собой кружок диаметром  $2\Delta y'_i$  с более ярким центром, ослабевающим к

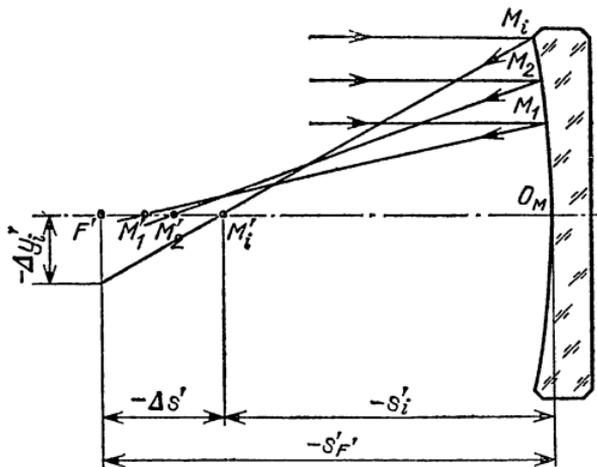


Рис. 10. Фокусировка сферическим зеркалом параллельного пучка лучей

периферии. Рис. 11 отражает типичный характер распределения освещенности в пятне, рассчитанный на ЭВМ, в зависимости от плоскости установки. Большой концентрации точек соответствует большая плотность энергии.

Сферическое зеркало свободно от сферической aberrации лишь в одном-единственном случае: тогда, когда лучи

падают из центра его кривизны. В любом другом случае оно будет обладать сферической aberrацией.

Для получения безупречного изображения на оси в случае бесконечно удаленного источника форма поверхности зеркала должна представлять собой параболоид.

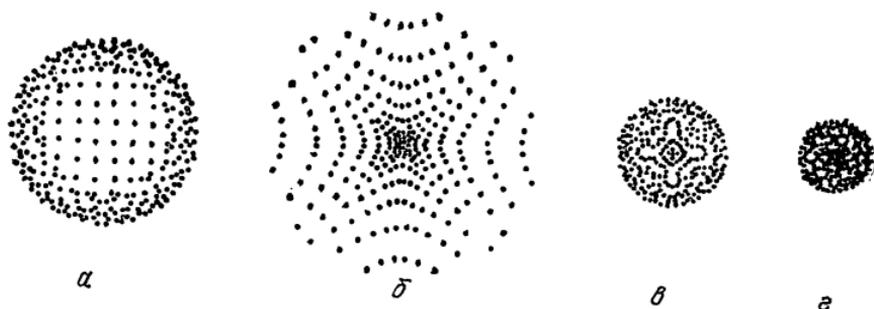
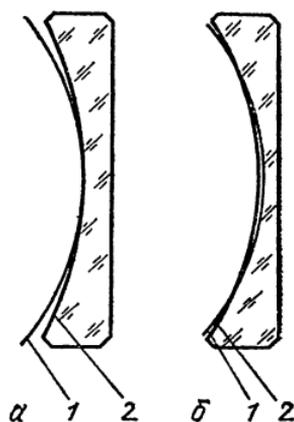


Рис. 11. Характер распределения освещенности в пятне рассеивания в зависимости от плоскости установки при наличии сферической aberrации: *a* — плоскость проходит через точку  $M'_i$  (см. рис. 10); *б* — через точку  $F'$ ; *в* и *г* — в промежуточных положениях

Параболоиду, в отличие от сферы, свойственно неравенство кривизны отдельных зон \*) зеркала. Наибольшее значение кривизна параболоида имеет в центре и соответствует кривизне сферического зеркала, постоянно уменьшаясь к периферии (рис. 12, *a*).

Рис. 12. Форма поверхности параболического зеркала (в сильно преувеличенном виде): относительно сферы, касательной при вершине зеркала (*a*), относительно ближайшей сферы (*б*); 1 — сферическая поверхность, 2 — параболическая поверхность



Известно, что для параболического зеркала асферичность на краю, т. е. отступление реального профиля поверхности зеркала относительно касательной сферы при

\*) Зоной называется окружность, описанная на поверхности зеркала из его вершины как из центра; точки поверхности данной зоны равноудалены от оптической оси зеркала.

вершине, определяется выражением

$$\delta_h \approx -\frac{h^4}{8r^3}. \quad (18)$$

Для внешней зоны зеркала  $h = \frac{D}{2}$ , и тогда

$$\delta_{\max} \approx -\frac{D^4}{128r^3} = -\frac{D}{1024\sqrt{r^3}}. \quad (19)$$

Наибольшее же отклонение параболоида от некоторой ближайшей сферы будет в четыре раза меньше:

$$\delta_0 = -\frac{\delta_{\max}}{4} = \frac{D}{4096\sqrt{r^3}}. \quad (20)$$

Оно максимально на краю зеркала и при его вершине, а на зоне  $h = \frac{\sqrt{2}}{2}$  равно нулю (рис. 12, б). В таблице 1 приводятся асферичности  $\delta_0$  (в мкм) любительских зеркал различных диаметров  $D$  в зависимости от их относительных отверстий.

Безабберационный астрономический объектив, в данном случае параболическое зеркало, работающее в параллельном пучке лучей, преобразует плоский волновой фронт в сходящийся сферический. При этом на оси системы в ее фокальной плоскости образуется идеальное дифракционное изображение, подобное изображенному на рис. 5. Если форма поверхности зеркала даже незначительно уклоняется от теоретической, например в сторону сферы, то, как уже отмечалось, перераспределение энергии между дифракционным кружком и кольцами приводит к падению разреша-

Таблица 1

$D:f'$	$D, \text{ мм}$								
	110	165	215	265	315	360	400	450	600
1:2	3,36	5,04	6,56	8,09	9,61	10,9	12,2	13,7	18,3
1:3	0,94	1,49	1,94	2,39	2,85	3,26	3,62	4,07	5,43
1:4	0,42	0,63	0,82	1,01	1,20	1,37	1,53	1,72	2,29
1:5	0,21	0,32	0,42	0,52	0,62	0,70	0,78	0,88	1,17
1:6	0,12	0,19	0,24	0,29	0,36	0,41	0,45	0,51	0,68
1:8	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,29
1:10	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,15

ющей способности и снижению контраста изображения. Если зеркальная поверхность  $P$  деформирована на величину  $\delta$ , то порожденное ею искажение волнового фронта  $l = N' - M'$ , как ясно из рис. 13, увеличится после отражения вдвое, т. е.  $l = 2\delta$ . При этом предполагается, что продольный размер образования  $a \gg \lambda$ .

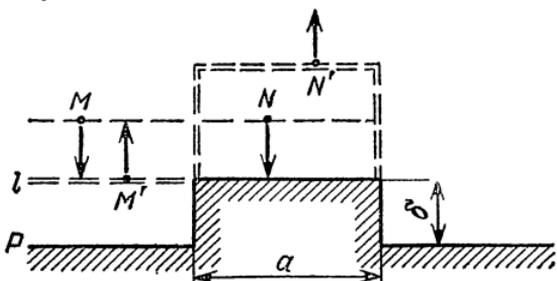


Рис. 13. Деформация волнового фронта после отражения от зеркальной поверхности, имеющей деформацию  $\delta$ , увеличивается вдвое, т. е.  $l = 2\delta$ ;  $M, N$  — падающий волновой фронт;  $M', N'$  — отраженный волновой фронт

Деформация отраженного от сферического зеркала волнового фронта (волновая аберрация), необходимая для компенсации его сферической аберрации и отсчитанная от сферического волнового фронта  $l$ , касательного при вершине, определяется простым соотношением

$$l_{\max} = \frac{h^4}{4r^3}. \quad (21)$$

Наибольшая волновая аберрация  $l_0$ , отсчитанная от ближайшей сферы сравнения, равна четверти  $l_{\max}$ :

$$l_0 = \frac{l_{\max}}{4} = \frac{h^4}{16r^3}. \quad (22)$$

В свое время Дж. Рэлей предложил считать, что если волновая аберрация не превышает  $\lambda/4$ , а соответствующая ей деформация зеркальной поверхности не превышает  $\lambda/8$ , то сферическое зеркало практически неотличимо от идеального параболического и заметного ухудшения качества изображения при наблюдении бесконечно удаленного источника еще не наблюдается. На основании этого критерия Д. Д. Максудов предложил простую зависимость, определяющую условие использования сферического зеркала, практически заменяющего параболическое (рис. 14). Согласно этому условию

$$l_0 = \frac{h^4}{16r^3} = \frac{D}{2048\sqrt{3}} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (23)$$

Тогда с учетом максимума спектральной чувствительности глаза  $\lambda=0,555$  мкм

$$\nu \geq 1,52 \sqrt[3]{D} \text{ (мм)}. \quad (24)$$

Таким образом, если изготовлено совершенное сферическое зеркало с  $\nu = 1,52 \sqrt[3]{D}$  (мм), то оно эквивалентно параболическому с погрешностью поверхности  $\lambda/8$ . Следует, однако, заметить, что целесообразность использования

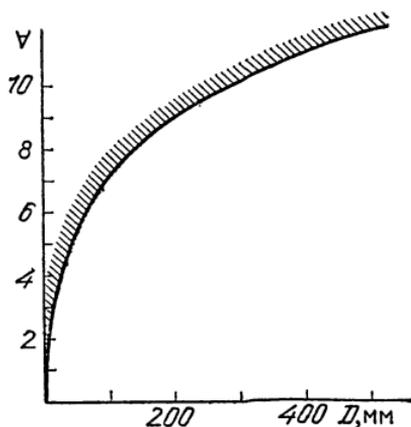


Рис. 14. Условие использования сферического зеркала, практически заменяющего параболическое. Штриховкой показана область, удовлетворяющая неравенству (24)

рэлеевского допуска в качестве критерия оценки качества изображения является спорной. Как показали исследования большого числа разнообразных по назначению любительских параболических зеркал, во всяком случае до диаметров порядка 250 мм, их волновые aberrации, как правило, не превосходят  $\lambda/6$ . .  $\lambda/8$  (соответственно деформация поверхности  $\lambda/12$ . .  $\lambda/16$ ), и они обладают действительно безукоризненным качеством изображения, способным удовлетворить самого взыскательного наблюдателя. Поэтому для получения действительно отличного качества изображения имеет смысл предельную формулу (24) преобразовать к виду

$$\nu \geq 1,74 \sqrt[3]{D} \text{ (мм)}, \quad (25)$$

что соответствует предельной волновой aberrации  $\lambda/6$ .

Рассмотрим вопрос точности изготовления зеркал. Пусть параметры обрабатываемого зеркала удовлетворяют уравнению (24), и на основании этого было решено изготовить зеркало сферическим. Возникает вопрос: какая предельная продольная aberrация  $\tilde{\Delta s}'$  соответствует совершенному сферическому зеркалу, если исходить из рэлеевского критерия качества изображения? На рис. 15 штриховая кривая АОА изображает идеальную сферическую поверхность с

радиусом  $r$  и с центром кривизны в  $O_A$ . Правило знаков здесь можно не использовать, так как нас интересует главным образом абсолютное значение  $\tilde{\Delta s}'$ . Сплошная кривая  $BOB$  представляет собой реальную изготовленную поверхность с радиусом  $\tilde{r}$  и с центром кривизны в  $O_B$  для краевой зоны  $h$ .

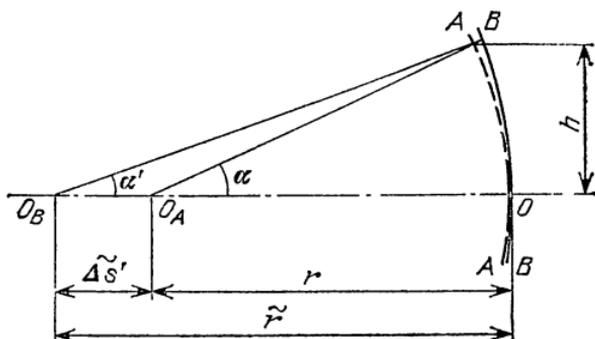


Рис. 15. К вопросу о точности изготовления одиночного зеркала

Примем без вывода, что если изготовленное зеркало обладает волновой aberrацией  $l'$  (конечно, не само зеркало, а лишь волновой фронт, сформированный его поверхностью), то продольная aberrация  $\tilde{\Delta s}'$  определяется соотношением

$$\tilde{\Delta s}' = \frac{l'}{\int_0^{\alpha'} \sin \alpha' d\alpha'} , \quad (26)$$

где критерию Рэлея соответствует  $l' = \lambda$ .

Тогда с учетом малости  $\alpha \approx \alpha'$  после интегрирования получаем

$$\tilde{\Delta s}' = \frac{\lambda}{1 - \cos(h/r)} = \frac{\lambda}{1 - \cos(D/4f')} , \quad (27)$$

где отношение  $h/r$  выражено в радианах. Из анализа формулы видно, что допустимая продольная aberrация зависит лишь от угла  $\alpha$  и определяется значением  $D/4f'$ . Поэтому, пользуясь формулой (27), составляем таблицу предельных продольных aberrаций, соответствующих рэлеевскому критерию качества изображения, для зеркал с различными относительными отверстиями (табл. 2).

Как известно, для идеального параболического зеркала продольная aberrация его нормалей для каждой зоны численно равна величине стрелки кривизны этой зоны. Поэтому данную aberrацию можно записать как

$$\Delta s' = \frac{h^2}{2r} . \quad (28)$$

Таблица 2

$D:f'$	$\widetilde{\Delta s'}$ , мм	$D:f'$	$\widetilde{\Delta s'}$ , мм
1:2	0,071	1:6	0,64
1:3	0,16	1:8	1,14
1:4	0,28	1:10	1,78
1:5	0,44	1:15	3,99

Следует подчеркнуть, что параболическое зеркало имеет aberrацию нормалей, выраженную формулой (28), но полностью свободно от aberrации волнового фронта для точки на оси. В этом разделе под продольной aberrацией зеркала понимается только aberrация его нормалей. Тогда полная aberrация зеркала с учетом допустимой погрешности на ее изготовление составит

$$S = \Delta s' \pm \widetilde{\Delta s'} = \frac{h^2}{2r} \pm \frac{l'}{\alpha'} \int_0^{\alpha'} \sin \alpha' d\alpha' \quad (29)$$

Рассмотрим несколько численных примеров.

1. Пусть мы решили изготовить зеркало диаметром 100 мм и фокусным расстоянием 1500 мм, т. е. полностью удовлетворяющим условию (24). В самом деле, в нашем случае  $\nabla = 15$ , а  $\nabla_{\min} = 7$ . Если бы мы решили придать ему форму параболоида, то в этом случае aberrация его нормалей составила бы

$$\Delta s' = \frac{h^2}{2r} = \frac{50^2}{2 \cdot 3000} = 0,42 \text{ мм.}$$

Однако допустимая продольная aberrация, соответствующая рэлеевскому допуску на отклонение поверхности от параболоида, согласно формуле (27) составляет

$$\widetilde{\Delta s'} = \pm \frac{0,555 \cdot 10^{-3}}{1 - \cos(50/3000)} = \pm 3,99 \text{ мм.}$$

Поэтому поверхность может быть не только сферической, но и уклоняться как в сторону сплюснутого сфероида (сфера с приподнятым краем), так и в сторону гиперболоида. Рис. 16, а схематически иллюстрирует сказанное. Относительно сферы величина aberrации  $S$  может составлять

3,57 мм в сторону сплюснутого сфероида и 4,41 мм в сторону гиперboloида.

2. Изготавливается зеркало диаметром 150 мм с относительным фокусом  $\nabla = 8,076$ , соответствующим формуле (24). Тогда  $f' = 1211$  мм, а  $r = 2422$  мм. Величина параболизации будет

$$\Delta s' = \frac{h^2}{2r} = \frac{75^2}{2 \cdot 2422} = 1,16 \text{ мм},$$

а допустимая продольная aberrация

$$\tilde{\Delta s}' = \pm \frac{0,555 \cdot 10^{-3}}{1 - \cos(75/2422)} = \pm 1,16 \text{ мм}.$$

Поверхность может являться сферой, параболоидом и гиперboloидом с aberrацией 2,32 мм относительно сферы (рис. 16, б).

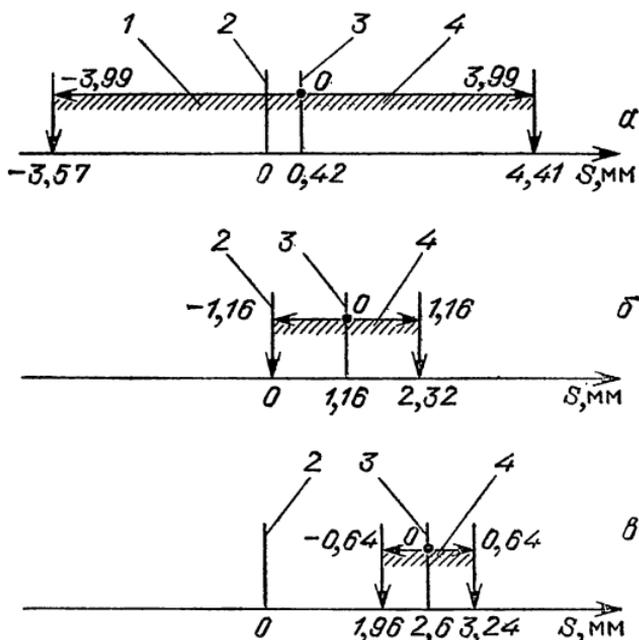


Рис. 16. Допустимая продольная aberrация при изготовлении поверхности зеркала для  $\nabla \geq \nabla_{\min}$  (а), для  $\nabla = \nabla_{\min}$  (б), для  $\nabla < \nabla_{\min}$  (в): 1 — область сфероидов, 2 — сфера, 3 — параболоид, 4 — область гиперboloидов. Штриховкой показана область допустимых отклонений поверхности зеркала относительно параболоида.

3. Изготавливается зеркало диаметром 250 мм с  $\nabla = 6$ , не удовлетворяющее условию (24), так как  $\nabla_{\min} = 9,6$ . Величина параболизации будет

$$\Delta s' = \frac{h^2}{2r} = \frac{125^2}{2 \cdot 3000} = 2,6 \text{ мм},$$

а допустимая продольная абберация

$$\widetilde{\Delta s}' = \pm \frac{0,555 \cdot 10^{-3}}{1 - \cos(125/3000)} = \pm 0,64 \text{ мм.}$$

Поверхность должна быть параболоидом и может уклоняться в сторону сферы или гиперболоида на величину, не превышающую 0,64 мм (рис. 16, в).

Разумеется, высказанное ранее положение о «мягкости» рэлеевского критерия остается в силе и здесь. Поэтому для получения поверхностей с отклонениями, не превышающими  $\lambda/12$  (волновая абберация  $\lambda/6$ ), значение  $l'$  в формуле (26) нужно положить равным 0,370 мкм.

Как уже отмечалось, параболическое зеркало свободно от сферической абберации при любых относительных отверстиях в случае бесконечно удаленной точки, находящейся на оптической оси. Если оптическая ось зеркала составляет некоторый угол с направлением на звезду, то ее изображение перестает быть идеальным и оказывается испорченным абберацией *кома*.

Причина абберации комы заключается в том, что лучи пучка, идущего под углом к оптической оси и падающие на зоны  $+h$  и  $-h$ , составляют с нормальными зеркала разные углы. Типичный характер распределения энергии в пятне комы, рассчитанный на ЭВМ, приведен на рис. 17. Его физическая интерпретация такая же, как и для пятна сферической абберации. Правда, подобная фигура пятна комы может наблюдаться лишь при большой величине комы, т. е. при значительном относительном отверстии и угловом поле.

В том случае, если кома невелика и соизмерима с дифракционной структурой изображения, ее вид будет существенно отличаться от картины пятна на рис. 17. Примем вслед за Д. Д. Максуповым, что если измерять пятна комы в долях радиуса дифракционного кружка для  $\lambda=0,555$  мкм, т. е. выражать его величиной  $k$ ,

$$k = 276 \frac{D}{\sqrt{2}} \omega, \quad (30)$$

где  $\omega$  — угол наклона параллельного пучка к оптической оси, то при  $k=1$  изображение практически неотлично от идеального. Разница заключается в незначительном усилении интенсивности света в той части первого дифракционного кольца, которая направлена в сторону геометрического хвоста комы. При более высоких значениях  $k$  качество изображения, даваемого зеркалом, уже заметно ухудшается. Поэтому условно принято считать кому безвредной,

если соблюдается условие

$$\omega_{\max} = \frac{3,62 \cdot 10^{-3} \sqrt{D}}{D} \text{ рад,} \quad (31)$$

где  $D$  — диаметр зеркала, выраженный в мм. Эта предельная зависимость достаточно хорошо оправдала себя на практике. В табл. 3 приведены значения предельного углового поля  $2\omega_{\max}$ , определяемые допустимой величиной аберрации кома для одиночного зеркала.



Рис. 17. Характер распределения освещенности в пятне рассеивания в зависимости от плоскости установки при наличии аберрации кома: *a* — плоскость проходит через точку  $M_1'$  (см. рис. 10); *b* — плоскость проходит через точку  $M_2'$

Что же касается аберраций *астигматизм* и *кривизна поля*, которые приводят к размытию звездных изображений в эллиптические пятна, то при умеренных полях зрения эти аберрации не дают себя заметно чувствовать. Однако с увеличением углового поля их значение возрастает, и они начинают преобладать над комой. Действие астигматизма и комы уравнивается [1], когда

$$\omega = 10,8 \frac{D}{f'} \text{ град.} \quad (32)$$

Таблица 4 дает представление о соотношении значений  $\omega$   $D : f'$ . Любитель редко использует для визуальных наблюдений поля, большие одного градуса, поэтому в реальных

Таблица 3

$D:f'$	$D, \text{ мм}$								
	110	165	215	265	315	360	400	450	600
1:2	54,3"	36,2"	27,8"	22,5"	18,9"	16,6"	14,9"	13,3"	9,9"
1:3	2' 2"	1' 21"	1' 2"	51"	42",6	37,4	33,6	29,8	22,4
1:4	3 37	2 24	1 51	1' 30"	1' 16"	1' 6"	59,7	53,1	39,8
1:5	5 39	3 46	2 54	2 21	1 59	1 44	1' 33"	1' 23"	1' 2"
1:6	8 09	5 26	4 10	3 22	2 50	2 30	2 14	1 59	1 30
1:8	14 28	9 40	7 25	6 0	5 4	4 26	3 58	3 32	2 39
1:10	22 38	15 6	11 35	9 24	7 54	6 54	6 14	5 32	4 9
1:15	50 54	33 56	26 3	21 8	17 46	15 33	14 00	12 27	9 20

условиях именно aberrация кома будет наиболее сильно влиять на качество изображения.

Понятие aberrации астигматизм, свойственное зеркалу как реальной оптической системе, нельзя смешивать с *астигматизмом поверхности*, который чаще всего возникает из-за неправильной установки зеркала в оправе или нарушения процесса его обработки. В результате этого дифракционное изображение звезды оказывается в той или иной степени искаженным: нарушается его симметрия, появляются утолщения и разрывы в кольцах и проч.

В заключение краткого обзора оптических свойств одиночного зеркала отметим, что в зеркале отсутствует искажение подобия изображения и предмета (*дисторсия*) в случае, если входной зрачок совмещен с зеркалом. Параболическое зеркало свободно от дисторсии также и в случае, если входной зрачок лежит на расстоянии  $4/3$  фокусного расстояния, а для сферы — на удвоенном или учетверенном фокусном расстоянии. Наконец, как всякая зеркальная система, оно (зеркало) во всех случаях свободно от хроматических aberrаций.

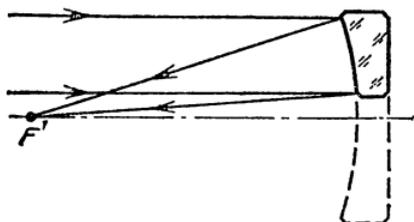
Таблица 4

$D:f'$	$\omega$	$D:f'$	$\omega$
1:2	5°24'	1:6	1°48'
1:3	3 36	1:8	1 21
1:4	2 42	1:10	1 05
1:5	2 09	1:15	43

## § 2. ПРОСТАЯ ОДНОЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ПЛОСКИМ ЗЕРКАЛОМ

Для проведения визуальных наблюдений в инструмент, изображенный на рис. 9, наблюдатель должен расположить свой глаз, вооруженный окуляром, а следовательно, и свою голову на пути лучей. Этого можно избежать, если наклонить зеркало вбок на небольшой угол и вывести изображение за пределы трубы (система Ломоносова — Гершеля), либо использовать дополнительное плоское зеркало, изменяющее направление распространения лучей, но не вносящее дополнительных aberrаций (система Ньютона). Первая схема невыгодна в том отношении, что простой наклон главного зеркала (сферического или параболического) приводит к чрезвычайно быстрому росту полевых aberrаций. Поэтому относительное отверстие такого телескопа должно быть очень малым. Простой расчет показывает, что относительному отверстию 1 : 20 соответствует зеркало диаметром всего лишь около 60 мм.

Рис. 18. Оптическая схема с выносом изображения за пределы трубы, представляющая собой внешнюю часть более крупного зеркала



Другое дело, если его можно рассматривать как часть более крупного зеркала (рис. 18). Несмотря на предельную простоту схемы, широкого распространения среди любителей телескопостроения она не получила. Это связано с тем, что изготовление главного зеркала — внеосевого парабооида — является задачей весьма сложной. Автор обладает двумя подобными зеркалами, диаметром 150 мм и относительным отверстием 1 : 8, однако преимущества, связанные с отсутствием экранирования центральной части, не компенсируются усложнением процесса изготовления.

Поэтому для любителя телескопостроения на первых порах остается наиболее доступной схема Ньютона, у которой изображение вынесено вбок за пределы трубы с помощью диагонального плоского зеркала (рис. 19, а). Иногда в небольших малосветосильных телескопах применяются призмы полного внутреннего отражения (рис. 19, б), достоинством которых является простота ухода за ними и постоянство

коэффициента светопропускания (около 90 %). Во всех остальных случаях диагональное плоское зеркало предпочтительнее призмы полного внутреннего отражения. Оно не вносит никаких дополнительных aberrаций, связанных с прохождением света в толще стекла, а само оно может быть изготовлено из наиболее выгодного в смысле малости температурных искажений поверхности стекла. Зеркало меньше экранирует пучок и вызывает меньшие дифракционные помехи.

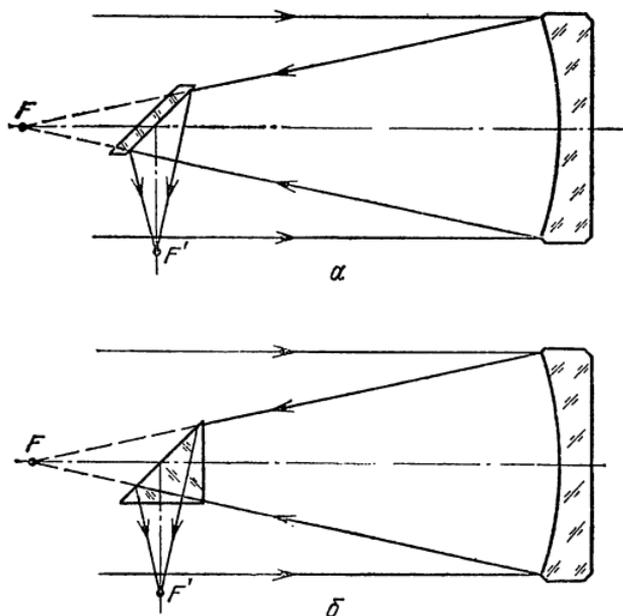


Рис. 19. Использование плоского зеркала (а) и призмы полного внутреннего отражения (б) для выноса изображения

Рассмотрим вопросы о размере и форме диагонального зеркала, а также точности изготовления его поверхности. Контур диагонального зеркала предпочтительно делать эллиптическим для того, чтобы оно проектировалось на главное зеркало в виде круга. Размеры диагонального зеркала зависят от конструктивных параметров телескопа — его относительного отверстия  $D : f'$ , величины смещения вбок фокальной плоскости  $\Delta$  и задаются на основании требуемого размера невиньетированного поля постоянной яркости. Используемый размер поля обычно ограничивается aberrационными искажениями. Однако любители при задании линейного поля исходят, как правило, из размера полевой диафрагмы окуляра, диаметр которой приблизительно составляет  $0,7 f_{\text{ок}}$ . Ранее было показано, что фокусное рас-

$D:f'$	$2y'_{\max}$ , мм	$12y'_{\max}$ , мм	$D:f'$	$2y'_{\max}$ , мм	$12y'_{\max}$ , мм
1:2	0,06	0,36	1,6	1,6	9,6
1:3	0,2	1,2	1:8	3,7	22,2
1:4	0,5	3,0	1:10	7,2	43,2
1:5	0,9	5,4	1:15	24	144

стояние наиболее слабого из окуляров равно  $6\sqrt{\nu}$  мм. Тогда для величины линейного поля получим

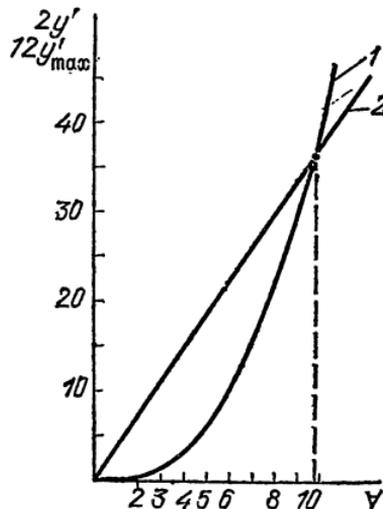
$$2y' \approx 4,2\sqrt{\nu} \text{ мм.} \quad (33)$$

Линейный размер поля в фокальной плоскости зеркала связан с угловым полем  $2\omega_{\max}$  очевидным соотношением

$$2y'_{\max} \approx 2\omega_{\max} \cdot f' \text{ мм,} \quad (34)$$

где  $\omega_{\max}$  выражено в радианах. Составим табл. 5, определяющую размер линейного визуального поля, в пределах

Рис. 20. Соотношение размеров линейного безабберационного поля (1) и полевой диафрагмы наиболее слабого из окуляров (2) в зависимости от величины относительного фокуса главного зеркала



которого кома не заметна, аналогичную табл. 3, где вместо  $2\omega_{\max}$  приведены значения  $2y'_{\max}$ . Размер поля при использовании окуляра, дающего равнозрачковое увеличение, может быть увеличен приблизительно в шесть раз ( $12y'_{\max}$ ). На рис. 20 представлены графики зависимости величины линейных полей  $2y'$  и  $12y'_{\max}$  простой однозеркальной

системы от ее относительного фокуса. Если предположить, что окуляр представляет собой идеальную оптическую систему, то следует, что любителю придется мириться с тем, что линейное поле его инструмента на краях будет искажено аберрациями, если  $V \leq 10$  и размеры диагонального зеркала обеспечивают невиньетированное поле постоянной яркости для окуляра, дающего равнозрачковое увеличение.

Пусть диагональное зеркало переносит наблюдаемое поле  $2y'$  из положения  $A$  в положение  $B$ , и  $2b$  есть размер его малой оси (рис. 21). Тогда большая ось диагонального зеркала  $2a = 2b\sqrt{2}$ .

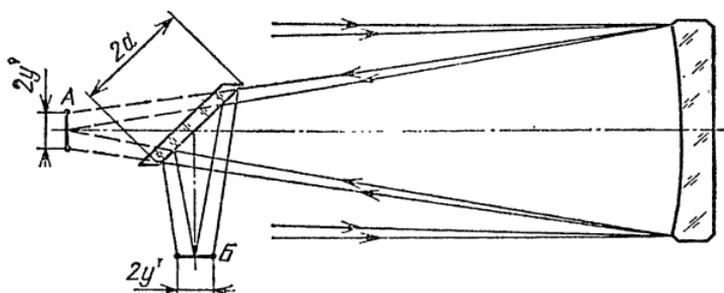


Рис. 21. Действие диагонального зеркала в телескопе системы Ньютона

Если принять, что центр эллиптического зеркала совпадает с оптической осью главного зеркала, то из простых геометрических построений можно вывести приближенную формулу, с помощью которой легко определить его размеры,

$$2b \approx \frac{D \cdot \Delta + 2y' (f' - \Delta)}{f'}, \quad (35)$$

где  $\Delta$  — вынос изображения, т. е. расстояние от центра эллиптического зеркала до фокальной плоскости.

Реальное эллиптическое зеркало должно быть несколько большего размера. Впрочем, эта ошибка для малосветосильных зеркал достаточно мала и становится значительной лишь для светосильных инструментов. Погрешность  $g$ , которую мы вводим, имеет в этом случае следующий порядок величин:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } D: f' = 1:10 \quad g = 7,1 \cdot 10^{-3}b, \\ \text{при } D: f' = 1:5 \quad g = 2,9 \cdot 10^{-2}b, \\ \text{при } D: f' = 1:2 \quad g = 1,9 \cdot 10^{-1}b. \end{array} \right\} \quad (36)$$

$D:f'$	$D, \text{ мм}$								
	110	165	215	265	315	360	400	450	600
1:2	9,4	8,3	7,8	7,5	7,3	7,2	7,1	7,0	6,8
1:3	6,9	5,3	4,6	4,3	4,0	3,8	3,7	3,6	3,4
1:4	6,7	4,6	3,7	3,3	2,9	2,8	2,6	2,5	2,2
1:5	7,3	4,6	3,5	2,9	2,6	2,3	2,2	2,0	1,7
1:6	8,6	5,0	3,6	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	1,5
1:8	12	6,4	4,4	3,3	2,6	2,3	2,0	1,8	1,3
1:10	17	8,5	5,5	4,0	3,1	2,6	2,2	1,9	1,4
1:15	34	16	10	6,9	5,1	4,1	3,4	2,8	1,8

Размер зеркала можно определить и графически, если вычертить на миллиметровой бумаге в определенном масштабе (1 : 2 или 1 : 3) ход лучей в системе, исходя из ее конструктивных данных: диаметр главного зеркала, его фокусное расстояние, линейный диаметр поля и вынос изображения. Определив размер большой оси зеркала  $2a$  и разделив его значение на 1,4, получим размер малой оси зеркала.

Проектируясь на главное зеркало в форме круга с диаметром  $2b$ , диагональное зеркало вызывает экранирование параллельного пучка лучей. Потери на экранирование по площади обозначим через  $P_a$ , тогда

$$P_a = \left( \frac{2b}{D} \right)^2 \cdot 100\%. \quad (37)$$

Если положить вынос изображения  $\Delta = D/2$ , то, используя формулы (33), (35), (37), получим выражение для минимально возможного значения  $P_a$ ,

$$P_a = \left[ \frac{1}{2\sqrt{\nu}} + \frac{4,2(\sqrt{\nu}-0,5)}{D} \right]^2 \cdot 100\%. \quad (38)$$

Как уже указывалось ранее, если исходить из дифракционной теории, максимально допустимое  $P_a \leq 11\%$ . Составим таблицу потерь на экранирование в телескопе системы Ньютона, аналогичную приводимой Д. Д. Максудовым [1], для «любительских» диаметров зеркал телескопов (табл. 6). В действительности, конечно, потери будут несколько больше, так как зеркала инструмента заключены в оправу. Из таблицы видно, что чем крупнее диаметр зеркала, тем при постоянном значении  $\sqrt{\nu}$  инструмент более «экономичен»

в смысле использования световой энергии. С другой стороны, для каждого  $D$  существует оптимальное относительное отверстие, при котором  $P_v$  минимально, что определяется относительным вкладом величины визуального поля  $2y'$ .

Если размеры диагонального зеркала окажутся несколько меньше, чем это следует по формуле (33), то срезание крайних лучей приведет к некоторому падению контраста изображения на краю поля зрения. Если значение малой оси  $2b < \frac{D \cdot \Delta}{f'}$ , то это равносильно диафрагмированию главного зеркала, т. е. диагональное зеркало в этом случае является виньетирующей диафрагмой даже для осевого пучка лучей.

В более крупных любительских инструментах часто вместо эллиптического зеркала применяют прямоугольное, реже круглого очертания. И в том, и в другом случае количество света, экранируемое нерабочими частями, невелико. То же относится и к прямоугольной призме полного внутреннего отражения, если по тем или иным причинам решено применить именно ее. Думается все же, что и в этом случае призму целесообразно будет использовать лишь в качестве плоского зеркала, алюминировав гипотенузную грань.

Выше, когда мы говорили о точности изготовления одиночной зеркальной поверхности, уже отмечалось, что она должна быть как минимум вдвое выше критерия Рэлея, т. е.  $\lambda/8$ . Если же в телескопе используются два зеркала (система Ньютона), то в случае, если каждое изготавливается независимо одно от другого, точность должна быть удвоена, т. е. стать равной  $\lambda/16$ .

После отражения от идеально плоской поверхности диагонального зеркала сходящийся пучок света не приобретает никаких aberrаций. Однако на практике реальное зеркало обладает теми или иными погрешностями изготовления, и поэтому вносимые им aberrации могут существенным образом снизить качество изображения. Зеркало, имеющее даже незначительную общую вогнутость или выпуклость, может вызывать значительные aberrации наклонных пучков — главным образом астigmatизм. Не вдаваясь в подробности теории, ограничимся лишь следующими замечаниями. Кривизна поверхности  $\rho$  связана с создаваемой ею aberrацией  $\Delta_{sm}$  и с выносом изображения  $\Delta$  следующей зависимостью:

$$\rho = \frac{1}{r} = 0,7 \frac{\Delta_{sm}}{\Delta^2}. \quad (39)$$

Если положить, что  $\Delta_{sm}$ , согласно критерию Рэлея, должно удовлетворять условию

$$|\Delta_{sm}| \leq 2\sqrt{2}\lambda, \quad (40)$$

где

$$\sqrt{2} = \frac{\Delta}{2b},$$

то

$$r = 1,27 \cdot 10^3 (2b)^2 \text{ мм.} \quad (41)$$

При такой кривизне отступления поверхности зеркала от плоскости на краях малой и большой осей соответственно будут равны

$$\delta_b = 0,098 \text{ мкм,} \quad \delta_a = 0,196 \text{ мкм.}$$

Это означает, что точность изготовления поверхности диагонального зеркала зависит от его расстояния до главного фокуса и определяется размером малой оси эллипса, заполненного светом на самом зеркале. В пределе, когда диагональное зеркало совпадает с фокальной плоскостью, его поверхность может быть как угодно неточной.

### § 3. СЛОЖНАЯ ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА

Под сложными двухзеркальными системами телескопов обычно понимают системы, содержащие два неплоских зеркала, участвующих в построении изображения. Первое зеркало, называемое *главным*, определяет собой действующее отверстие сложной системы. Второе, или *вторичное*, зеркало преобразует сходимость пучка света. Кроме того, такая схема может содержать дополнительно любое число плоских зеркал, не меняющих сходимость и аберрации пучка, но направляющих свет в место, удобное для наблюдения.

Как известно, все разновидности сложных двухзеркальных систем можно свести к четырем основным типам, изображенным на рис. 22. В соответствии с правилами знаков (см. § 1) они характеризуются в общем случае величинами сопряженных расстояний  $\pm s$  и  $\pm s'$ , а также сходимость отраженных пучков, т. е. соотношением фокусных расстояний главного зеркала и всей системы в целом. Фокус системы находится в точке  $F'$ , являющейся изображением точки  $F$  во вторичном зеркале. В схемах *a* и *b* вторичное зеркало  $B$  расположено перед фокусом  $F$  главного зеркала  $A$ . Поэтому такие схемы принято называть *предфокальными*. Они

переворачивают изображение и по длине несколько короче схем *в* и *г*, носящих название *зафокальных* и обладающих прямым изображением. Схемы *а* и *в* уменьшают сходимость пучка, увеличивают масштаб изображения, их фокусное расстояние превышает фокусное расстояние главного

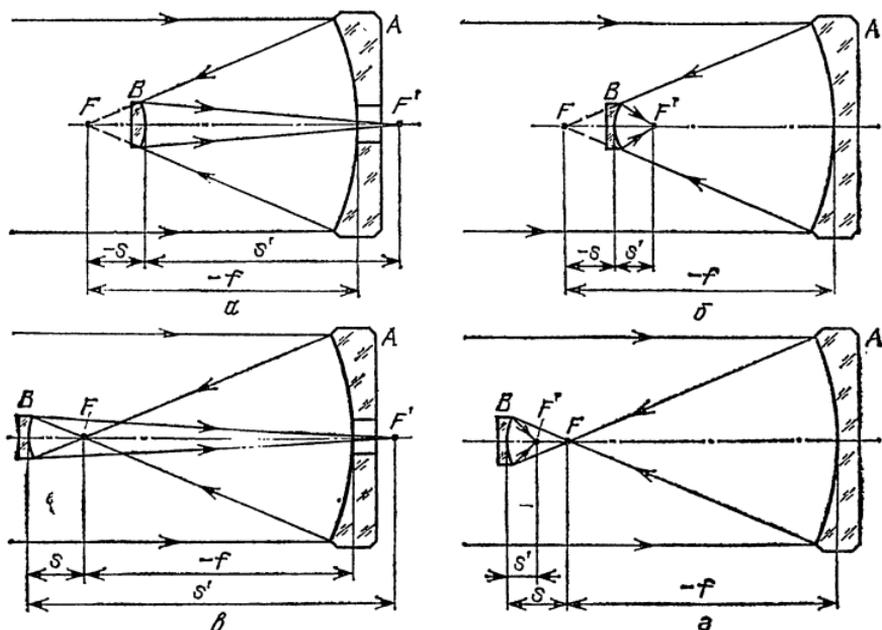


Рис. 22. Разновидности сложных двухзеркальных систем. А — главное зеркало, В — вторичное зеркало

зеркала. Отсюда и название — *удлиняющие*. Противоположными свойствами обладают *укорачивающие* схемы *б* и *г*. Помимо этого для описания вида формы поверхности зеркала, профиль которого представляет собой одно из возмож-

Таблица 7

Квадрат эксцентриситета	Вид формы поверхности сфероида
$e^2 < 0$	Сплюснутый сфероид (вращение эллипса вокруг малой оси)
$e^2 = 0$	Сфера
$0 < e^2 < 1$	Эллипсоид вращения (вращение эллипса вокруг большой оси)
$e^2 = 1$	Параболоид
$e^2 > 1$	Гиперболоид

ных конических сечений, используется квадрат эксцентриситета  $e^2$ , как следует из табл. 7. Положение их фокусов является функцией  $r$  и  $e^2$  и определяется следующими выражениями (рис. 23):

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \frac{r}{1-e^2}, \\ d_2 &= \frac{2r}{1-e^2} \sqrt{-e^2}, \\ d_3, d_4 &= \frac{r}{1-e^2} (1 \pm e), \\ d_5 &= \frac{r}{2}, \\ d_6, d_7 &= \frac{r}{1-e^2} (e \pm 1). \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Масштаб кривой или поверхности определяется радиусом кривизны  $r$  при вершине зеркала.

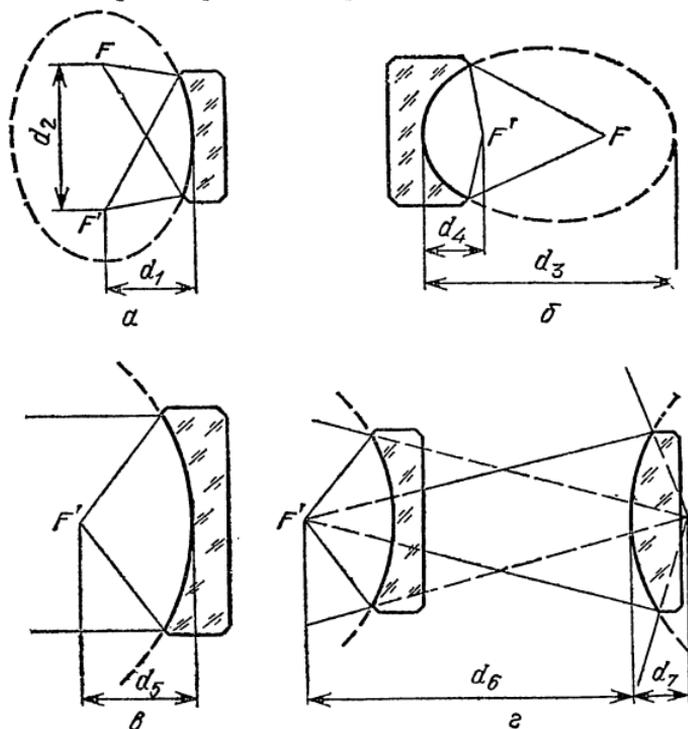


Рис. 23. Положение фокусов зеркал, форма поверхности которых представляет собой одно из возможных конических сечений: сплюснутый сфероид (а), эллипсоид вращения (б), параболоид (в), гиперболоид (г)

До настоящего времени из числа выделенных основных типов систем наибольшее предпочтение отдается схеме а рис. 22. Определенные преимущества такой системы, за-

ключающиеся в компактности всего инструмента, большим линейном поле, неискаженном аберрациями, возможности применять более длиннофокусные окуляры, привели к тому, что несмотря на дополнительные трудности, многие любители небезуспешно берутся за их изготовление.

Для ее расчета обозначим через  $\beta$  и  $\alpha$  следующие отношения (рис. 24):

$$\beta = -\frac{s_2'}{s_2} = -\frac{f_1'}{f'_{\text{экв}}}, \quad (43)$$

$$\alpha = \frac{f_1'}{s_2} = \frac{f'_{\text{экв}}}{s_2} = \frac{h_1}{h_2}. \quad (44)$$

Параметр  $\beta$  характеризует изменение сходимости пучка лучей после вторичного зеркала, обратная величина которого есть увеличение на вторичном зеркале.

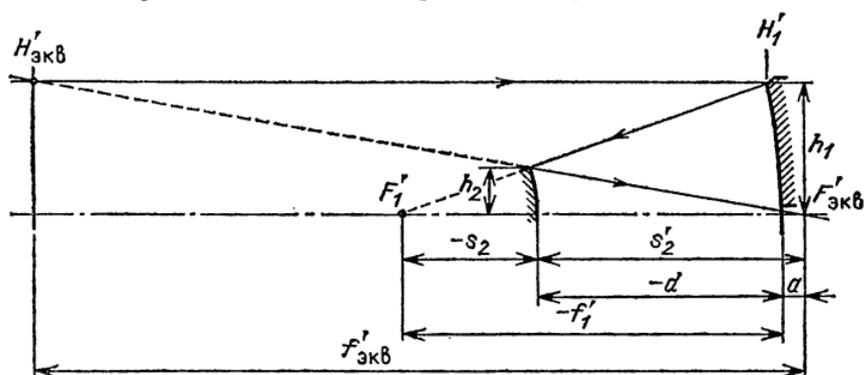


Рис. 24. Основные обозначения для габаритного расчета телескопа системы Кассегрена

Параметр  $\alpha$  определяет положение вторичного зеркала. Обратная ему величина  $g=1/\alpha$  характеризует степень экранирования главного зеркала. Необходимо отметить, что приводимые отношения являются достаточно приближенными для конечных параметров системы, особенно высокоапертурной. Для фокусного расстояния вторичного зеркала будет справедливо следующее уравнение:

$$f_2' = \frac{f_1'}{\alpha(1-\beta)}. \quad (45)$$

Оценим расстояние между зеркалами. Так как

$$d = f_1' - s_2,$$

то с учетом (44) имеем

$$d = f_1' \left( \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right). \quad (46)$$

Произведем расчет системы. Обычно любитель исходит из имеющейся в наличии заготовки под главное зеркало некоторого диаметра  $D_1 = 2h_1$ . Для него необходимо выбрать эквивалентное фокусное расстояние системы  $f'_{\text{ЭКВ}}$ ,

$$f'_{\text{ЭКВ}} = D_1 \cdot V_{\text{ЭКВ}}. \quad (47)$$

Значение  $V_{\text{ЭКВ}}$  определяется теми задачами, для решения которых создается инструмент. Если предполагается наблюдение ярких объектов, то  $V_{\text{ЭКВ}}$  выбирается равным порядка 15. . . 20. Для слабых малоcontrastных объектов  $V_{\text{ЭКВ}}$  не должно превышать 10. . . 12, иначе, как уже упоминалось ранее, для получения равнозрачкового увеличения потребуется очень слабый окуляр, соответственно преувеличенных размеров. Чаще всего  $V_{\text{ЭКВ}}$  берут равным приблизительно 15. При этом любитель должен иметь в виду следующее. Для того чтобы диаметр вторичного зеркала можно было сделать небольшим ( $\alpha \geq 4$ ), необходимо для более светосильных систем изготавливать более светосильные главные зеркала, а это обстоятельство, как мы знаем, вызывает существенные затруднения для его изготовления. Поэтому на первых порах целесообразно взять относительное эквивалентное фокусное расстояние системы не менее 15. Тогда значение относительного фокусного расстояния главного зеркала составит 3. . . 5.

Таблица 8

$V_{\text{ЭКВ}}$	$\alpha$	$V_{\text{ЭКВ}}$	$\alpha$
10	3,7	16	4,0
12	3,8	18	4,1
14	3,9	20	4,2

Практически можно поступить следующим образом. Задаемся значением  $a$ , представляющим собой вынос фокальной плоскости системы за главное зеркало. Оно определяется размерами оправы и окулярной части. Выбираем параметр  $\alpha$  по табл. 8 в зависимости от  $V_{\text{ЭКВ}}$ . Зная эквивалентное фокусное расстояние системы, находим отрезок  $s'_2$ :

$$s'_2 = \frac{f'_{\text{ЭКВ}}}{\alpha}. \quad (48)$$

По величине воздушного промежутка между зеркалами, равной

$$d = a - s'_2, \quad (49)$$

пользуясь формулой (46), находим фокусное расстояние главного зеркала

$$f_1' = \frac{\alpha}{\alpha - 1} (\alpha - s_2').$$

По найденному значению можно найти все остальные габаритные параметры двухзеркальной системы, а также радиус кривизны вторичного зеркала.

Рассмотрим теперь, как определяются диаметр выпуклого зеркала и диаметр отверстия в главном зеркале. Сделаем предварительно небольшое отступление. Известно, что в принципе возможно при любой форме поверхности главного зеркала получить на оси системы идеальное безаберрационное изображение за счет компенсации сферической аберрации вторичным зеркалом. Если главное зеркало есть поверхность вращения второго порядка, то эта связь через их эксцентриситеты выражается следующим образом:

$$e_2^2 = \frac{(\beta + 1)^2 (\beta - 1) + \alpha (1 - e_1^2)}{(\beta - 1)^3}. \quad (50)$$

Однако в настоящее время любители применяют для своих инструментов из сложных двухзеркальных систем, пожалуй, лишь классическую, в которой главное зеркало является параболоидом, — систему Кассегрена. И это вполне справедливо. В ней каждое из зеркал, главное и вторичное, самостоятельно исправлено на сферическую аберрацию для соответствующих сопряженных расстояний. Однако вне оптической оси изображение оказывается испорченным аберрациями. Как и в случае одиночного зеркала, наибольший вред здесь приносит кома. Однако в удлиняющих системах, к которым принадлежит система Кассегрена, кома меньше снижает качество изображения, чем в случае одиночно использованного главного зеркала: кома у них такая же, как и у одиночного параболоида с фокусным расстоянием, равным  $f'_{\text{экв}}$ . Поэтому можно составить табл. 9 значений пре-

Таблица 9

$\nabla_{\text{экв}}$	$2y'_{2\text{max}}$	$12y'_{2\text{max}}$	$\nabla_{\text{экв}}$	$2y'_{2\text{max}}$	$12y'_{2\text{max}}$
10	7,2	43	16	30	180
12	13	78	18	42	252
14	20	120	20	60	360

дельного линейного поля  $2y'_{2\max}$ , определяемых допустимыми значениями аберрации кома, согласно (34), в фокальной плоскости системы. Предельные значения поля  $12y'_{2\max}$  соответствуют наблюдению с равнозрачковым окуляром.

Мы видим, что размер линейного поля у любительского инструмента будет практически во всех случаях ограничен диаметром полевой диафрагмы окуляра. Полностью такие линейные поля могут использоваться лишь в крупных инструментах. Любители же ограничиваются, как правило, только их частью, так как диаметр полевой диафрагмы обычно не превышает 30. . 40 мм. Правда, некоторый имеющийся запас может пригодиться при фотографических работах.

Итак, для осевой точки  $F'_{\text{эКВ}}$  (рис. 25) диаметр  $2h_2$  вторичного зеркала  $D_2$  можно определить по формуле (44).

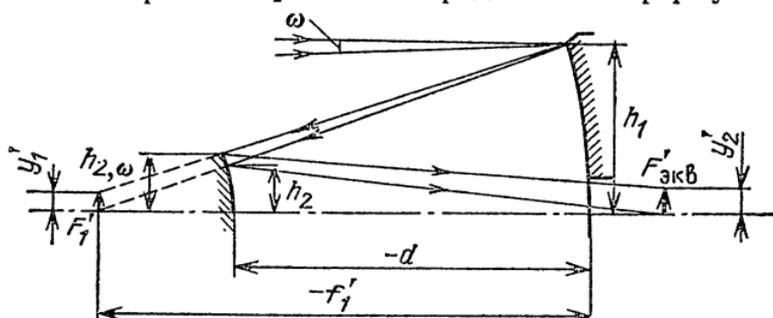


Рис. 25. Определение диаметра выпуклого зеркала

Совершенно очевидно, что для того, чтобы обеспечить невиньтированное поле  $2y'_2$  постоянной яркости, диаметр вторичного зеркала  $D_2$  необходимо увеличить до  $D_{2,\omega}$ :

$$D_{2,\omega} = 2h_{2,\omega}. \quad (51)$$

Найдем приращение  $\Delta h$ :

$$\Delta h = h_{2,\omega} - h_2. \quad (52)$$

Из геометрических построений

$$\Delta h = \frac{dy'_1}{f'_1}. \quad (53)$$

Отрезки  $y'_1$  и  $y'_2$  связаны через  $\beta$  — меру изменения масштаба изображения:

$$\beta = \frac{y'_1}{y'_2}. \quad (54)$$

Тогда приращение составит

$$\Delta h = \frac{d \cdot y'_2 \cdot \beta}{f'_1}. \quad (55)$$

Полный диаметр  $D_{2,\omega}$  с учетом (44), (51), (52) и (55) равен

$$D_{2,\omega} = \frac{D_1}{\alpha} + \frac{\beta \cdot d \cdot 2y'_2}{f'_1}. \quad (56)$$

Экранирование системы

$$P_{2,\omega} = \left( \frac{D_{2,\omega}}{D_1} \right)^2 \cdot 100\%. \quad (57)$$

Разберем численный пример (все линейные параметры выражены в мм). Пусть диаметр главного зеркала  $D_1=200$ , вынос фокальной плоскости  $a=200$ . Выберем эквивалентный относительный фокус системы  $V_{\text{экр}}=16$ . Тогда согласно табл. 8 параметр  $\alpha=4$ .

1. По формуле (47) определяем значение эквивалентного фокуса

$$f'_{\text{экр}} = V_{\text{экр}} \cdot D_1 = 3200.$$

2. По формуле (48) находим отрезок  $s'_2$

$$s'_2 = \frac{f'_{\text{экр}}}{\alpha} = 800.$$

3. Расстояние между зеркалами  $d$  по формуле (49) равно

$$d = a - s'_2 = -600.$$

4. Фокусное расстояние главного зеркала

$$f'_1 = \frac{\alpha}{\alpha-1} (a - s'_2) = -800.$$

По увеличению  $\beta=0,25$  (формула (43)) определяем фокусное расстояние вторичного зеркала

$$f'_2 = \frac{f'_1}{\alpha(1-\beta)} \approx -267.$$

Положим  $2y'_2=30$ . Согласно (34) такому линейному полю будет соответствовать угловое поле  $2\omega \approx 0,54^\circ$ . Соответствующий ему диаметр выпуклого зеркала  $D_{2,\omega}$  находим по формуле (56)

$$D_{2,\omega} = \frac{D_1}{\alpha} + \frac{\beta d 2y'_2}{f'_1} = 55,6.$$

Наконец, экранирование системы составит по формуле (57)

$$P_{2,\omega} = \left( \frac{D_{2,\omega}}{D_1} \right)^2 \cdot 100\% \approx 8\%.$$

Известно, что размер нерабочей части главного зеркала не должен превышать  $1/3$  от его диаметра, иначе это может отрицательно сказаться на качестве изображения. Однако увеличение поля зрения приводит к увеличению отверстия в главном зеркале. Поэтому необходимо обязательно помнить о предельном соотношении  $\frac{D_1}{2y_2'} \geq 3$ . Обычно диаметр отверстия  $D_3 = 2h_3$  выбирают, исходя из следующего соображения. Если диаметр отверстия  $D_3$  в главном зеркале сделать равным диаметру вторичного зеркала, то часть лучей, идущих от объектов, не находящихся на оптической оси, будет попадать в это отверстие, минуя главное зеркало, и произойдет потеря полезного света. Чтобы этого не было, отверстие в главном зеркале не должно превышать  $D_2 + 2d\omega$ , где  $D_2$  — диаметр оправы вторичного зеркала,  $d$  — расстояние между зеркалами ( $d < 0$ ),  $\omega$  — угол поля зрения в радианах.

В двухзеркальных телескопах типа Кассегрена возможна паразитная засветка линейного поля посторонними лучами света, идущими непосредственно от неба. Она становится особенно заметной при дневных наблюдениях, например, Венеры при небольших угловых расстояниях от Солнца. Для того чтобы этого избежать, в таких системах применяют специальные светозащитные трубки, называемые отсекателями. К сожалению, они неизбежно увеличивают центральное экранирование. Их размеры зависят от целого ряда конструктивных параметров системы: диаметров главного и вторичного зеркал, воздушного промежутка между ними, выноса фокальной плоскости за вершину главного зеркала, его относительного отверстия, линейного (углового) поля, в пределах которого оно должно быть свободно от виньетирования. Существуют методы аналитического расчета отсекаателей [3]. Однако они достаточно сложны и для любителя трудно применимы. Обычно определение конструктивных параметров экранирующих элементов производится графически. Для этого на листе ватмана в масштабе  $1 : 2$ , а для небольших инструментов — в натуральную величину, строится ход лучей в телескопе.

Если мы хотим полностью избавиться от паразитных лучей в пределах всего заданного поля, то необходимо введение двух экранов. Один из них представляет собой цилиндрическую или коническую трубку  $A$  длиной  $L$ , закрепляемую через отверстие в главном зеркале (рис. 26). Внутри трубки устанавливают ряд диафрагм, чтобы препятствовать проникновению в окуляр лучей, отраженных от сте-

нок самой трубки. Защитная трубка  $B$  диаметром  $\tilde{D}_2 = 2\tilde{h}_2$  надевается на вторичное зеркало. Сразу отметим, что ее габариты могут быть значительно уменьшены при некотором увеличении размера выноса изображения и, понятно, уменьшении величины поля. В результате совместной работы отсекателей ни один луч не попадет на поле  $2y'_2$ , минуя оптическую систему.

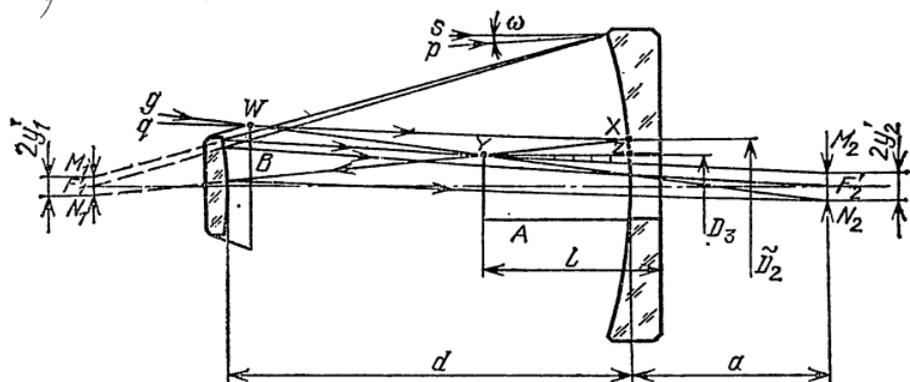


Рис. 26. Графическое определение размеров светозащитных трубок

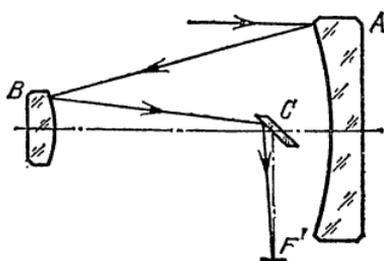
На оптической схеме луч  $s$  строит изображение точки на оси. Все расстояния здесь будем считать положительными. Изобразим два наклонных луча. Один из них —  $p$ , падая на край входного зрачка под углом  $\omega$ , направляется в точку  $M_1$ , но, отразившись от выпуклого зеркала, оказывается в точке  $M_2$ . Другой луч  $q$ , касаясь внешнего края трубки  $B$ , в общем случае должен быть наклонен под углом  $\omega$  и затем попасть после отражения от главного зеркала в точку  $N_1$ , симметричную точке  $M_1$ . При построении большой погрешности не будет, если этот луч мы проведем параллельно оптической оси зеркала. Однако после отражения от главного зеркала он все же должен быть направлен в точку  $N_1$ , а не  $F'_1$ . После отражения от выпуклого зеркала он оказывается в точке  $N_2$ , симметричной точке  $M_2$ . В результате пересечения лучей  $p$  и  $q$  мы получили треугольник  $XYZ$ . Его точка  $Y$  определяет длину  $L$  светозащитной трубки  $A$ . Таким образом, изображенный на схеме луч  $g$ , проходящий через точки  $W$ ,  $Y$  и  $N_2$ , как раз и определяет внешнюю границу незасвеченного паразитными лучами линейного поля.

На практике такие построения приходится выполнять несколько раз, так как нам заранее не известен диаметр светозащитной трубки  $B$ . Поэтому обычно вначале находят длину трубки  $A$ , исходя из диаметра выпуклого зеркала. Затем проводят луч  $g$  из точки  $N_2$  через точку  $Y$ , опреде-

ляя положение точки  $W$ . Диаметр трубки  $B$  и соответствующая ему новая длина трубки  $A$  определяют размер линейного поля в фокальной плоскости системы несколько больше заданного. Поэтому путем нескольких последовательных коррекций значений  $L$  и  $\tilde{h}_2$  можно обеспечить заданный размер поля. При ночных безлунных наблюдениях можно вообще отказаться от трубки  $B$ , сделав ее съемной, так как рассеянный свет неба слабо влияет на контраст изображения. Наконец, если предполагается использовать лишь отсекаТЕЛЬ  $A$ , то можно пойти на компромиссный вариант и сразу рассчитать его на частичное виньетирование края поля зрения. Думается все же, что первый вариант более предпочтителен.

Одной из модификаций схемы Кассегрена, часто применяемой любителями, является схема Нэсмита. Конструктивно основным ее отличием является введение дополнительного плоского зеркала  $C$  (рис. 27), которое отбрасывает вбок лучи, отраженные от зеркала  $B$ . Обычно оно закрепляется и регулируется через отверстие в главном зеркале для исключения вредного воздействия растяжек на характер дифракционной картины. Эта схема позволяет повысить удобства наблюдений и, что особенно важно, использовать низкую компактную установку для особо крупных любительских зеркал. Принципиально ее расчет не отличается от расчета системы Кассегрена. Расчет плоского зеркала аналогичен расчету зеркала в телескопе Ньютона.

Рис. 27. Оптическая схема Нэсмита:  $A$  — главное параболическое зеркало,  $B$  — вторичное гиперболическое зеркало,  $C$  — вспомогательное плоское зеркало



В заключение несколько слов об ограничениях, связанных с асферизацией и центрированием зеркал. Трудность изготовления главного и вторичного зеркал определяется величиной их асферичности. Наибольшее отклонение главного параболического зеркала от ближайшей сферы сравнения определяется согласно формуле (20), т. е. величина асферичности растет, как куб относительного отверстия зеркала. В этом смысле при изготовлении главного зеркала практически безразлично, является ли оно строго параболическим или, скажем, квазигиперболическим. В то же время

увеличение относительного отверстия, например, от 1 : 3 до 1 : 2 весьма существенно, так как асферичность возрастает почти в четыре раза. Из формулы (50) вытекает следующее значение для квадрата эксцентриситета вторичного зеркала ( $e_1^2=1$ ):

$$e_2^2 = (\beta + 1)^2 / (\beta - 1)^2. \quad (58)$$

Если  $\beta > 0$ , то  $e_2^2 > 1$ , т. е. вторичное зеркало в системе Кассегрена должно быть гиперболоидом. Наибольшее отклонение вторичного зеркала от ближайшей сферы сравнения на зоне  $\frac{h_2}{\sqrt{2}}$  может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{\delta}_0 \approx -\frac{h_2^4}{32r_2^3} e_2^2. \quad (59)$$

Если это значение сравнить с асферичностью главного зеркала, то можно убедиться в том, что в системах типов Кассегрена и Нэсмита асферичность гиперболического зеркала всегда меньше, чем у главного — параболического, что является существенным для любителя.

Даже в идеально изготовленной с оптической точки зрения сложной зеркальной системе возможно ухудшение качества изображения за счет комы, возникающей вследствие децентрировки, для случаев сдвига вторичного зеркала и его наклона относительно центра. Особенно это искажение свойственно любительским инструментам вследствие недостаточной жесткости их конструкций. Общее выражение для случая бокового сдвига зеркал представляет собой довольно сложную зависимость, определяемую главным образом квадратом относительного отверстия главного зеркала и увеличением на вторичном зеркале. Децентрировка приводит к появлению комы даже на оптической оси системы. Величина ее пропорциональна степени децентрировки. Внешне она аналогична внеосевой коме. Для случая сдвига вторичного зеркала кома выражена через расстояние между главным и кассегеновским фокусами. Эта ошибка проявляется гораздо слабее, чем кома от сдвига главного зеркала. Таким образом, требуемая точность, предъявляемая к центрировке, возрастает практически пропорционально квадрату относительного отверстия главного зеркала, т. е. несколько слабее, чем при изготовлении асферики.

Практически все это означает, что любителю при изготовлении главного зеркала лучше всего остановиться на таком относительном отверстии, которое не превышает 1 : 4, и применять в схеме по возможности большие увеличения на вторичном зеркале.

## ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### § 1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Процесс изготовления зеркальной оптической поверхности для любительского телескопа-рефлектора можно условно разделить на следующие три основных этапа: шлифование, полирование и одновременно проводимая операция контроля ее формы. Пожалуй, стоит выделить отдельно ряд дополнительных операций, которые используются для придания стеклянной заготовке заданной геометрической формы, например, кругление, сверление отверстия в главном зеркале, его облегчение и т. п.

В процессе грубого шлифования стеклянной заготовке сначала придают приблизительную форму поверхности, исходя из ее расчетного радиуса кривизны. В дальнейшем по мере использования все более мелких по размеру шлифующих материалов происходит сглаживание макронеровностей поверхности. После того как операция тонкого шлифования закончена, заготовка приобретает форму, близкую к желаемой: ее общая погрешность соизмерима с длиной волны видимого света, а высота микронеровностей не превышает нескольких микрометров.

Необходимая точность изготовления поверхности зеркала обеспечивается за счет полирования, ход которого постоянно контролируется в процессе испытания зеркала, при этом высота микронеровностей уменьшается приблизительно в тысячу раз.

Как будет показано ниже, в принципе процессы шлифования и полирования несложны. Также достаточно просто осуществляется операция контроля зеркальной оптической поверхности.

К сожалению, на практике это оказывается далеко не так. Дело в том, что заключительный и наиболее ответственный этап работы — полирование зависит от таких различных факторов, воздействие которых на характер работы трудно, а подчас и невозможно предугадать заранее. По-

этому приводимые в книге определенные рекомендации и советы, направленные на исправление или получение той или иной формы поверхности, все же нужно рассматривать скорее лишь как общие. Желательно, чтобы оптик-любитель был совершенно свободен от подгонки имеющейся поверхности к желаемой через какие-либо раз и навсегда установленные приемы и методы. В этом плане ему предоставляются очень широкие возможности для личного творчества.

Вместе с тем окончательный результат работы зависит еще и от ряда условий, соблюдение которых является обязательным. Изготовление оптических поверхностей высокого класса — дело, вообще говоря, очень деликатное. Тем не менее, можно быть уверенным, что тот любитель, который проникся горячим желанием довести работу до конца, несомненно добьется отличных результатов. Свидетельство тому — блестящие результаты многих любителей.

Изложение практических вопросов изготовления зеркальных оптических поверхностей мы начнем с описания характеристик стеклянных заготовок, используемых в качестве материала для любительских астрономических зеркал.

## § 2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

К материалам, используемым для изготовления астрономической оптики, предъявляется целый ряд специальных требований. К ним в первую очередь относится величина возникающих деформаций, связанных с изменением температуры окружающей среды, а также некоторые их механические свойства.

Любителю телескопостроения, безусловно, трудно надеяться приобрести стекло какой-то определенной марки. Однако в случае имеющегося выбора целесообразно руководствоваться следующими соображениями. Если материал обладает достаточно большой теплопроводностью  $\lambda$ , то при изменении температуры окружающей среды его геометрические размеры в целом будут соответствовать формуле

$$l_{t_1} = l_t [1 + \alpha (t_1 - t)], \quad (60)$$

где  $l$  — линейный размер,  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала,  $t_1$  и  $t$  — соответственно последующая и предыдущая температура окружающего воздуха. Размеры готового зеркала в этом случае будут приблизительно меняться пропорционально величине  $\alpha \Delta t$ , в том числе и его кривизна, однако форма поверхности остается прежней. Такому типу материалов соответствуют металлы, ко-

торые, правда, в настоящее время практически не используются в любительской практике.

Изготовление астрономической оптики из стеклянных дисков приводит к тому, что при охлаждении или нагревании наружного слоя зеркала, имеющем место как при его обработке, так и при использовании в готовом телескопе, возникает температурный перепад между центральным объемом стекла, дольше удерживающим первоначальную температуру, и наружными слоями. Это связано с низкой теплопроводностью стекла  $q$ , т. е. скоростью, с которой передается изменение температуры от точки к точке и которая определяется теплопроводностью  $\lambda$ , теплоемкостью  $C$  и плотностью  $d$  материала в соответствии с формулой (61)

$$q = \frac{\lambda}{C \cdot d}, \quad (61)$$

т. е. более предпочтительному материалу в применении к астрономическому зеркалу соответствует более высокий показатель теплопроводности  $q$ .

Образующиеся механические напряжения деформируют реальную поверхность зеркала самым непредвиденным образом, в результате чего изменяется не только ее кривизна, но и форма. Этот эффект, наиболее заметный для краевой части зеркала, быстрее воспринимающей температуру окружающей среды, был назван известным оптиком-астрономом Г. Ричи «эффектом края» зеркала. Наиболее употребительные в любительском телескопостроении сорта стекол типа так называемого иллюминаторного или оптического К8 страдают «эффектом края» в полной мере. Уменьшение толщины зеркала для его снижения не является выходом из положения из-за возникающих дополнительных трудностей, связанных с разгрузкой зеркала.

Другим решением задачи может быть применение материала с возможно меньшим коэффициентом линейного расширения. В самом деле, при  $\alpha = 0$  никакие перепады температуры окружающей среды не будут страшны материалу, так как он не будет на них реагировать. Д. Д. Максудов с учетом механических свойств материала для зеркала предложил характеризовать его качество с помощью обобщенного критерия  $\psi$ , который у нас принято называть *коэффициентом Максудова*,

$$\psi = \frac{E q}{\alpha} = \frac{E \lambda}{d C \alpha}, \quad (62)$$

где  $E$  — модуль упругости материала.

Материал	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\alpha \cdot 10^{-7}$ , 1/°C	$\lambda$ , кал/см·с·°C	$C$ , кал/г·°C	$q \cdot 10^{-4}$ , см <sup>2</sup> /с	$\frac{E}{d} \cdot 10^{-9}$ , см <sup>-1</sup>	$\psi/\psi_{K8}$	$\varphi/\varphi_{K8}$
K8	2,52	8230	70	0,0023	0,18	18,1	3,3	1,0	1,0
ЛК5	2,27	6980	34	0,0027	0,19	22,5	3,0	2,2	1,6
ЛК7	2,30	6930	41	0,0022	0,16	21,5	3,0	1,7	1,0
Пирекс 316	2,48	6685	31	0,0021	0,17	17,9	2,7	1,8	1,4
Кварц плавленный	2,21	7450	4	0,0032	0,165	32	3,4	28	2,0
Ситалл СО-115М	2,46	10 000	±1	0,0042	0,22	27,5	4,1	130	1,8

В табл. 10 приведены характеристики основных оптических материалов для астрономических зеркал [3].

Таким образом, более предпочтительному материалу соответствует более высокое значение  $\psi$ . С этих позиций долгое время на первом месте оставался плавленный кварц. К сожалению, сложность технологии его производства сильно ограничивает возможность его использования для изготовления зеркал любительских телескопов. В 1958 г. были получены отечественные стеклокристаллические материалы, названные по предложению профессора И. И. Китайгородского *ситаллами* (первая буква взята от стекла, окончание — от кристалла). Они имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения, хорошую химическую, механическую прочность. Твердость по сошлифовыванию (относительно стекла К8) в зависимости от марки ситалла составляет от 1,60 до 1,90. Наиболее распространенным в производстве является ситалл СО=115 М. Тем не менее изготовление небольших зеркал, обладающих высококачественной поверхностью, возможно и из более доступных марок стекол. Хорошо себя зарекомендовало в любительской практике так называемое иллюминаторное стекло, представляющее собой зеркальное стекло толщиной от 15 до 40 мм и диаметром до 315 мм. Наличие в материале пузырьков или оптических неоднородностей (свилей), более часто встречающихся в стеклах типа ЛК5, ЛК7, принципиального значения не имеет, так как свет не проходит

сквозь стекло зеркала, а лишь отражается от его поверхности.

В крайнем случае заготовку можно вырезать из листа толстого витринного стекла. Его желателно расположить на куске тонкой резиновой прокладки. В качестве рабочего инструмента — трубчатого сверла можно использовать подходящего размера консервную банку, кастрюлю с незавальцованным краем и т. п. К дну прикрепляется ручка, позволяющая вращать сверло попеременно то в одну, то в другую сторону. На режущей кромке сверла делаются треугольные прорезы. Однако нужно помнить, что шлифующее действие пропорционально площади соприкосновения рабочих граней сверла с абразивом. Поэтому слишком широкие вырезы у основания делать нецелесообразно. Можно вовсе обойтись без них, что многие и делают. Тогда в процессе работы приходится по мере стихания громкого хруста абразива периодически приподнимать сверло на несколько миллиметров, чтобы дать доступ свежей порции абразивной кашицы в кольцевую канавку. Аналогичным образом вырезается и центральное отверстие в главном зеркале телескопа системы Кассегрена.

На начальном этапе работы необходимо предотвратить радиальные смещения сверла относительно своей оси. Для этого можно на обезжиренной поверхности заготовки с помощью наклеенной смолы, состав которой описан в § 6, укрепить фиксирующие планки в форме треугольника или просто под прямым углом. В последнем случае, правда, придется применять некоторое усилие для прижима сверла в направлении вершины угла. Через 20—30 мин сверления с помощью достаточно крупнозернистого абразива с добавкой некоторого количества воды получится ровная кольцевая канавка глубиной 2—4 мм, после чего планки, фиксирующие сверло, можно убрать.

Когда остается удалить слой стекла толщиной около 3 мм, нужно быть более осторожным, не применять слишком сильный нажим и резкие движения. И все же, как бы мы ни старались, на тыльной поверхности заготовки обычно образуются грубые сколы стекла, которые не всегда можно убрать даже с помощью большой фаски. Поэтому на заключительном этапе работы необходимо заранее принять соответствующие меры предосторожности. Для получения ровного среза целесообразно к задней поверхности заготовки с помощью смолы наклеить несколько большее по размеру защитное стекло. Материалом может служить старая фотопластинка, подходящий кусок оконного стекла и т. п. Фор-

мы он может быть самой произвольной. Достаточно лишь осторожно обломать его острые выступающие края. Наклейку удобно проводить в следующей последовательности. Вырезаемую из стекла заготовку нужно нагреть до температуры плавления смолы. Больше всего для этой цели подходит электроплитка с закрытой спиралью, которая обеспечит равномерный нагрев всей массы стекла. Стекло лучше положить не прямо на плитку, а на асбестовую прокладку задней стороной вверх. Когда стекло нагреется до температуры расплавления смолы, необходимо ее кусочком образовать смоляное кольцо достаточной ширины в месте ожидаемого выхода сверла из стекла. Затем осторожно наложить защитный кусок стекла. Прикладывая достаточное усилие, постараемся по возможности плотнее сблизить склеиваемые части. Слой смолы при этом приобретает светло-коричневый оттенок. После этого нужно склеенному блоку дать возможность медленно остыть, не снимая его с электроплитки. В противном случае стекло может лопнуть. Следует иметь в виду, что всю работу необходимо производить вдали от токов воздуха. В связи с этим остывающий склеенный блок не будет лишним накрыть куском материи. Затем заготовка дорезается. Окончание работы можно определить по появлению светлого ободка в слое смолы. После повторного нагрева вырезанная заготовка освобождается от предохраняющих ее частей и промывается в керосине или бензине.

Важно отметить, что стекло заготовки любой марки не должно иметь внутренних напряжений и должно быть хорошо отожжено. В противном случае после приобретения всей массой стекла температуры окружающего воздуха, отличной от той, в которой производилось его изготовление, форма зеркала может иметь всевозможные нерегулярные искажения. Поэтому для наших целей совершенно не годятся закаленные марки стекла. На них, как правило, ставится метка типа «закалено» или «сталинит».

Непременным условием получения расчетной фигуры зеркала является его достаточная толщина. Совершенно понятно, что слишком тонкая заготовка будет прогибаться как под действием собственного веса, так и в процессе механической обработки, что в дальнейшем вызовет вредные искажения дифракционной картины изображения звезды. Они проявляются в виде всевозможных разрывов и сгущений света в кольцах или в виде центрального ядрышка с хвостами. Поэтому для того, чтобы деформации поверхности зеркала оказались меньше  $\lambda/8$  и искажения дифракционного

$D$ , мм	$b_{\min}$ , мм	$\left(\frac{b}{D}\right)_{\min}$	$D$ , мм	$b_{\min}$ , мм	$\left(\frac{b}{D}\right)_{\min}$
110	8,8	1:12,5	360	93,9	1:3,8
165	19,7	1:8,4	400	116	1:3,5
215	33,5	1:6,4	450	147	1:3,1
265	50,9	1:5,2	600	260	1:2,3
315	71,9	1:4,4			

изображения стали незаметными для глаза, приходится зеркало соответствующим образом разгружать. Как видно из табл. 10, отношение  $E/d$ , характеризующее собой механические свойства заготовки различных материалов, приблизительно одинаково. (Строго говоря, заготовки из ситалла находятся в более выгодном положении.) Можно составить табл. 11, выражающую минимальную толщину  $b_{\min}$  и относительную толщину  $(b/D)_{\min}$  наиболее распространенного материала К8 для различных диаметров  $D$  зеркала, разгруженного на три точки [2].

Как видно из таблицы, разгрузка больших зеркал на три точки приводит к необходимости иметь непомерно большую толщину зеркала

$$b_{3, \min} \approx \frac{D^2}{1380}. \quad (63)$$

В формуле (63) порядок величины коэффициента в знаменателе соответствует значениям  $b$  и  $D$ , выраженным в миллиметрах. Естественно, что более тонкие заготовки приходится разгружать на большее число точек. Формулы для вычислений следующие:

$$b_{6, \min} \approx \frac{D^2}{4120}, \quad (64)$$

$$b_{9, \min} \approx \frac{D^2}{4950}, \quad (65)$$

$$b_{15, \min} \approx \frac{D^2}{10\,690}, \quad (66)$$

где индекс внизу обозначает число точек разгрузки. Замечание к формуле (63) справедливо и для этих случаев. Необходимо отметить, что приведенные здесь соотношения толщин и диаметров зеркал являются, пожалуй, минимальными. Поэтому, если мы хотим иметь дополнительный запас жесткости для сопротивления прогибу зеркала при его

механической обработке, его толщину желательно увеличить на 30—50 %.

Несколько слов о распределении точек опор при разгрузке зеркала. Если оно лежит на трех или шести точках (три качающихся коромысла), когда все опоры расположены равномерно по одной окружности, радиус последней должен составлять  $(0,7 \dots 0,8) R$ , где  $R$  — радиус зеркала. При разгрузке по двум зонам, например на девять точек (три

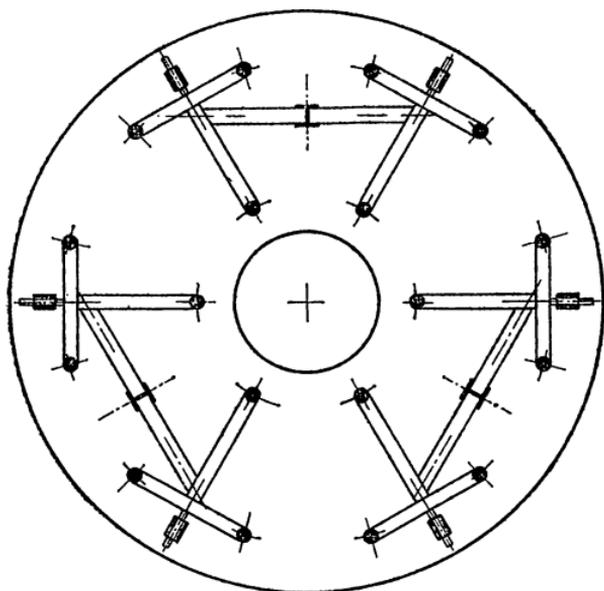


Рис. 28. Вариант разгрузки зеркала на 18 точек (вид снизу)

качающихся вокруг своего центра тяжести треугольника), их радиусы должны составлять  $0,36 R$  и  $(0,82 \dots 0,85) R$ . При этом стрелка кривизны и центральное отверстие для приведенных выше значений  $R$  во внимание не принимались. Эти виды разгрузок хорошо освоены любителями. Более сложными являются двухъярусные разгрузки на 12, 15, 18 точек, которые можно использовать для относительно тонких и крупных по размеру зеркал. На рис. 28 приведена разгрузочная система на 18 точек, использовавшаяся для 600-миллиметрового зеркала автора.

Другая возможность уменьшения величины деформации зеркальной поверхности состоит в изменении (модифицировании) геометрии ее профиля, суть которого заключается в том, что часть стекла удаляется в тех местах, где внутренние напряжения, противостоящие деформации поверхности, минимальны. Иначе говоря, в местах соприкос-

новения с задними опорами, т. е. там, где это важно, облегченное зеркало сохраняет необходимое отношение диаметра к толщине. Здесь жесткость, таким образом, еще достаточно велика по сравнению с равномерным по толщине зеркалом того же веса. В то же время зеркало обладает малой жесткостью там, где контактных сил нет и где достаточная жесткость и подходящая форма нужны только для того, чтобы противостоять прогибам самого зеркала под действием силы тяжести. Таким образом, этот метод позволяет использовать относительно более тонкие и легкие заготовки, что приобретает исключительно большое значение при изготовлении крупных любительских зеркал.

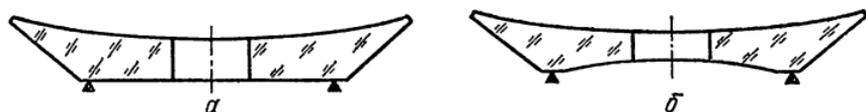


Рис. 29. Профиль облегченного зеркала: удалено 30 % материала (а), удалено 50 % материала (б)

Расчеты показывают, что удаление стекла только с задней стороны на внешней зоне заготовки (рис. 29, а) снижает ее вес приблизительно на 25—30 %, что приводит к заметному уменьшению вредных деформаций. Это связано с тем, что деформации под действием силы тяжести примерно обратно пропорциональны квадрату толщины и прямо пропорциональны четвертой степени увеличения расстояния между точками опоры. Если три точки опоры находятся где-то на полпути между центром и краем зеркала (точное положение можно найти только после дополнительных расчетов), то оказывается возможным разгрузить без заметного вреда для качества изображения зеркало диаметром 500 мм при толщине 50 мм. Хотя при механической обработке возникшие искажения окажутся слишком велики для зеркала такого размера, рассмотренный метод вполне годится для зеркал 200. . . 400 мм.

Еще более выгодной в смысле малости деформаций поверхности является форма зеркала, профиль которой изображен на рис. 29, б. Задние опоры находятся где-то между периферией и центральным отверстием, а толщина зеркала уменьшается как к наружному, так и к внутреннему краям, при этом вес его уменьшается более чем на 50 %.

Таким образом, несмотря на то, что процесс облегчения зеркала связан с определенными затратами, при изготовлении крупной любительской астрономической оптики он представляется, пожалуй, наиболее разумным.

В свете этих рассуждений становится понятно, почему некоторые любители с успехом применяют в качестве заготовки под будущее зеркало конденсорную линзу. Нужное углубление вышлифовывается на ее плоской стороне, а крепление осуществляется за центральное отверстие. Одновременно решается вопрос о боковой разгрузке зеркала, так как оказываются излишними дополнительные боковые упоры. Вообще следует иметь в виду, что при разгрузке зеркал с отверстием в центре можно применять несколько более тонкие заготовки или при тех же соотношениях диаметра к толщине обеспечить им больший запас жесткости.

И еще одно замечание. Иногда советуют, в случае, если толщина заготовки недостаточна, склеить силикатным клеем несколько дисков одинакового диаметра, например, вырезанных из витринного стекла. Однако утверждать, что температурный коэффициент расширения всех кусков в точности одинаков, у нас нет никакого основания, так как отжиг такого стекла не всегда бывает удовлетворительным. Ясно, что в результате подобного эксперимента трудно надеяться получить однородную по своим показателям массу стекла. Поэтому будет, пожалуй, правильно не надеяться на удачу, а использовать для изготовления заготовку из специального оптического стекла, которую можно попытаться заказать на заводах оптического стекла через местные отделения ВАГО.

### § 3. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА СТЕКЛА

Наиболее полно процесс шлифования раскрыт советскими учеными И. В. Гребенщиковым, Н. Н. Качаловым и др. Суть его заключается в перекачивании зерен абразива

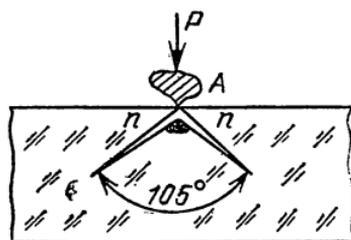


Рис. 30. Характер получающегося разлома от воздействия на стекло единичного абразивного зерна

между шлифовальником и стеклом. Благодаря неправильности формы зерен они производят ряд следующих друг за другом ударов, в результате которых в толще стекла образуется система микроскопических выколов и трещин. На рис. 30 показан характер получающегося разлома от воз-

действия на стекло единичного абразивного зерна  $A$ , нагруженного силой  $P$ . Эту работу можно сравнить с раскалыванием льда. В месте удара образуется конусообразная зона с расходящимися в разные стороны трещинами. Центр ее представляет собой бесформенную лунку белого цвета, состоящую из спрессованных ударом мелких осколков. Под действием влаги вдоль трещины образуется защитная окисная пленка толщиной около  $70 \text{ \AA}$  ( $0,007 \text{ мкм}$ ), производящая расклинивающее действие и стремящаяся оторвать объемы стекла  $n-n$  от основной его массы.

Глубина распространения трещины зависит от природы той жидкости, в которой происходит возникновение трещины. Максимальная глубина ее распространения наблюдается при смачивании поверхности стекла водой. Образовавшиеся трещины пересекаются между собой, и при повторном воздействии абразивных зерен получают выколки. Таким образом, разрушенный шлифовкой слой стекла состоит из наружного рельефного, образованного выступами и раковинистыми разломами, и внутреннего трещиноватого, представляющего собой продолжение трещин в глубь стекла. Изучение шлифованных поверхностей показало, что отношение глубины разрушенного и трещиноватого слоев для различных марок абразива остается постоянным —  $4 : 3$ .

Экспериментально было установлено, что глубина выколок не зависит от приложенного давления и относительной скорости движения шлифовальника. Из числа факторов, влияющих на величину рельефного матового слоя, особенно большое значение имеет размер зерна и его твердость, а меньшее — твердость материала шлифовальника. Весьма существенное значение имеют и физико-механические свойства обрабатываемого материала.

Используемые абразивные материалы бывают естественного и искусственного происхождения. К естественным абразивам относятся алмаз, корунд, наждак, кварцевый песок, к искусственным абразивам — алмаз синтетический, карборунд, электрокорунд, карбид бора, эльбор. В смысле доступности для любительских целей наибольшее применение находят карборунд и электрокорунд. Карборунд — карбид кремния  $\text{SiC}$ . Получается из чистого кварцевого песка и кокса электроплавкой при температуре  $2500^\circ \text{C}$ . Этот материал представляет собой кристаллический порошок зеленого (КЗ) или черного (КЧ) цвета. Наивысшая абразивная способность у порошка марки КЗ. Электрокорунд — кристаллическая окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Получается

Таблица 12

Абразив	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость	
		по шкале Мооса	абразивная относительная
Кварцевый песок	2,7	7	0,02—0,03
Наждак	4,0	8	0,03—0,08
Электрокорунд	3,2—4,0	9	0,15—0,25
Карборунд	3,1—3,2	9,6	0,25—0,45
Карбид бора	2,5	9,85	0,5—0,6
Алмаз	3,5	10	1,0

из алюминиевых руд электроплавкой при температуре около 2000 °С. Мелкозернистая масса белого, реже — розового или черного цвета с содержанием (по массе) окиси алюминия от 90 до 99 %. В табл. 12 приводятся основные сведения об абразивных материалах.

Применяемые для шлифования абразивные материалы имеют определенный номер зернистости (табл. 13). В настоящее время при маркировке шлифзерна и шлифпорошка за единицу измерения принята сотая доля миллиметра. Например, номер зернистости 10 означает, что размер зерна основной фракции составляет около 0,10 мм (100 мкм). При маркировке микропорошков и тонких микропорошков в обозначение вводят букву М. Следующая за ней цифра показывает размер зерна основной фракции в микрометрах. В некоторых более ранних пособиях по любительскому телескопостроению шлифзерно и шлифпорошки обозначались номерами, соответствовавшими английской классификации. Микропорошки и тонкие микропорошки назывались «минутниками» и маркировались по времени их отстоя (в минутах) в столбе воды высотой 1 м. Поэтому в табл. 13 приводятся также и старые обозначения.

Необходимые для работы абразивные материалы можно приобрести, помимо ближайших отделений ВАГО по любительскому телескопостроению, в оптических или зеркальных мастерских, а также на металлообрабатывающих заводах или на специализированных предприятиях, производящих шлифующий инструмент.

Конечно, совершенно необязательно иметь весь набор номеров абразивов, указанных в табл. 13. Важно лишь, чтобы размер зерна изменялся от номера к номеру прибли-

группа материала	Номер зернистости	Размер основной фракции, мкм	Старое обозначение	Примечание
Шлифзерно	25	315—250	60	Грубое шлифование, обдирка зеркала
	20	250—200	70	
	16	200—160	80	
Шлифпорошки	12	160—125	100	Среднее шлифование, вырезание отверстий в зеркале, снятие фасок
	10	125—100	120	
	8	100—80	150	
	6	80—63	180	
	5	63—50	230	
	4	50—40	280	
3	40—28	320		
Микропорошки	M40	40—28	10	Тонкое шлифование, получение расчётных значений формы поверхностей, чистовая обработка фасок, торцевых поверхностей и др.
	M28	28—20	15	
	M20	20—14	30	
	M14	14—10	60	
Тонкие микропорошки	M10	10—7	120	
	M7	7—5	240	
	M5	5—3	480	

зительно в 2—2,5 раза. Обычно для этого бывает достаточно пяти номеров абразива. Использование более крутой «лесенки» может привести к неоправданной потере рабочего времени, так как последующий номер абразива должен не только исправить отдельные погрешности формы поверхности и уменьшить величину микронеровностей поверхностного слоя, но и сошлифовать большую часть оставшегося от предыдущего номера трещиноватого слоя. В связи с тем, что начинающий любитель определяет продолжительность времени на обработку тем или иным номером абразива по часам, не до конца отшлифованная поверхность потребует чрезмерного увеличения времени на полировку, что нежелательно во всех случаях, а может и вовсе до конца не отполироваться. Оставшаяся легкая матовость очень вредна для работы телескопа, так как приводит к снижению контраста изображения протяженных объектов и падению видимости слабых звезд.

Согласно табл. 12 наилучшим абразивным материалом для грубого и среднего шлифования является карборунд

(зеленого цвета) благодаря его сравнительно большой доступности и значительной относительной твердости. Острые кромки его зерен быстрее выкалывают стекло, сохраняя высокую режущую способность даже после своего частичного раздробления. Для тонкого шлифования лучше применять электрокорунд или наждак, более мягкие и округлые зерна которых способствуют получению достаточно однородной рельефной поверхности.

Если абразивные порошки в свободном состоянии достать не удастся, то их можно приготовить из различных абразивосодержащих материалов — наждачной бумаги, абразивных кругов, брусков и т. д. путем разрушения их связующей основы и последующей сортировки через сита. Разделение микропорошка и тонкого микропорошка обеспечивается водным разделением — гидроклассификацией или отмучиванием. Подробно о способах «домашнего» приготовления абразивов рассказывалось во многих книгах [4], [10], поэтому нет необходимости на этом останавливаться.

Лучше, конечно, достать готовые абразивы, так как они отвечают более строгим требованиям к одной из основных характеристик порошков — процентному содержанию основной фракции. Например, в микропорошке М14 основная фракция зерен размером 14 мкм должна составлять не менее 55 %. Если есть возможность, то шлифовальные порошки лучше приобрести с запасом: несколько килограммов наиболее крупных номеров и по 100—200 граммов «минутников», чтобы быть совершенно спокойным на этот счет и все свое внимание сосредоточить на самом процессе изготовления оптики, тем более что стоимость их невысока и составляет в среднем 40—50 коп. за 1 кг.

#### § 4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Прежде чем приступить к обработке рабочей поверхности зеркала, необходимо провести ряд подготовительных операций для придания ему необходимой внешней «отделки». Эта работа важна еще и в том отношении, что малоопытный любитель познает особенности шлифовального процесса на менее ответственных операциях, приобретая тем самым необходимую сноровку.

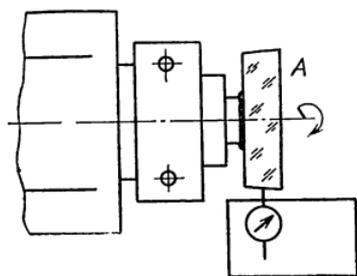
Если заготовка будущего зеркала представляет собой иллюминаторный диск, то она имеет достаточно правильную цилиндрическую форму, обе ее поверхности плоские и параллельны между собой. Тогда подготовительные операции

будут состоять в снабжении диска фасками и в обработке его задней стороны.

Вырезанная из целого куска стекла заготовка требует, как правило, дополнительной механической обработки боковой цилиндрической поверхности, особенно если предыдущая операция выполнялась с помощью тонкостенного трубчатого сверла. Прежде всего ее стенки имеют грубоматовую поверхность. Кроме того, вследствие постепенного износа и возникающих деформаций сверло, а вместе с ним и боковая поверхность заготовки приобретают слегка коническую форму.

Обработку на «цилиндричность» удобно проводить, если в распоряжении любителя имеется токарный станок. Для этого заготовка приклеивается с помощью наклейной смолы к торцу прочного цилиндра. Зажав его в патрон станка, производим центрировку заготовки относительно оси вращения, пока смола не затвердела. Для этого можно воспользоваться индикатором часового типа, укрепив его на суппорте станка, как показано на рис. 31. Вращая рукой патрон, определяем величину и направление биения. Практика очень быстро подскажет нам, в каком направлении следует действовать, чтобы его устранить.

Рис. 31 Обработка боковой грани заготовки в патроне токарного станка: А — заготовка



Дадим смоле загустеть, сняв на это время заготовку со станка и придав ей горизонтальное положение. После затвердевания произведем шлифовку ее боковой стороны на самых малых оборотах станка с помощью абразивного бруска, обильно добавляя воду. Эту часть работы, занимающую не более 10—15 мин, удобно проводить с помощником. В крайнем случае можно обойтись и без станка, произведя ручную сошлифовывание выступающего края на куске толстого стекла или на металлической плите.

Литые заготовки выделяются характерным полированным блеском всех своих сторон, в том числе боковых, и часто бывают с одного бока толще, чем с другого. В этом случае необходимо предварительно «убрать» ее косиную. Поэтому нашу работу мы начнем с того, что промеряем штанген-

циркулем в нескольких точках толщину заготовки по ее краю. Если разнотолщинность не превышает нескольких десятых долей миллиметра, то дополнительной шлифовки не потребуется и можно будет сразу перейти к последующим операциям. В противном случае мы легко сможем выявить наиболее толстый край. Отметим это место, слегка процарапав небольшую риску на торцевой поверхности заготовки с помощью стеклореза или алмазного карандаша. Чтобы риска была более заметной, оттеним ее обычным карандашом. Тогда мы можем быть уверены, что она не смажется в процессе работы.

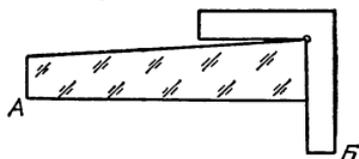


Рис. 32. Определение выступающей части диска: А — заготовка, Б — угольник

Затем нужно определить, какая из двух плоских поверхностей составляет с боковой поверхностью угол, меньший прямого. Для этого удобно воспользоваться угольником, угол между сторонами которого составляет  $90^\circ$  (рис. 32). Зазор определяется по биению, возникающему при покачивании угольника.

Удалим выступающую часть диска. Для любителя наиболее доступным способом является ее сошлифовывание на плоской металлической плите, желательно круглого очертания. Осуществляя сильный нажим на край, который толще, будем делать круговые движения рукой, добиваясь значительного выноса более тонкого края за пределы плиты.

Совершенно необходимая подготовительная операция для любого попавшего к нам диска состоит в снабжении его фасками. Назначение фасок состоит в том, чтобы предот-



Рис. 33. Разновидности фасок, придаваемых зеркалам

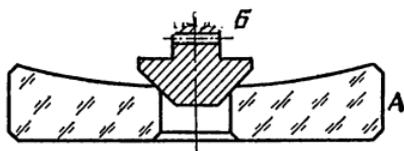
вратить выкалывание острых кромок стекла как в процессе его обработки, так и при дальнейшей работе в телескопе. Фаски бывают либо в виде скошенного края (рис. 33, а), либо, когда кривизна поверхности велика, — в виде плоского ободка на лицевой поверхности зеркала (рис. 33, б). В любительских условиях, как правило, используются обычные

косые фаски, изображенные на рис. 33, а. Снять фаску у заготовок небольшого размера (до 200 мм) удастся, просто держа их в руках и сошлифовывая острую кромку на куске стекла или металлической плите. Разведя шлифпорошок водой в густую кашицу, стирают край диска, постепенно проворачивая его в руке и придавая ему наклон около  $45^\circ$ .

Обработку краев более крупных дисков обычно осуществляют с помощью карборундового бруска, либо закрепив неподвижно сам диск и обходя при этом вокруг него, либо заставив его принудительно вращаться. Тогда всю работу можно делать сидя. Так или иначе надо стараться, чтобы фаска получилась везде одинаковой ширины (1—2 мм) и имела наклон около  $45^\circ$ . Фаску на отверстию, высверленном в центре кассегреневского зеркала, легко сделать с помощью специально для этого выточенного на токарном станке металлического конуса. Ручкой для вращения его можно в этом случае не снабжать (рис. 34).

Чтобы на зеркало в дальнейшем было «приятно» смотреть, все фаски должны быть выполнены очень аккуратно. Для этого в процессе тонкого шлифования самого зеркала их дорабатывают «минутниками» с помощью кусочка стекла.

Рис. 34. Обработка фаски на отверстию, высверленном в центре кассегреневского зеркала: А — заготовка, Б — инструмент



Обработка задней поверхности проводится с целью удаления поверхностного слоя стекла, который обычно оказывает вредное действие из-за имеющихся в нем напряжений. Заготовку можно положить на резиновую прокладку. Никакого разгрузочного приспособления для этого не требуется, она удерживается силами трения. Шлифование производится с помощью вспомогательного куска стекла шлифпорошком или микропорошком в зависимости от первоначального микрорельефа поверхности. Форма штриха может быть произвольной.

Тонкое шлифование задней поверхности диска обычно выполняют после грубой обработки передней поверхности, чтобы исключить возможность появления больших царапин на уже обработанной задней поверхности. Тонкое шлифование желательно завершить полированием, что ставит обе поверхности зеркала в одинаковые условия.

Обработку боковой грани можно закончить микропорошком М40 — М20.

## § 5. ШЛИФОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА

В современном оптическом производстве обработка стекла, включающая грубое и тонкое шлифование, производится с помощью металлических инструментов — шлифовальников, которым путем механической обработки на станке заранее придается рассчитанная кривизна поверхности определенного знака: для обработки вогнутой поверхности зеркала (или линзы, мениска) — выпуклая — «гриб», для обработки выпуклой поверхности — вогнутая — «чашка» на языке оптиков. У крупногабаритной оптики удаление больших объемов стекла осуществляется предварительной обработкой алмазным инструментом.

В любительской практике обычно приходится использовать более доступные приемы, также неизменно приводящие к успеху, но требующие большей затраты труда и сил.

До последнего времени наиболее популярным оставался метод, основанный на взаимном притире двух дисков одинакового размера. При этом взаимная кривизна поверхности получается за счет перераспределения сил давления по площади соприкасающихся дисков при смещении одного относительно другого (рис. 35). Основанный на этом принцип шлифования вогнутого зеркала очень подробно изложен в более ранней литературе [4], и поэтому мы его касаться не будем. Обладая очевидной простотой и, что очень важно, возможностью почти автоматического достижения правильной сферической поверхности при соблюдении определенных условий шлифовального процесса, данный метод обладает некоторыми недостатками. Правда, для зеркал небольшого и среднего размеров они носят непринципиальный характер. Прежде всего, если шлифование ведется «правильным» классическим способом, т. е. когда центр зеркала

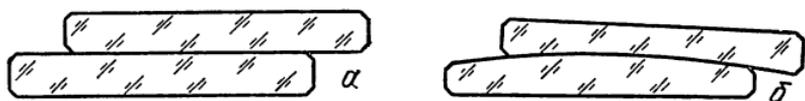


Рис. 35. Получение взаимной кривизны двух поверхностей за счет перераспределения сил давления: перед началом работы (а), после некоторого времени шлифования (б)

(оно лежит сверху шлифовальника) при своем движении совмещается с центром шлифовальника, а длина штриха составляет от  $1/4$  до  $1/3$  радиуса зеркала в каждую сторону, сошлифовывание стекла начинается сразу по всей поверхности зеркала. В результате, когда стрелка кривизны по-

верхности нашего зеркала достигает расчетной величины, его толщина на краю становится заметно меньше первоначальной, что, понятно, нежелательно. Изменение характера движений полностью не спасает положения и трудоемкость работы остается значительной. У более крупных зеркал при таком режиме обработки начинает проявляться эффект «свисания» края, в результате которого сильнее срабатывается край шлифовальника и центральная часть зеркала. Вследствие этого кривизна центральной части превышает остальную. К этому можно добавить также и то, что еще имеющийся, к сожалению, известный дефицит стеклянных заготовок заставляет более экономно подходить к их расходованию.

Чтобы ускорить процесс грубого шлифования, в современной любительской практике применяется способ обработки кольцом, предложенный известным любителем телескопостроения А. С. Фоминым [6]. Металлическое кольцо, в качестве которого можно использовать отрезок толсто-стенной трубы, должно иметь наружный диаметр, равный  $1/3 \div 1/2$  поперечника главного зеркала. Толщина стенки кольца должна быть приблизительно в 8—10 раз меньше его диаметра, а длина отрезка трубы составляет около 5 см. Для удобства работы к верхней части кольца полезно прикрепить ручку или же на токарном станке сделать на его стенке широкую фаску под углом  $45^\circ$ .

Кольцо нужно двигать по диаметру зеркала таким образом, чтобы при вращении вокруг его оси и одновременно вокруг центра зеркала оно не выходило за пределы заготовки (рис. 36). Стрелками на рисунке показано направление движения кольца при шлифовании. Само собой разумеется, что вместо того, чтобы вращать кольцо вокруг центра заготовки, можно придать вращение самой заготовке.

Если вместо кольца использовать сплошной диск приблизительно таких же размеров, а именно:  $1/3 \div 1/2$  диаметра главного зеркала, то тот же результат можно получить гораздо быстрее [11]. Это объясняется тем, что скорость шлифования при прочих равных условиях пропорциональна

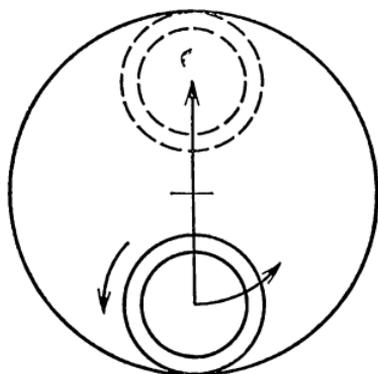


Рис. 36. Направление движения кольца при вышлифовывании углубления в центре зеркала

количеству одновременно работающих зерен абразива. В качестве материала для шлифовальника удобнее всего использовать металл (чугун, латунь) в силу его высокой твердости, в результате чего толщина его не намного изменяется в процессе обработки. Несколько иначе обстоит дело при использовании более доступного стеклянного инструмента. Если известна его твердость на сошлифовывание —  $\varphi$  по отношению к материалу будущего зеркала (см. табл. 10), то величина  $\Delta h$ , на которую уменьшится толщина шлифовальника, станет уже заметной. Ее можно приблизительно оценить, исходя из общего объема стекла  $V$ , подлежащего удалению у заготовки,

$$V \approx \pi \frac{D^2}{8} x, \quad (67)$$

где  $x$  — стрелка кривизны изготавливаемого зеркала,  $D$  — его диаметр.

Величина  $\Delta h$  будет равна

$$\Delta h = \frac{V}{\pi R^2 \varphi} = \frac{D^2 x}{8 R^2 \varphi}, \quad (68)$$

где  $R$  — полудиаметр шлифовальника.

Можно пойти по другому пути и обработку зеркала проводить последовательно несколькими дисками небольшой толщины, как поступил автор при изготовлении 400-миллиметрового зеркала. Для его обдирки были использованы несколько дисков диаметром 150 мм и толщиной 7 мм. Плоская сторона каждого нового диска-шлифовальника сравнительно быстро приобретает уже имеющуюся кривизну поверхности и продолжает углублять центр зеркала.

Принцип шлифования аналогичен методу обработки кольцом. Она проводится в положении «зеркало внизу», т. е. по находящемуся на разгрузочном приспособлении зеркалу перемещается шлифовальник. Характер движений, которые придется совершать мастеру в процессе шлифования и полирования зеркала, в большой мере определяются применяемым способом обработки. Здесь имеется в виду различие между чисто ручным способом и частично использующим машинные методы обработки. На этом хочется остановиться чуть более подробно. Так, в литературе по любительскому телескопостроению часто можно встретить рекомендации для начинающего любителя, в которых советуется приступать к изготовлению зеркала с создания несложных по конструкции шлифующе-полирующих устройств. Хотя сами по себе они и значительно сокращают

время изготовления оптики и облегчают условия труда, автор считает, что такой подход нельзя считать абсолютно верным. Для того чтобы полнее понять технику шлифования и полирования оптических поверхностей, свое первое зеркало любителю было бы лучше всего обработать более простым способом «по старинке», т. е. так, как описано в книге М. С. Навашина (Телескоп астронома-любителя.— 3-е изд.— М.: Наука, 1975, 432 с.), если, конечно, есть возможность пожертвовать одним из дисков, используя его под шлифовальник. Этот метод в сочетании с одновременной обработкой двух одинаковых стеклянных дисков дает очень наглядное представление о всех особенностях изготовления зеркала. Немаловажным, пожалуй, является также и то, что любитель, приступая к изготовлению оптики для своего первого телескопа, выступает здесь скорее только в роли любителя астрономии, нежели любителя-оптика. Им руководит одно желание: поскорее довести телескоп до такого состояния, когда в него можно наблюдать небесные светила. Небольшой же телескоп с диаметром главного зеркала 100—150 мм может изготовить практически каждый и не прибегая к особым ухищрениям при изготовлении оптики.

В то же время, принимая во внимание естественное желание более опытного мастера предоставить себе более комфортные условия при изготовлении относительно крупных зеркал, становится очевидным, что без создания известных механических устройств, могущих воспроизводить некоторые характерные и наиболее простые движения, которые совершает мастер в процессе ручной работы, уже не обойтись. В этом смысле вполне достаточно бывает заставить заготовку вращаться вокруг своей оси совместно с разгрузочными механизмами, на которые она опирается. Именно по этому типу был изготовлен несложный обрабатывающий станок, на котором автор изготавливал зеркало диаметром 600 мм. Его вращательное движение обеспечивалось от электродвигателя со ступенчатым редуктором. При массе всего нижнего звена около 50 кг вполне достаточной оказалась мощность 400 Вт.

Другой вид движения — возвратно-поступательное движение шлифовальника, может выполнять сам мастер, при этом вращение шлифовальника происходит само по себе за счет разностей линейных скоростей изделия и шлифовальника на разных зонах при смещении шлифовальника. Число возвратно-поступательных движений, приходящихся на один оборот заготовки, относительно изделия не должно быть целым. В противном случае возникнет астиг-

матизм. Такого рода механизация, кстати, применяется и в настоящее время на некоторых предприятиях оптико-механической промышленности.

Можно пойти по более сложному пути и попытаться полностью механизировать операции по обработке зеркала. Здесь открывается очень широкий простор для творчества. Однако в этом случае любителю придется столкнуться с конструированием и практическим исполнением довольно сложных кинематических схем.

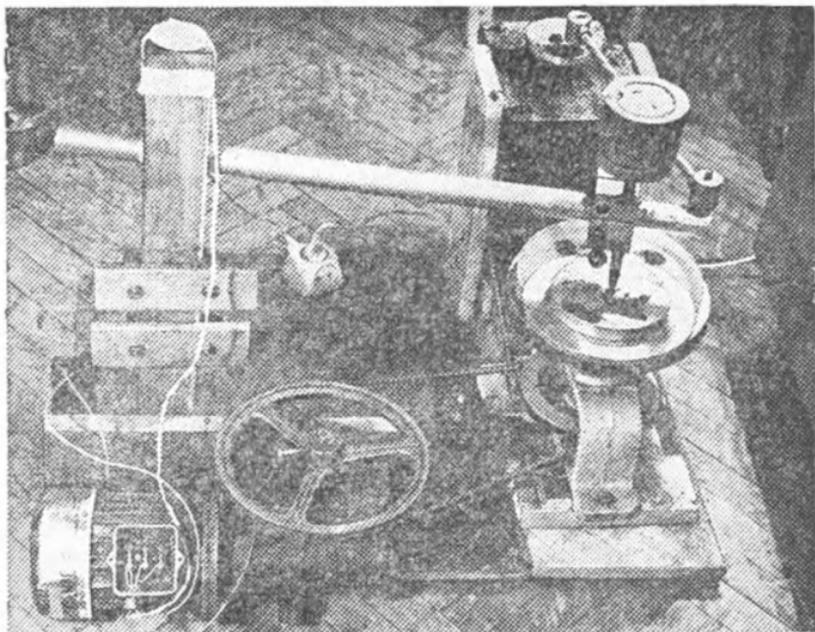


Рис. 37. Общий вид самодельного шлифовально-полировального станка

Примером может служить самодельный шлифовально-полировальный станок, изготовленный московским любителем Е. Е. Андреевым, общий вид которого приведен на рис. 37. Он состоит из следующих основных узлов:

- мотора редуктора мощностью 180 Вт и числом оборотов на выходе  $\sim 10$  об/мин;

- вертикального вала (шпинделя), закрепленного в подшипниках, на который насажен трехручьевого шкив; верхний конец вала снабжен резьбой для крепления инструмента или детали;

- кривошипно-шатунного механизма, основой которого служит вертикальный вал, закрепленный в подшипниках, на нижнем конце которого закреплен шкив, на верхнем — собственно регулируемый кривошип;

— поводка, состоящего из отрезка дюралюминиевой трубы, закрепленной в подвеске переднего моста автомобиля «Москвич», диаметр трубы 30 мм, длина 700 мм;

— каретки — стального бруска, закрепляемого на поводке и служащего для передачи возвратно-поступательных движений, создаваемых кривошипно-шатунным механизмом, на обрабатывающий инструмент через шпильку с шаровой пяткой.

Станок собран на деревянном основании размером 600 × 700 мм. Мотор с редуктором закреплен на деревянном бруске, связанном с основанием станка с помощью болтов. К бруску прикреплена вертикальная стойка, на которой установлена подвеска с поводком станка. Кривошип состоит из двух дисков (рис. 38): нижний, диаметром 100 мм,

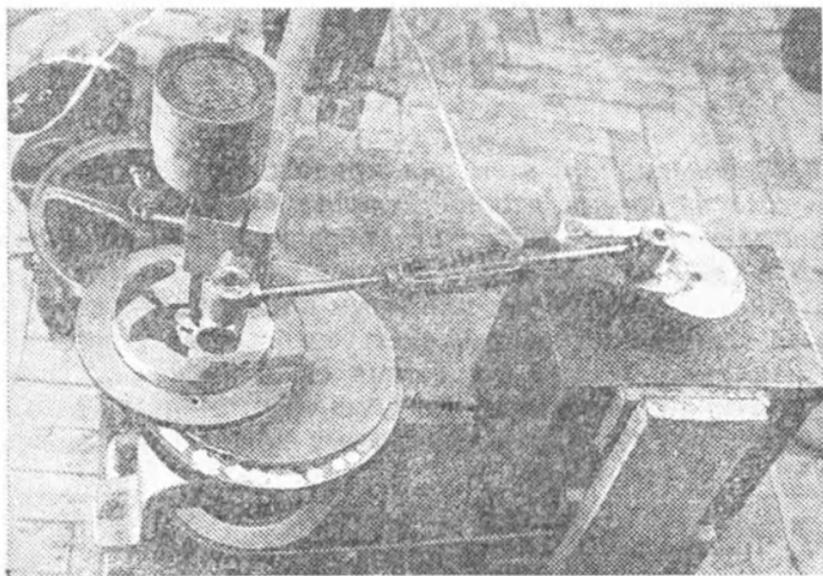


Рис. 38. Кривошипно-шатунный механизм

имеет отверстие в центре для соединения с валом и отверстие с резьбой под болт в 30 мм от центра, которым крепится верхний диск диаметром 65 мм. Меняя расстояние от центра вращения нижнего диска до шипа (пальца), имеющегося на верхнем диске, можно регулировать размах качания поводка. Поводок соединен с кривошипом посредством тяги, длина которой может изменяться с помощью стяжки.

Кинематика привода станка следующая. Верхний ручей шкива шпинделя (рис. 39) связан со шкивом кривошип-

но-шатунного механизма ремнем и передает ему вращение с соотношением  $1 : 1,37$ . Два нижних ручья могут быть связаны поочередно со шкивом, насаженным на вал мотора-редуктора. Для переброски ремня мотор-редуктор закрепляется либо в одной, либо в другой паре крепежных отверстий, просверленных в бруске, на котором он укреплен. Вращение на средний ручей передается в соотношении  $1 : 2$ , на нижний  $1 : 3$ , т. е. шпиндель может совершать

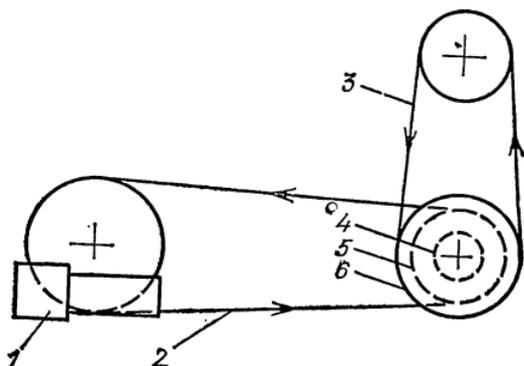


Рис. 39. Кинематическая схема привода станка: 1 — мотор с редуктором, 2 — шкив шпинделя, 3 — шкив кривошипа, 4 — нижний ручей шпинделя, 5 — средний ручей шпинделя, 6 — верхний ручей шпинделя

20 и 30 об/мин, при этом вал кривошипа — соответственно  $\sim 28$  и 41 об/мин, что представляет собой число возвратно-поступательных движений обрабатывающего инструмента в единицу времени.

Если любитель по тем или иным причинам откажется от использования приведенных схем установок обработки стекла, например, в силу отсутствия специально отведенного для этого рабочего места, что обычно имеет место в городской квартире, то в этом случае ему можно рекомендовать

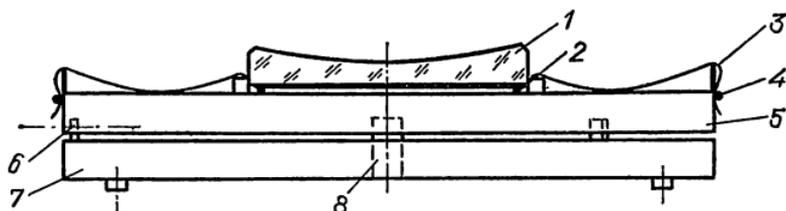


Рис. 40. Простейшее устройство обработки стеклянной заготовки: 1 — зеркало, 2 — разгрузочное приспособление, 3 — полиэтиленовая пленка, 4 — металлическое кольцо, 5 — вращающийся столик, 6 — подшипник, 7 — основание, 8 — ось вращения

изготовить простейшее устройство по типу, предложенному в свое время в книге М. С. Навашина (рис. 40).

Хочется отметить, что в отличие от известных решений оно обладает рядом преимуществ. Укажем лишь основные из них. Сочетая в себе простоту и компактность конструк-

ции, устройство является переносным и может быть установлено на время работы на любом достаточно устойчивом столе или тумбе. Имея возможность совершать на нем правильные ритмичные движения \*), мастер сохраняет элементы традиционной обработки стекла. Кроме того, рабочее помещение предохраняется от чрезмерного загрязнения продуктами шлифования стекла.

Конструкция ясна из рисунка. Зеркало своей задней поверхностью непосредственно на разгрузочные приспособления не опирается. Между ними и зеркалом Г. В. Шубаев (Московское отделение ВАГО — МОВАГО) рекомендует поместить полиэтиленовую пленку с сильно выступающими краями. Ее края образуют покатые склоны своеобразного кратера. Его диаметр должен быть рассчитан таким образом, чтобы края шлифовальника при своем движении не касались пленки. В противном случае это может явиться одной из причин появления царапин на поверхности зеркала. Для удобства работы края пленки можно закрепить с помощью металлического кольца к внешнему ободу станка или приделать к ним металлические грузики. После некоторого времени шлифования зеркала пленка загрязнится, так что ее необходимо будет помыть. Особенно важно эту операцию проводить после перехода к более мелкому номеру абразива.

К нижней поверхности вращающегося столика, ближе к его краю, прикрепляются на осях под углом  $120^\circ$  друг от друга три маленьких подшипника таким образом, чтобы столик вращался на них. Для придания ему устойчивости всю конструкцию надевают на ось, закрепленную в основании устройства, которое должно быть достаточно массивным. Чтобы оно не смещалось из стороны в сторону под действием прилагаемых усилий в процессе шлифования и особенно полирования зеркала, на опоры неплохо наклеить кусочки резины.

На подобном устройстве можно изготавливать зеркала различных размеров. Таким путем один из наиболее опытных любителей телескопостроения М. М. Шемякин обработал весьма крупное, 415-миллиметровое зеркало, причем довольно оригинальным способом. Его станочек для обработки был установлен на углу рабочего стола, как показано

---

\*) Под ритмичностью движений обычно понимается правильное чередование возвратно-поступательных движений шлифовальника относительно зеркала (или наоборот) при их взаимном постоянном вращении друг относительно друга.

на рис. 41. Работающий имеет возможность перемещаться в пределах определенного сектора, т. е. около  $120^\circ$ . Затем приходится возвращаться в исходное положение, а зеркало дискретно поворачивать на небольшой угол  $\gamma$ . Несмотря на его некоторую необычность, высокое качество оптической поверхности зеркала подтвердило возможность применения и такого способа обработки.

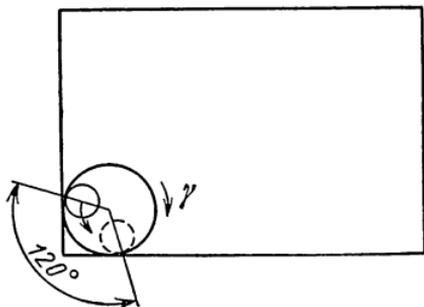


Рис. 41. Вариант установки станочка для обработки зеркала на углу рабочего стола

Так или иначе, на этапе обдирки работа должна быть построена таким образом, чтобы шлифующий инструмент — кольцо или сплошной диск совершал возвратно-поступательные движения по диаметру заготовки от одного ее края до другого с возможным выходом за ее пределы не более чем на несколько миллиметров. Помимо этого необходимо обеспечить их взаимное вращение относительно друг друга.

От чего зависит скорость шлифования данным номером абразива? Во-первых, от давления на обрабатываемую поверхность. Некоторое время считалось, что сила давления определяет еще и глубину врезания абразивного зерна в стекло и, следовательно, размер образующейся выколки. Но последние исследования процесса шлифования стекла показывают, что при повышении давления упругие деформации шлифовальника увеличивают количество работающих абразивных зерен, возрастает также ударная сила перекатывающихся абразивных зерен, но рельефность матовой поверхности не изменяется [17].

Оптимальное давление должно составлять около  $800 \text{ г/см}^2$ . Однако на практике такое давление, как правило, не применяется. На начальных стадиях шлифования любители обычно ограничиваются давлением  $20\text{—}50 \text{ г/см}^2$ . На последних стадиях тонкого шлифования во избежание вредных деформаций поверхности зеркала, принимающего практически сферическую форму, следует ограничиться давлением порядка  $10 \text{ г/см}^2$ . Это особенно важно для зеркал, у которых толщина стекла не имеет определенного

запаса по сравнению с минимальной, о чем уже упоминалось выше.

Во-вторых, на интенсивность сошлифовывания стекла влияет относительная скорость перемещения шлифовальника и заготовки, которая определяет как частоту перекачивания абразивных зерен, так и силу их удара по стеклу. Скорость движений может меняться в довольно широких пределах. Обычно за секунду совершается один — два штрихадвижения шлифовальника от одного края зеркала до другого. Еще более сложно рекомендовать какую-либо определенную угловую скорость вращения любительского зеркала относительно обрабатываемого ее инструмента. Как правило, один оборот зеркала составляет от десятки секунд до минуты в зависимости от его размера и выбранного способа обработки.

В-третьих, количество воды и абразивного порошка, подаваемых на зеркало, также сильно влияет на шлифование стекла. Воды должно быть вполне достаточно, но не настолько много, чтобы ее избыток смывал при обработке абразивные зерна. С другой стороны, чрезмерное количество абразивного порошка образует между зеркалом и обрабатываемой деталью как бы своеобразную подушку. Наиболее производительное шлифование получается при распределении абразивных зерен примерно одним слоем.

И, наконец, на глубину врезания абразивных зерен в стекло оказывает влияние твердость шлифовальника. Так, при твердом шлифовальнике, например стальном, абразивные зерна более глубоко врезаются в стекло, чем при мягком. При твердом шлифовальнике производительность шлифования выше и глубина матового слоя больше, чем при мягком.

Итак, перед началом шлифования покроем лицевую поверхность будущего зеркала, уже находящегося на необходимом разгрузочном приспособлении, равномерным слоем наиболее крупнозернистого абразива из расчета 1 чайная ложка шлифующего материала на 150—200 см<sup>2</sup> поверхности. Ее увлажнение лучше проводить до нанесения абразива.

Сразу после начала обдирки зеркала новой порцией шлифующего материала в работу включается небольшое количество абразивных зерен из-за некоторого разброса в их размерах в пределах одной фракции. При этом удельное давление, приходящееся на них, оказывается очень большим. В силу этого отдельные крупные зерна сравнительно быстро раскалываются, и данный номер

абразива начинает выкрашивать стекло наиболее эффективно. Это так называемая рабочая фаза процесса. Тем не менее даже в течение этого периода в работе активное участие принимают только 10—15 % зерен, находящихся между инструментом и заготовкой.

Вскоре после начала обдирки громкий хруст раскалывающихся абразивных зерен и выкрашивающегося стекла сменяется на легкое шипение. На этой стадии работы данный номер абразива уже потерял значительную часть своих первоначальных шлифующих свойств, и его с полным правом можно было бы удалить с обрабатываемой поверхности. Однако в процессе работы некоторая его часть оказывается на боковой грани зеркала. Поэтому с целью более полного использования шлифующего материала целесообразно собрать его, например, с помощью кусочка поролона и продолжить обработку, добавив, если нужно, воды. Новую порцию абразива следует класть только после того, как рабочая поверхность зеркала и шлифовальный круг полностью очищены от продуктов обработки стекла, так как в противном случае оставшаяся абразивная смесь будет препятствовать интенсивному сошлифовыванию стекла. Процесс станет менее производительным.

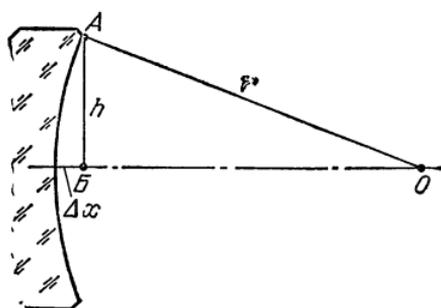


Рис. 42. Расчет стрелки кривизны сферического зеркала

Прошлифовав зеркало несколькими порциями абразива, можно уже попытаться определить его фокусное расстояние. Для этого достаточно измерить его стрелку кривизны  $\Delta x$ . Ее численное значение можно получить, если рассмотреть треугольник  $ABO$  (рис. 42). В самом деле, по теореме Пифагора имеем

$$\Delta x = r - \sqrt{r^2 - h^2}, \quad (69)$$

где  $h$  — полудиаметр зеркала, а  $r$  — расчетный радиус кривизны ( $f' = \frac{1}{2} r$ ).

Очень удобно и просто стрелка кривизны поверхности измеряется с помощью несложного приспособления — *сфе-*

рометра (рис. 43). В качестве отсчетного устройства обычно применяется широко распространенный индикатор часового типа, имеющий цену деления 0,01 мм. Он может быть закреплен на металлическом бруске в просверленном в его центре отверстии. У бруска на металлообрабатывающем станке обрабатываются лишь рабочие участки поверхности,

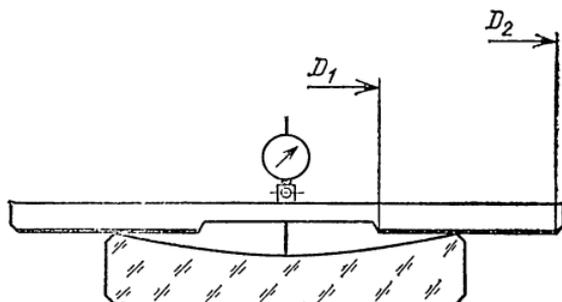


Рис. 43. Измерение стрелки кривизны с помощью сферометра

которые опираются на края зеркала. Если сферометру придать размеры  $D_1=80$  мм,  $D_2=300$  мм, то они перекроют практически весь доступный диапазон диаметров любительских зеркал. Перед началом измерений необходимо выставить на индикаторе значение «0 мм», что можно сделать по задней поверхности зеркала, если, конечно, оно представляет собой не литую заготовку. Еще лучше использовать для этой цели какой-либо плоский эталон, например, оптическое пробное стекло.

Способ определения фокусного расстояния зеркала путем измерения его стрелки кривизны особенно удобен на ранних этапах шлифования, в процессе обдирки зеркала. При переходе к более мелким сортам абразива поверхность начинает принимать более плавную сферическую форму, отдельные микронеровности становятся не так заметны, и зеркало, пока с него не сбежала блестящая и гладкая пленка воды, уже может построить достаточно отчетливое изображение источника света \*).

Поэтому здесь возможно дополнительно использовать способ непосредственного измерения фокусного расстояния зеркала через его радиус кривизны (рис. 44). Как известно, если источник света  $s$  расположить в центре кривизны сферической поверхности, то она построит его изображение

\*) Удобнее для этой цели использовать не воду, а глицерин. Он представляет собой более вязкую жидкость, благодаря чему поверхность зеркала дольше сохраняет свой зеркальный блеск

в исходной точке. Сместив незначительно источник света с оптической оси, мы получим его изображение  $s'$  рядом. Разделив измеренное расстояние до вершины зеркала пополам, получим его фокусное расстояние. Для повышения точности измерений неплохо перед источником света рас-

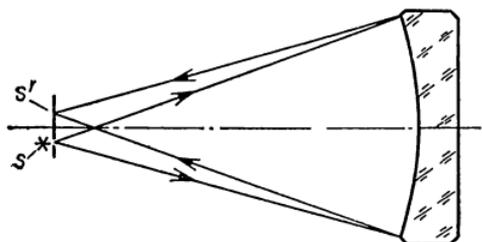


Рис. 44. Способ непосредственного измерения фокусного расстояния зеркала через его радиус кривизны

положить диафрагму в виде круглого отверстия диаметром 5—8 мм, а на экране добиваться получения резкого изображения не спирали электролампочки, а контура отверстия диафрагмы. На последних стадиях тонкого шлифования точность определения фокусного расстояния описанными способами приблизительно одинакова и составляет несколько миллиметров.

Но следует отметить, что непосредственное измерение фокусного расстояния зеркала на ранних этапах его обработки очень коварно и более неточно, чем это может показаться на первый взгляд. Это связано прежде всего с особенностями используемого метода обработки зеркала, посредством которого мы получаем в нем нужное нам углубление. При шлифовании зеркала кольцом или сплошным диском исключительно центральными штрихами необходимое углубление в его центре получается очень быстро. При сферометрическом способе контроля полученный результат измерений позволяет с большой точностью определить момент завершения обдирки заготовки. При начальной обработке зеркала кривизна его имеет разные значения в центре и на краю. Так, в процессе обработки зеркала его внешняя кольцевая зона обычно оказывается недостаточно отшлифованной, т. е. имеет кривизну меньше, чем центральные зоны (рис. 45, а). Это бывает особенно хорошо заметно по большому скоплению блестящих точек, оставшихся на краю плоской поверхности заготовки, если она была до того, конечно, отполирована. Если теперь произвести обработку поверхности шлифовальником полного размера, об изготовлении которого будет рассказано ниже, то общая кривизна поверхности уменьшится, а фокусное расстояние зеркала соответственно увеличится по сравнению

с замеренным ранее. Простой расчет показывает, что если зеркало диаметром 200 мм и фокусным расстоянием 1500 мм имело ободок неотшлифованного стекла шириной 10 мм, то после его удаления фокусное расстояние зеркала увеличится приблизительно на 350 мм, а ошибка измерения составит около 25 %. Поэтому заканчивая обдирку, нужно постараться поверхность сделать более плавной (рис. 45, б).

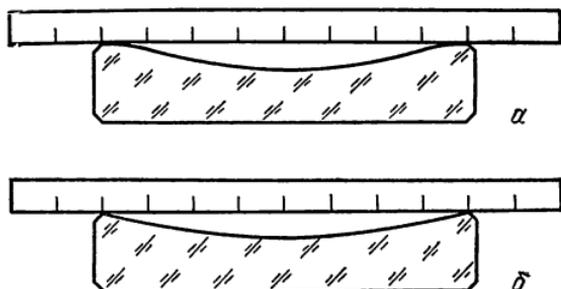


Рис. 45. Характер получающейся поверхности при шлифовке кольцом или сплошным диском меньшего размера

Для этого шлифовальник необходимо сместить несколько ближе к краю заготовки настолько, чтобы его центр тяжести на несколько сантиметров не доходил до краевой зоны (рис. 46). Приложив усилие в точке  $P$ , проведем шлифование короткими штрихами в направлении по хорде зеркала, обращая внимание на то, чтобы шлифовальник не слишком сильно выходил за пределы заготовки.

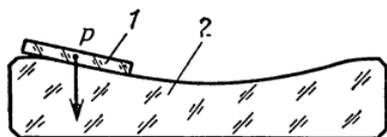


Рис. 46. Дополнительная обработка неотшлифованной краевой зоны зеркала: 1 — шлифовальник, 2 — зеркало

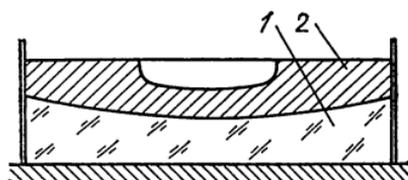


Рис. 47. Изготовление основания шлифовальника: 1 — зеркало, 2 — шлифовальник

Судить о степени завершенности работы можно по выравниванию поверхностного рельефа разрушенного слоя на интересующей нас зоне. Кроме этого, если ранее проследить за просветом между зеркалом и прямолинейным краем металлической линейки, то можно обнаружить, что он практически пропадает не на фаске зеркала, а несколько раньше (рис. 45, а), в то время как после обработки линейка касается зеркала только лишь в двух точках (рис. 45, б).

Осмотр надо, конечно, проводить таким образом, чтобы поверхность зеркала была, по возможности, на одном уровне с лучом зрения.

Для дальнейшей работы необходимо изготовить шлифовальник. Хорошие результаты дает применение специального шлифовальника, основание которого отлито из смеси цемента с песком или цемента с алебастром. Он прост в изготовлении и доступен для широкого круга любителей.

Основанием для отливки служит ранее обработанная кольцом или диском стеклянная заготовка будущего зеркала, положенная лицевой поверхностью вверх (рис. 47). Состав смеси обычно берут в следующем соотношении: одна часть цемента на три части песка или 30 % алебаstra и 70 % цемента. Боковую стенку формы можно вырезать из картона или склеить из нескольких слоев ватмана, используя в качестве клея эпоксидную смолу. Для этого нужно нарезать из листа ватмана несколько полос такой ширины, чтобы она превышала толщину заготовки на 20—50 см в зависимости от размера зеркала (200—500 мм). Обвертываем заготовку вначале одним слоем ватмана без смолы, а затем подмазываем смолу на склеиваемые участки листа, обращая внимание на то, чтобы смола хорошо пропитывала всю толщину материала. В этом случае стенки формы будут иметь наибольшую прочность. Общая их толщина — около 1—2 мм — совершенно достаточна. Еще удобнее для боковой стенки формы использовать полоску линолеума длиной, равной длине окружности изготавливаемого зеркала. Она располагается гладкой стороной внутрь, ее концы сводятся «встык» и скрепляются с натягом с внешней стороны. Имеющийся зазор замазывается пластилином.

Тщательно перемешанную бетонную массу выкладывают не прямо на поверхность зеркала, а на предварительно уложенный круг полиэтиленовой пленки, который должен по возможности плотнее прилегать к стенкам формы. Чтобы увеличить жесткость шлифовальника, целесообразно в бетонную массу уложить отрезки дюралюминиевых трубок. Для уменьшения рыхлости бетонной массы ее нужно хорошо утрамбовать, что можно сделать деревянной ступкой, бруском или другим подручным инструментом. В центральной части шлифовальника толщину бетона можно уменьшить приблизительно в два раза по сравнению с внешней (см. рис. 47). При этом жесткость его останется прежней. Уложенную смесь нужно накрыть влажной тряпкой и дать ей затвердеть вдали от источников тепла, на что требуется около семи суток.

После высыхания шлифовальник снимается с зеркала. Внешне он должен представлять собой плотный монолитный блок без трещин и крупных каверн. Для того чтобы при обработке на зеркало не могли попасть оторвавшиеся частицы бетона, шлифовальник со всех сторон защищается эпоксидной смолой. Лучше это сделать в два приема, т. е. вначале покрыть верхнюю поверхность и боковую сторону, а после высыхания смолы, через сутки, — оставшуюся часть. На изготовленное таким образом основание наклеиваются с помощью той же эпоксидной смолы квадратики из оргстекла

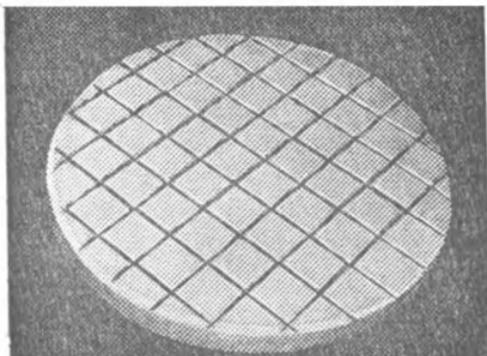


Рис. 48. Внешний вид шлифовальника диаметром 315 мм

толщиной 4—5 мм, обрезанные по краям шлифовальника по линии его окружности. Зазор между ними 2—3 мм. На рис. 48 изображен описанный выше шлифовальник диаметром 315 мм. На практике обычно совмещают операции наклейки квадратиков на шлифовальник с защитной обработкой эпоксидной смолой его верхней поверхности.

Еще лучшие результаты дает замена квадратиков из оргстекла на винипластовые. В этом случае величина микронеровностей отшлифованной поверхности становится меньшей, что позволит в дальнейшем сократить время на полировку.

Получив необходимое углубление в заготовке зеркала, продолжим ее обработку изготовленным шлифовальником. Зеркало продолжает находиться на разгрузочном приспособлении лицевой стороной вверх. На первом этапе будет происходить пришлифовывание шлифовальника к заготовке. Чтобы ускорить этот процесс, начать работу лучше с того номера абразива, которым производилась обдирка зеркала. Штрихи на данном и последующих этапах обработки удобнее делать не центральные, а в виде овала при некотором смещении центра шлифовальника относительно центра зеркала, как условно изображено на рис. 49. Смещение может составлять 0,2—0,4 диаметра зеркала. При этом достигается более равномерная обработка всей поверхности, уменьшается вероятность появления зональных ошибок.

Вымоем и дадим высохнуть зеркалу и шлифовальнику. Пришлифовывание двух поверхностей можно считать законченным, если вся поверхность квадратиков шлифовальника покрылась одинаковой матовостью, а кольцевая и центральная зоны зеркала не обнаруживают заметных различий в степени отражательной способности.

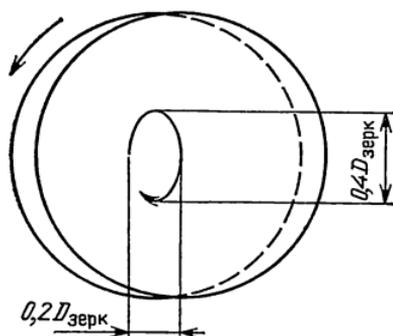


Рис. 49. Форма и размер штриха при работе шлифовальником

Осмотр удобно проводить по схеме, изображенной на рис. 50. Для того чтобы картина была видна более отчетливо, целесообразно перед испытанием продолжить шлифование одним номером абразива несколько долее, чем обычно рекомендуется. В этом случае в работу включается все большее количество раздробленных мелких зерен абразива, которые в местах наиболее тесного контакта зеркала и шлифовальника формируют поверхность с более мелкой

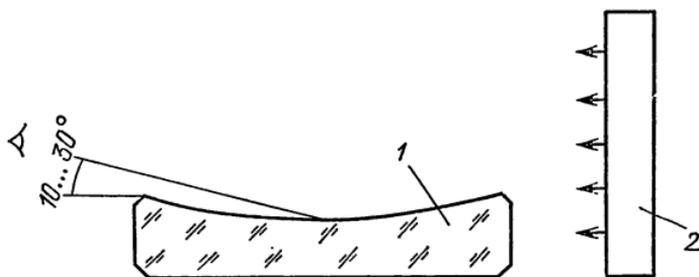


Рис. 50. Осмотр шлифованной поверхности: 1 — зеркало, 2 — осветитель, представляющий собой источник рассеянного света

структурой по сравнению с той, которая осталась ими нетронутой. Поэтому в «косых» лучах можно заметить, что более грубая поверхность отражает свет хуже. Чаще всего у начинающего любителя более темным оказывается центр зеркала и самый его край. Тогда шлифование нужно продолжить, не переходя к более мелким сортам абразива. Если опущенным оказался край, то поможет осторожное увеличение величины смещения центра шлифовальника от-

носителем центра зеркала до  $0,4 \div 0,6$  радиуса зеркала. Если углублен центр, то такой увеличенный вынос также окажется полезным. Абразив следует посыпать не равномерно на всю поверхность, а преимущественно на средние зоны зеркала. Как правило, при умелой работе достаточно сменить две-три порции абразива, чтобы обе поверхности приобрели приблизительно правильную сферическую форму.

Шлифование более мелким шлифпорошком преследует лишь одну основную цель: сгладить имеющиеся место отдельные неправильности поверхности и получить более плавную сферическую форму со сглаженным рельефом микронеровностей.

В задачу любителя в процессе этого наиболее «спокойного» участка работы входит периодический осмотр шлифованной поверхности с целью определения времени окончания обработки тем или иным абразивом. Очень удобно и просто это можно сделать, если рассматривать поверхность зеркала в сильную лупу с увеличением не менее  $25\times$ . Для устойчивости ее можно укрепить на простом штативе из толстой проволоки. Осмотр производится от самого края зеркала до его центра вдоль всего радиуса. При этом в поле зрения лупы размеры отдельных микронеровностей должны быть практически одинаковыми. Не допускается наличие более крупных выколов. В связи с тем, что под разрушенным слоем, как отмечалось выше, располагается невидимый трещиноватый слой, шлифование данным номером абразива следует продолжить несколько долее, чем это следует по результатам данного метода контроля.

Кроме того, любителю необходимо следить за фокусным расстоянием зеркала, так как при таком способе обработки оно имеет тенденцию увеличиваться. Если окажется, что фокусное расстояние зеркала стало больше расчетного (что обычно бывает при выправлении кольцевой зоны в процессе шлифования, погрешность формы которой начинающий мастер не распознал), то не составит особого труда привести его к желаемой величине. Как известно, для этого достаточно поменять зеркало и шлифовальный места, производя некоторое время обработку зеркала поверх шлифовальника. После того как нужный эффект получен, зеркало и шлифовальный лучше вернуть в прежнее положение. Закончив обработку поверхности шлифовальником № 3—5, переходим к тонкому шлифованию.

Тонкое шлифование обязательно начинается с особенно тщательного мытья зеркала, шлифующего инструмента,

рабочего места, рук, а также, по возможности, всего, что может стать каким-либо образом источником загрязнения шлифующей среды.

Поэтому перед любителем на данном этапе стоит задача не только окончательно подготовить поверхность к полированию, но и постараться, по возможности, избежать появления царапин. Важно подчеркнуть, что отдельные царапины, даже крупные по размеру, сами по себе не страшны, если не принимать во внимание их вполне определенное отрицательное эмоциональное воздействие на настроение человека. Они практически не сказываются на качестве изображения. Гораздо хуже, если поверхность покрыта густой сетью мельчайших и многочисленных царапин. Не менее опасны большие участки не до конца отшлифованной, а потому и не полностью в дальнейшем отполированной поверхности. Поэтому работа должна быть завершена, как только последние остатки разрушенного слоя, оставшиеся от предыдущего номера абразива, уже сняты, и не следует проводить ее чрезмерно долго, так как в результате увеличивается вероятность появления царапин.

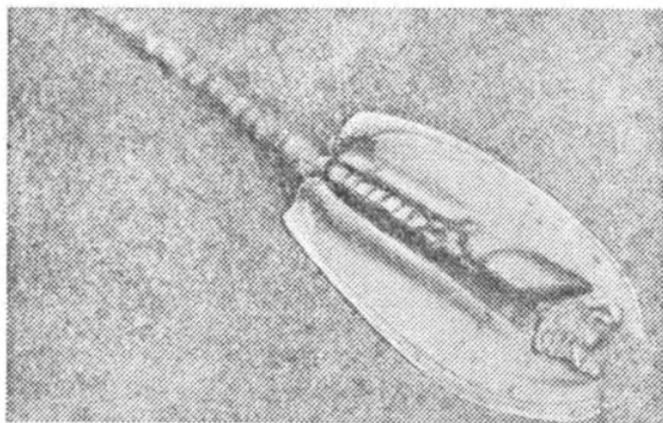


Рис. 51. Выколка, образующаяся на тонкошлифованной поверхности от воздействия одиночного крупного абразивного зерна

Они образуются единичными крупными зернами, находящимися в абразивной суспензии. В этом случае на каждое зерно приходится большое удельное давление, в результате чего они глубоко вдавливаются в шлифовальник, заклиниваются и теряют возможность перекатываться. При движении шлифовальника такие зерна, оставаясь неподвижными относительно него, прорезают на стекле глубокую

царапину, затем вырываются, перекатываются несколько раз, делая при этом глубокие выколки, опять заклиниваются в шлифовальнике и т. д. (рис. 51). Это происходит до удаления зерна со шлифовальника или его разрушения.

Раньше считалось, что существует прямая зависимость между прикладываемым давлением и вероятностью появления царапин. В исследованиях последних лет это утверждение не нашло своего подтверждения. Глубина и длина царапины зависят от величины абразивного зерна, его прочности, свойств шлифовальника, стекла и др.

Их присутствие на стеклянной поверхности можно резко сократить, если соблюдать некоторые необходимые меры предосторожности. С самого начала, как уже указывалось, необходимо позаботиться об абсолютной чистоте всего, что окружает рабочее место. Зеркало и шлифовальник нужно тщательно обмыть теплой водой с мылом и поставить на ребро. Особенно хорошо промываются канавки шлифовальника (щетинной кистью!).

Абразив готовится за несколько часов до начала работы. Для этого некоторое его количество — около  $1/3$  по высоте сосуда — засыпается в неширокую цилиндрическую пластмассовую чисто промытую баночку, объемом около 100 мл, и заливается кипяченой водой. Очень тщательно перемешаем смесь, закроем баночку пластмассовой крышкой. После того как абразив полностью осядет на дно, сольем лишнюю воду, однако ни в коем случае не через край. Проще всего ее сцедить с помощью сифона или через трубочку из-под коктейлей, можно воспользоваться также небольшой резиновой грушей.

Абразив на зеркало наносится только кисточкой, причем с верхнего слоя. Если с зеркала не сбежала тонкая пленка воды, то рукой его можно более-менее равномерно распределить по всей поверхности, в противном случае зеркало нужно слегка увлажнить, стряхивая над ним с пальцев капли воды. Аккуратно накладываем сверху шлифовальник и, придерживая его, делаем небольшие покачивающие движения порядка миллиметра, постепенно увеличивая их амплитуду. В этом случае более твердая частица обычно успевает расколоться на несколько частей, произведя крошечную вмятину, а не длинный раковистый излом, который обычно имеет место при длительном перекатывании частицы.

При обработке последними номерами микропорошков — М10, М7, М5 слой абразивной кашицы становится настолько тонким, что за время обработки одной порцией абразива

он может на краях зеркала подсохнуть. Как правило, так происходит при работе в помещении с сухим и теплым воздухом. В этом случае слипшиеся комочки абразива обычно оставляют на поверхности зеркала узкие бороздки с ровными краями. Чтобы избежать этого, нужно периодически смачивать края зеркала водой, не давая абразиву высыхать. Хотя подобные царапины в процессе дальнейшей работы и могут быть сполированы, все же нужно стараться их не допускать, так как для этого приходится руководствоваться прежде всего личным опытом.

При тонком шлифовании не рекомендуется снимать шлифовальный диск с зеркала и промывать их перед нанесением свежих порций абразива, чтобы не рисковать лишним раз исцарапать поверхность зеркала. Лучше всего, слегка сдвигая шлифовальный диск, периодически подмазывать кисточкой абразив небольшими порциями на разные зоны зеркала.

И еще один полезный совет. Твердые частицы могут попасть в абразивную суспензию с рукавов работающего, особенно при обработке крупной оптики. Поэтому рукава нужно на время тонкого шлифования и полирования обязательно закрывать.

Все приведенные выше советы могут на первый взгляд показаться излишне подробными и не очень важными. Следует, однако, заметить, что уважающий свою работу мастер никогда не оставит на оптическом изделии сколько-нибудь заметные царапины. Выведение же их приводит к чрезвычайно досадной потере времени.

Хочется обратить внимание читателя на то, что можно, хотя и несколько труднее, работать шлифовальником меньшего размера, до 70 % по диаметру. Обработка ведется также овальным штрихом, но с большим выносом центра шлифовальника от центра зеркала ( $0,4 \div 0,6$  радиуса зеркала). Таким приемом в МО ВАГО было изготовлено два зеркала размером около 400 мм с помощью шлифовальников, которыми ранее были изготовлены зеркала меньших размеров.

Каким номером заканчивать шлифование? Совершенно очевидно, что более тонко отшлифованная поверхность требует более короткого времени на полировку. Возможный компромисс между вероятностью посадить царапину данным номером тонкого микропорошка и последующим временем, которое нужно будет затратить на полирование, может быть найден, если посоветовать начинающему любителю ограничиться при шлифовании небольших зеркал микропорошком М10. Тогда при обработке на винилпластовом шлифовальнике размер шероховатости составит около

5 мкм. Крупные зеркала более опытные любители доводят микропорошками М7 и даже М5. Поверхность стекла, отшлифованная этими номерами абразивов, уже настолько гладка, что, смоченная водой, практически не рассеивает свет, прозрачна на глаз, что хорошо заметно, если задняя сторона зеркала уже отполирована.

Некоторым маркам стекла, таким как ЛК5, ЛК7, и отчасти ситаллу свойствен дефект стекла, называемый пузырьностью. Находясь в толще стекла, такие пузырьки не страшны. Однако часть их, находящаяся в зоне обработки, в процессе работы может вскрыться и стать резервуаром, из которого в процессе тонкой шлифовки будут поступать более крупные зерна. В результате некоторый прилегающий к ним участок поверхности оказывается обработанным хуже. В отраженном свете он кажется темнее, а на полированной поверхности при дальнейшем контроле зеркала заметны светлые лучи. Поэтому пузырьки надо обязательно расшлифовывать до такой степени, чтобы их края у поверхности зеркала были пологими. То же самое относится и к острым сколам на краю зеркала, которые не удалось «убрать» с помощью фаски. Непритупленные их острые кромки вызывают стойкие темные пятна, лучи и прочее на относительно светлом фоне остальной поверхности.

Что же касается контроля равномерности процесса шлифования, то испытание здесь аналогично описанному выше (см. рис. 50).

Особо следует сказать о технологии шлифования плоских поверхностей. Обработка зеркала круглого очертания достаточно подробно описана в [4]. Однако, как уже указывалось выше, наиболее предпочтительной формой диагонального зеркала является эллипс. Его изготовление имеет существенные технологические особенности и связано с определенными дополнительными трудностями.

Одна из них состоит в придании зеркалу эллиптической формы. Заготовка оптического стекла, имеющая некоторый припуск на обработку —  $3 \div 4$  мм по малой оси и несколько больший, в зависимости от толщины заготовки, по большой оси, клеивается с помощью наклеечной смолы в распил металлического цилиндра. Геометрические размеры заготовки проще всего определить графически, положив диаметр цилиндра равным длине малой оси зеркала. Как всегда, для избежания грубых сколов на поверхностях заготовки предохраним их тонкими защитными стеклянными прокладками. Целесообразно клеить сразу две заготовки, они пригодятся нам в дальнейшем (рис. 52, а).

Сошлифуем выступающие места (рис. 52, б). При работе не рекомендуется применять слишком крупнозернистый абразив и создавать сильный нажим. После нагревания обработанного блока освобождаем заготовки от защитных стекол, промываем их в бензине или керосине и снабжаем фасками, которые в данном случае могут быть небольшими — около 1 мм.

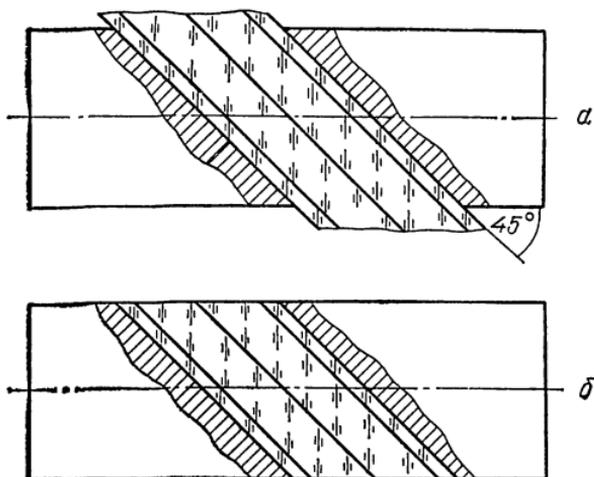


Рис. 52. Придание плоскому зеркалу эллиптического очертания

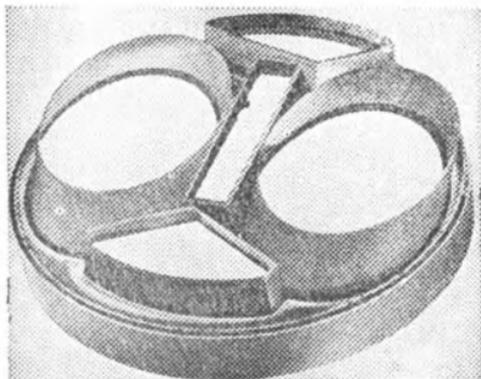
Основная трудность при обработке плоской поверхности эллиптического зеркала заключается в обработке заготовки некруглого очертания, а именно: невозможность выдерживания одинаковой длины штриха по разным направлениям. Сложен учет изгиба стекла из-за его неодинаковой толщины вдоль большой оси. Все это приводит к появлению нерегулярных зональных искажений формы поверхности, которые очень трудно поддаются исправлению.

Задача шлифования и полирования сильно упрощается, если использовать вспомогательные стекла, дополняющие очертания обрабатываемой заготовки до круглой. Склеенное изделие обрабатывается традиционным способом, а по достижении точной плоской поверхности склеенные части разъединяются. Основным недостатком этого способа заключается в чрезмерной сложности изготовления в любительских условиях вспомогательных стекол из-за отсутствия специального оборудования и необходимых навыков в работе.

Как показывает опыт изготовления плоских зеркал, наиболее удачным является видоизмененный вариант этого способа, когда заготовки и вспомогательные стекла накле-

иваются на основание — план. Размеры и форма стекол должны по возможности полнее дополнять очертания обрабатываемых заготовок до круглого очертания, например, так, как показано на рис. 53, и иметь с ними одинаковую толщину. Очень важно выполнить лишь одно условие: как заготовки, так и вспомогательные стекла должны быть изготовлены из одной марки стекла. Для наклеечного основания лучше всего использовать стекло с малым коэффициентом линейного расширения и достаточной толщины, т. е. к нему предъявляются те же требования, что и к астрономическому зеркалу.

Рис. 53. Наклеенные на основание-план две заготовки эллиптического очертания и вспомогательные стекла



Шлифование производится на сплошном стеклянном или винипластовом шлифовальнике, диаметр которого соответствует полному размеру склеенных деталей. Шлифование плоской поверхности мало чем отличается от шлифования сферической поверхности. Начинать работу можно сразу с крупного микропорошка М40÷М28. Следует применять исключительно центральный слегка укороченный штрих длиной около  $1/4$  радиуса обрабатываемого инструмента в каждую сторону, работать плавно, ритмично, без рывков. После небольшого пришлифования поверхностей начинаем через определенные промежутки времени менять местами шлифовальник и заготовки — сначала минут через 10, а по мере перехода к более мелким сортам абразива еще чаще. В противном случае они приобретут некоторую кривизну поверхности.

Для контроля формы тонкошлифованной поверхности опытные мастера-оптики часто используют лекальную линейку. В то же время характер имеющейся кривизны (выпуклость или вогнутость) достаточно уверенно определяется и более простым способом по искажению видимых очертаний предмета правильной геометрической формы.

Как известно, в качестве эталона обычно используется шарик, который рассматривается под острым углом к контролируемой плоскости (рис. 54). Если отражение шарика

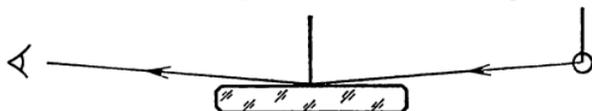


Рис. 54. Испытание плоской поверхности под острым углом к контролируемой плоскости

вытянуто вертикально, значит, общая поверхность склеенного блока имеет вогнутость, и его нужно некоторое время шлифовать в нижнем положении; если отражение сплюснуто, то блок выпуклый и должен обрабатываться в верхнем положении.

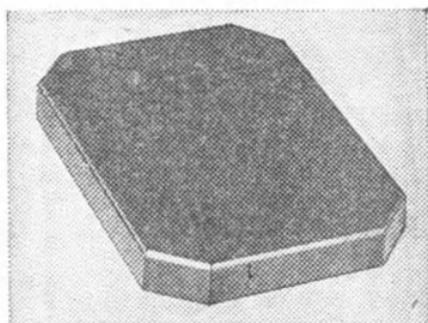


Рис. 55. Готовое плоское зеркало прямоугольного очертания

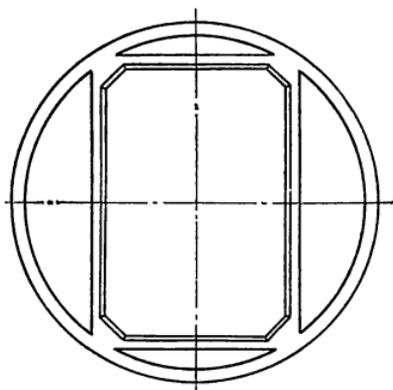


Рис. 56. Расположение плоского зеркала прямоугольного очертания и вспомогательных стекол на основании-плане

В любительской практике часто применяются плоские зеркала не эллиптического, а прямоугольного очертания со срезанными углами и соотношением сторон  $\sqrt{2}:1$  (рис. 55). Зеркало такой формы хотя и загораживает несколько больше света, но в то же время более просто в изготовлении. Его очень легко дополнить до круглого очертания (рис. 56). В остальном его обработка не отличается от обработки зеркала эллиптической формы.

## § 6. ПОЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА

Полирование стекла является наиболее важной и трудоемкой операцией. В процессе полирования шлифованных деталей срабатывается слой порядка 10 мкм, а обрабатывае-

мая поверхность приобретает зеркальный блеск и необходимую точность.

Полирование стекла в определенном смысле принципиально отличается от шлифования, так как обработка поверхности осуществляется не свободным абразивом, а связанным, причем в роли связки выступает смола, сукно и др.

Исследования последних лет показывают, что полирование следует рассматривать как сложный физико-химический процесс срабатывания стекла. Выдающийся русский ученый академик И. В. Гребенщиков показал, что в основе полирования стекла происходят химические процессы. Под действием воды на поверхностном слое стекла образуется защитная пленка из окиси кремния толщиной около 0,007 мкм. В процессе работы зёрна полирующего вещества частично внедряются в связующую основу. При движении полировальника их выступающие ребра царапают окисную пленку, удаляют ее со стекла, однако за очень малый промежуток времени пленка образуется вновь. Этот процесс очень напоминает строгание рубанком деревянного бруска.

Помимо этого чисто механического процесса попутно имеет место эффект заполирования или затирания мелких изъянов поверхности продуктами обработки стекла. В результате под идеально гладкой (с оптической точки зрения) отполированной поверхностью изделия могут сохраниться остатки разрушенного трещиноватого слоя и даже отдельные дефекты отшлифованного поверхностного слоя.

На процесс полирования влияет физико-химический состав стекла, определяющий его свойства. Например, более твердое стекло полируется медленнее, чем мягкое. Мягкое же стекло легко царапается. С увеличением твердости обрабатываемого стекла величина остаточных микронеровностей его поверхности уменьшается. Исключение составляет стеклокристаллический материал.

К полирующим материалам предъявляются следующие требования. Они должны хорошо удерживаться на поверхности полирующего слоя смолы, обеспечивать эффективное споллирование мата — шероховатостей шлифованной поверхности и получение нужной чистоты поверхности. В настоящее время наибольшее распространение для полирования стекла получил полирит — порошок светло-коричневого цвета. Состав — смесь окислов редкоземельных элементов с массовой долей окиси церия ( $\text{CeO}_2$ ) до 50 %. Исходное сырье после обогащения и обжига измельчают до

Таблица 14

Полирующий порошок	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Полирующая способность	
		мг	относительная
Крокус	5,5	15—25	1
Полирит	6,0	35—40	1,5—2,0
Окись церия	7,3	40—50	1,8—2,2

частиц размером 3—7 мкм. Реже используется крокус — мелкозернистый порошок безводной окиси железа ( $Fe_2O_3$ ). Обладает красновато-коричневым цветом. Несмотря на меньшую по сравнению с полиритом полирующую способность, крокус продолжает применяться, так как дает поверхность несколько лучшего, чем при работе с полиритом, качества. Окись церия — порошок желтоватого цвета. Содержит, кроме  $SeO_2$ , окислы других редкоземельных элементов. Обладает очень высокой полирующей способностью. Применение его ограничено из-за его высокой стоимости изготовления. В процессе полирования эти материалы применяются в виде суспензии — смеси полирующего вещества с водой.

Краткие сведения о полирующих материалах приведены в табл. 14. Полирующая способность, которая дана в таблице, определяется по массе (в мг) стекла К8, сполированного в стандартных условиях.

В полировочном процессе исключительно важная, если не сказать основная, роль отводится *полировочной смоле* — смоляной композиции из каменноугольного пека (битума, сапожного вара), канифоли и иногда с добавкой неболь-

Таблица 15

Марка смолы	Канифоль, %	Воск, %	Пек, %	Рабочая температура, °С
П10	70	1	29	30...35
П9,5	60	1	39	25...30
П9	50	1	49	20...25
П8,5	38	1	61	18...22
П8	15	1	84	15...20

шого количества воска и иных составных частей в различных сочетаниях и соотношениях.

Для увеличения полирующей способности в некоторые марки полировочной смолы добавляют 5—10% очень мелких вываренных древесных опилок. Для той же цели в любительских условиях можно применять смолы с добавкой полирита в соотношении 1 часть полирита, 2 части смолы.

Вязкость пеко-канифольных смол в значительной степени зависит от температуры окружающего воздуха. Марка полировочной смолы обозначается буквой «П» с последующим числом. Процентное содержание составных частей некоторых марок смол приведено в табл. 15. Чем больше канифоли, тем смола тверже. Каждая марка смолы имеет свою рабочую температуру. Кроме этого, в каждом конкретном случае для лучшей регулировки процесса полирования вязкость смолы подбирают опытным путем, руководствуясь следующими соображениями. Для крупных зеркал любителю лучше применять более мягкую смолу, при интенсивной обработке лучше использовать твердую смолу.

Смола готовится следующим образом. На электроплитке в металлической баночке, поставленной на асбестовую прокладку, осторожно расплавляют канифоль. Затем постепенно добавляют в нее маленькими кусочками пек. В связи с тем, что летучие компоненты смолы токсичны, рекомендуется работать в проветриваемом помещении или на свежем воздухе. Тщательно размешивают смесь деревянной палочкой. Она должна иметь консистенцию жидкой сметаны. Следует иметь в виду, что смола, доведенная до кипения, очень сильно меняет свои некоторые специфические свойства и в дальнейшем становится малопригодной для полирования. В перемешиваемую массу добавляют воск.

Полученную оптическую смолу необходимо процедить через два слоя марли. Обычным образом это сделать, как правило, не удастся, так как смола сравнительно быстро начинает густеть и почти вся остается на марле. Г. В. Шуваев предлагает очень простой и удобный способ процеживания. В небольшую кастрюлю, нагреваемую на слабом огне, укладывается в два слоя марля таким образом, чтобы она плотно прилегала ко дну и стенкам сосуда и свешивалась через его края. Расплавленная смола осторожно выливается на марлю в середину сосуда. Смола в прогретом сосуде остается жидкой. Марлю осторожно вынимают за края. В ней останутся крупные включения, которые могли бы поцарапать поверхность зеркала.

Используемый любителями пек обычно бывает случайного происхождения, а потому может иметь различную вязкость. Поэтому сваренную оптическую смолу лучше проверить на твердость. Для этого каплю расплавленной смолы наносят на кусок стекла, охлаждают в холодной воде и дают полежать при комнатной температуре. Твердость полученной смолы считается удовлетворительной, если на ее поверхность можно нанести слабый отпечаток ногтя. Нужно еще иметь в виду, что в силу присущей смоле инерции ее твердость спустя несколько часов обычно немного повышается.

Помимо полировальной смолы желательнее отдельно приготовить так называемую *наклеечную смолу*. Она может пригодиться для склеивания с заготовкой защитных стекол, например, при сверлении центрального отверстия в главном зеркале, при обработке плоских стекол и т. д.

Смолу варят при температуре 160—250 °С. Можно рекомендовать следующий состав наклеечной смолы (весовая доля в %): пек — 25, канифоль — 50, канифольное масло — 5, тальк — 20.

Основанием для полировальника служит тот же материал, из которого изготавливался шлифовальник, т. е. цементная отливка. Чтобы не поцарапать тонкоотшлифованную поверхность зеркала, основание для полировальника лучше сделать одновременно со шлифовальником и также защитить его со всех сторон слоем эпоксидной смолы.

Размягченную оптическую смолу выливают на выпуклую поверхность основания полировальника тонкой струйкой, начиная с центра и по спирали постепенно спускаясь к краям. Наливать смолу на основание полировальника нужно равномерно, чтобы толщина слоя была везде примерно одинакова, так как этот фактор влияет на скорость полирования. Так, при давлении до 12 г/см<sup>2</sup> с увеличением толщины слоя смолы  $H$  (рис. 57) скорость полирования сначала непрерывно возрастает, а затем при толщине слоя больше 8 мм уже не меняется. При давлении на полировальник порядка 100 г/см<sup>2</sup> скорость полирования не зависит от толщины слоя смолы и составляет приблизительно 0,08 мкм/мин.

После некоторого загустения смоляной подложки производится ее грубая формовка под сферу увлажненной, иногда с мыльной водой, отшлифованной поверхностью зеркала. Делая штрихи, как при тонкой шлифовке, стараемся добиться того, чтобы поверхность смоляного полироваль-

ника одинаково заблестела по всем направлениям. Как правило, при этом приходится применять значительные усилия, особенно при изготовлении больших зеркал. Если смола успела сильно затвердеть, то и зеркало и полировальник поместим под струю горячей воды. Поверхности зеркала и полировальника на этапе грубой формовки смолы должны постоянно находиться в относительном движении, так как присутствующая между ними тонкая пленка воды,

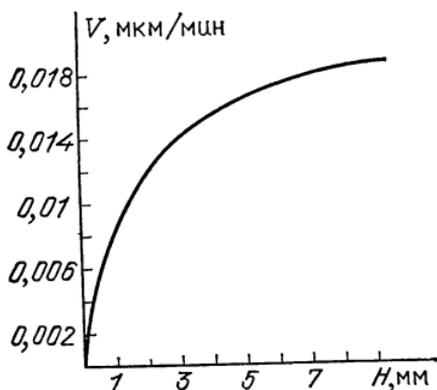


Рис. 57. Зависимость скорости полирования от толщины слоя смолы

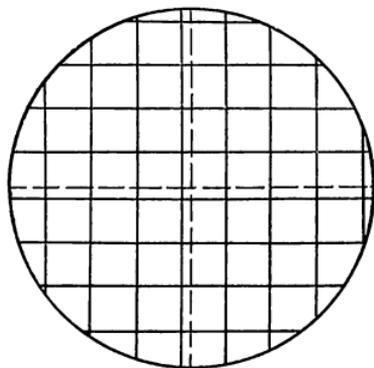


Рис. 58. Вид полировальника с нанесенными полировальными канавками

толщина которой составляет в зависимости от прикладываемого давления от 0,4 до 1,2 мкм, имеет тенденцию оттекать к краям полировальника. Поэтому даже мокрое зеркало, наложенное на свежеприготовленную смолу, может через некоторое время приклеиться к ней накрепко.

Окончательная формовка полировальника проводится после нанесения специальных полировальных канавок (рис. 58). Они выполняют несколько функций. Во-первых, по этим канавкам циркулирует полировальная суспензия, являющаяся постоянным источником свежих зерен полирующего материала и до некоторой степени охлаждающая обрабатываемую поверхность. Во-вторых, и это самое главное, разделенная на отдельные участки (фасетки) поверхность полировальника в силу вязкости смолы обеспечивает независимое изменение формы поверхности отдельных зон зеркала.

Канавки в смоле очень удобно пропиливать обычной ножовкой под струей слегка подогретой воды, чтобы не создавать чрезмерно больших сколов по краям квадратиков. Срезанная смола смывается струей воды и не пристает к инструменту.

Канавки полировальника для выпуклого зеркала телескопа системы Кассегрена таким образом, конечно, не сделать. Тем не менее задача сильно упрощается благодаря сравнительно небольшим его размерам. Канавки можно легко выдавить с помощью тонкой пластинки, один край которой обработан по радиусу кривизны обрабатываемого зеркала.

Какой размер лучше придать фасеткам? Следует иметь в виду, что более крупные квадратики при совместной работе с твердой смолой лучше «держат» форму поверхности зеркала, быстрее убирают зональные ошибки и скорее приводят к хорошей сфере. Для получения плавной асферической поверхности размер фасеток целесообразно уменьшить. Обычно укладывается 6—8 полных квадратиков по диаметру полировальника. Они обязательно должны быть расположены на полировальнике так, чтобы центр диска не совпадал с серединой центрального квадрата, а был ближе к одному из его углов. После пропиливания канавок нужно обколоть лишнюю смолу на боковой грани полировальника.

Если на смоляной поверхности имеются крупные дефекты в виде полостей или сколов, то их лучше сразу исправить. Для этого нужно, держа кусок смолы над изъяном, поднести к ней горящую спичку и дать смоле заполнить дефект, после чего подравнять ее вначале грубо мокрым пальцем, а затем отформовать зеркалом.

Полировальник для главного зеркала с отверстием в центре для телескопа системы Кассегрена практически ничем не отличается от обычного полировальника для телескопа системы Ньютона. Основное различие состоит в том, что центральная его часть не должна работать. Поэтому в нем снимают смолу в виде круга в центре, диаметр которого немного больше или равен диаметру отверстия в зеркале.

Окончательная формовка полировальника проводится в положении, когда зеркало находится на разгрузочном приспособлении. Обильно смазав полировальник полиритом, кладут его на зеркало. Делают несколько коротких штрихов и дают ему возможность спокойно полежать на зеркале при комнатной температуре примерно в течение часа. Изредка полировальник желательно слегка подвигать, добавив, если нужно, немного воды. Изготовленный таким образом полировальник готов к работе.

Полирование по характеру работы во многом напоминает шлифование. В этой связи интересно отметить, что существ-

вует возможность получения сверхтонких (по величине микронеровностей) матовых поверхностей с постепенным переходом от тонкошлифованной к полированной поверхности. Для этой цели используются особо мелкие абразивные порошки с размером зерна около 1 мкм. При этом сверхтонкая матовая структура сохраняет обычное строение рельефного слоя шлифованного стекла, только неровности ее настолько малы, что дают незначительное количество рассеянного света, и по характеру отраженного света такая поверхность близка к полированной обычным способом.

Всю работу можно разбить на два этапа. Во время первого споллировывают матовость. В течение второго добиваются получения нужной формы поверхности. Первый этап проходит обычно значительно быстрее второго. Продолжительность второго этапа может зависеть от целого ряда факторов, а также от умения любителя управлять ими, его опыта и интуиции.

На начальной стадии работы давление на изготовленный нами полировальник, который мы назовем основным, должно быть достаточно большим и составлять около  $10 \div 12$  г/см<sup>2</sup>. Характер движений остается таким же, как и при тонком шлифовании.

Несколько иначе обрабатываются зеркала с отверстием в центре. В этом случае целесообразно использовать исключительно центральный штрих с выносом полировальника в каждую сторону на  $1/4$  радиуса зеркала.

Скорость обработки можно также оставить без изменений. Для увеличения скорости полирования стекла приблизительно в 1,5 раза можно вместо чистой воды применять 1 %-ный водный раствор хлорного железа, хлористого цинка или азотнокислой меди. Использование безводных смачивающих жидкостей, таких как масло, керосин, замедляет процесс полирования в десятки раз.

Перед тем как приступить к полированию главного зеркала, любитель должен иметь в виду следующее. Если заготовка, лежащая на разгрузочном приспособлении, постоянно упирается за счет сил сцепления с полировальником одними и теми же участками своей боковой поверхности в три радиальных упора, то она может приобрести при определенных соотношениях диаметра и толщины крайне нежелательное искажение формы своей поверхности. Неравенство кривизны в отдельных сечениях зеркала — так называемый *астигматизм поверхности* (не путать с абберацией «астигматизм») — приводит к искажению дифракционной структуры изображения даже на оптической

оси системы. Этого можно легко избежать, если увеличить число боковых упоров с трех до шести, расположив их равномерно по краю зеркала на концах трех качающихся коромысел. Иногда используют металлическое толстостенное кольцо (обечайку), кругом охватывающее зеркало с уплотняющей резиновой (или реже войлочной) прокладкой между боковой поверхностью зеркала и обечайкой. Можно, наконец, периодически поворачивать зеркало в процессе полирования.

После окончательной формовки полировальника можно перейти непосредственно к работе. Теперь чистота рабочего места и инструмента приобретают исключительно важное значение, так как споллировывание возникающих царапин требует обычно много времени, за которое можно «посадить» и много новых царапин и легко испортить форму поверхности, если она была уже близка к желаемой. Лишь мельчайшие из этих царапин, сравнимые по размерам с длиной световой волны, обнаруживаемые визуальным в отраженном ярком свете в виде разноцветных нитевидных

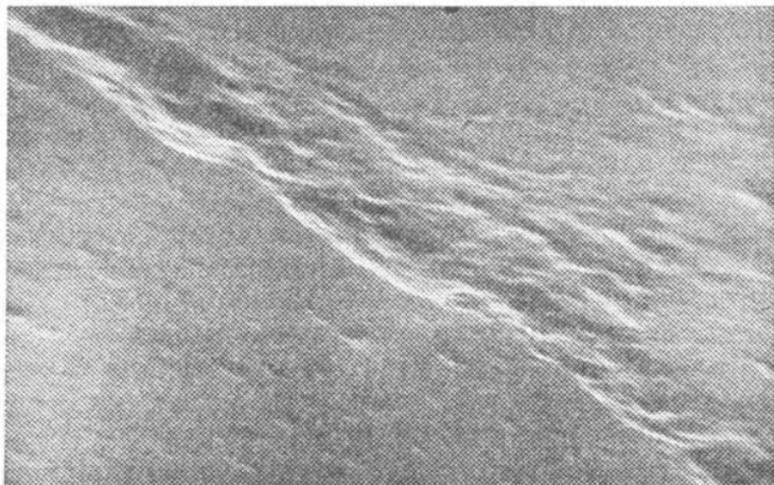


Рис. 59. Электронно-микроскопическая фотография типичной нитевидной царапины («ласина»). Ширина образования около 1 мкм (фото автора)

паутинок и хорошо различимые лишь под электронным микроскопом (рис. 59), неопасны и сравнительно быстро споллировываются. При очень крупных царапинах, заметных невооруженным глазом на просвет, никакое полирование не поможет, и лучше сразу вернуться к тонкому или среднему шлифованию.

Для производительного полирования зеркальной поверхности полирита нужно совсем немного. Совершенно достаточно того его количества, которое окажется на кончике кисти. Вода добавляется понемногу и лишь при подсушке полировальника. Только в этом случае достигается нормальное полирование оптической поверхности с сопутствующим ему характерным звуком (писком). После нескольких минут работы в таком режиме зеркало обычно приобретает уже достаточный блеск, чтобы можно было исследовать форму его поверхности, о чем подробно будет рассказано в гл. 4. По виду полировальника, отмытого от полирита, можно сделать дополнительное заключение о твердости смолы. Если поверхность полировальника не приобрела желтовато-красный оттенок и осталась темного цвета (не удерживает полирующую суспензию), то это указывает на слишком вязкую смолу.

При удачном шлифовании полирование зеркала с самого начала идет «гладко». Его поверхность начинает блестеть во всех точках практически одинаково. Если этого не наблюдается и отдельные зоны зеркала остаются темными даже после получасовой обработки, то вначале нужно повторить этап окончательной формовки полировальника. Если это не поможет, то лучше вернуться к тонкому шлифованию, иначе можно потерять очень много времени на споллирование имеющихся погрешностей поверхности — гораздо больше, чем будет затрачено на их сошлифовывание.

К сожалению, у начинающего любителя форма поверхности зеркала перед полировкой часто бывает отличной от сферической, что связано с отсутствием необходимого опыта

Рис. 60. Наиболее часто встречающийся случай искажения формы поверхности, оставшейся после тонкой шлифовки: 1 — идеальная сферическая поверхность, 2 — поверхность с «ямой» в центре и «завалом» на краю



при определении характера и размера имеющихся искажений формы поверхности. Наиболее типичным является случай, изображенный на рис. 60, т. е. относительно некоторой промежуточной зоны, принимаемой нами условно за сферу, центр зеркала имеет «ямку» (кривизна поверхности меньше). В сочетании с твердой смолой полирование такого зеркала обычно оказывается на начальном этапе

очень непростой задачей. Полировальник в центральном положении цепляется за зеркало, движения его становятся неплавными. Это связано с тем, что за время одного штриха смола не успевает приспособиться к несферической поверхности зеркала, в результате чего неминуемо возникают разные усилия сцепления стекла со смолой. Применение овальных штрихов несколько меняет к лучшему положение дел, но ненамного.

В свое время было предложено довольно эффективное средство, позволяющее резко повысить равномерность хода полировальника в процессе работы [21]. Оно заключается в уменьшении линейных размеров отдельных фасеток полировальника за счет его специальной формовки с помощью какой-либо редкой синтетической ткани, например, кисеи, тюля и т. д. На прогретое зеркало нужно положить кусок смоченной в воде с мылом ткани и прижать разогретым полировальником. После их остывания удалим формовочный материал. Теперь можно заметить, что на поверхности полировальника помимо основных крупных квадратиков-фасеток появилась мелкая сеть фасеток. Следует, однако, отметить, что этим приемом при изготовлении сферического зеркала не следует злоупотреблять. Это связано с тем, что полировальник такого вида очень хорошо удаляет разрушенный матовый слой стекла, но с трудом приводит к получению правильной сферической поверхности. Поэтому таким приемом целесообразно пользоваться на начальной стадии работы, отформовав сеть мелких квадратиков и дав им свободно заплыть в ходе полирования.

Характер совершаемых любителем движений при полировании плоских поверхностей в принципе также мало отличается от движений при тонком шлифовании: штрих центральный и не очень длинный — не более  $1/4$  радиуса склеенного блока или полировальника в каждую сторону; движения плавные и неторопливые.

Размеры зеркала и полировальника любителями в подавляющем большинстве случаев выбираются равными. Если же подходить к этому более строго, то лучше взять иные соотношения. Ориентировочно можно считать, что если полировальник находится внизу, то его диаметр может быть несколько больше диаметра изделия —  $(1,1 \div 1,25)$ . Если полировальник сверху, над зеркалом, относительный диаметр полировальника должен быть несколько уменьшен  $(0,9 \div 1,0$  диаметра изделия). В этом случае края зеркала меньше подвержены такой неприятной ошибке формы поверхности, как «завал» края.

Смолу следует подбирать несколько более твердую, чем это следует с точки зрения опасности посадить царапины. Кстати, царапины на плоском зеркале телескопа системы Ньютона, равно как на вторичном системы Кассегрена, более страшны, чем на главном зеркале. Отчасти это связано с несколько большими производимыми светопотерями, а также со значительным светорассеиванием, вносимым ими. Для полирования плоскостей применяют обычный шашечный полировальник (рис. 58), квадратики которого также располагаются по отношению к центру основания с наклеенными зеркалами несимметрично. В силу малости линейных размеров плоских зеркал, большая диагональ которых редко превышает 80—100 мм, часто оказывается возможным разгрузку как основания, так и полировальника упростить, например, укрепив их на куске резины.

Когда первый этап полирования заканчивается и зеркало постепенно приобретает красивый ровный блеск, нужно перейти к контролю формы получающейся оптической поверхности с целью получения заданной геометрической формы с необходимой точностью. Этому вопросу и посвящена следующая глава.

## ИСПЫТАНИЕ И ДОВОДКА ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### § 1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВОГНУТЫХ ЗЕРКАЛ

Процесс исследования оптической поверхности состоит в том, чтобы оценить форму поверхности с целью выработки таких режимов обработки, применение которых привело бы к уменьшению возникших погрешностей. Это означает, что испытание и доводка оптической поверхности представляет собой единый замкнутый процесс. На рис. 61 изображена структурная схема, иллюстрирующая основные этапы этого процесса.

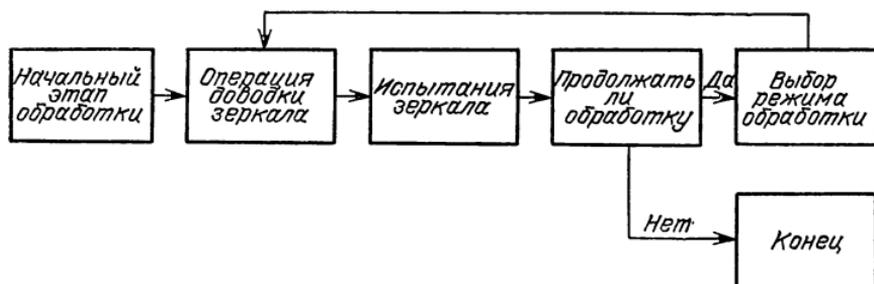


Рис. 61 Структурная схема, иллюстрирующая основные этапы производственного процесса

Наиболее ответственной частью телескопа является главное зеркало. Поэтому с него мы и начнем рассмотрение этих вопросов.

Прежде всего о методах испытания. Впервые метод контроля формы вогнутой оптической поверхности на стадии изготовления предложил в 1856 г. Леон Фуко. До этого оптики-изготовители испытывали свои изделия по звездам, т. е. работали больше вслепую, полагаясь на случайную удачу и свою интуицию. Поэтому и результат работы во многих случаях оказывался далеким от желаемого.

Несмотря на то что теневой метод и его модификации достаточно подробно описаны во многих изданиях, позволю себе еще раз остановиться на некоторых моментах его

практического использования. Суть его заключается в том, что точечный источник света  $s$  помещают вблизи центра кривизны сферического вогнутого зеркала  $1$  и наблюдают его изображение  $s'$ , как это показано на рис. 62. Рядом с изображением источника устанавливают непрозрачный экран с острым краем  $2$ , плоскость которого перпендикулярна оптической оси зеркала. Этот экран носит название *ножа Фуко*. Позади располагается глаз наблюдателя таким образом, чтобы пучок лучей, отраженных от зеркала, полностью попадал в зрачок.

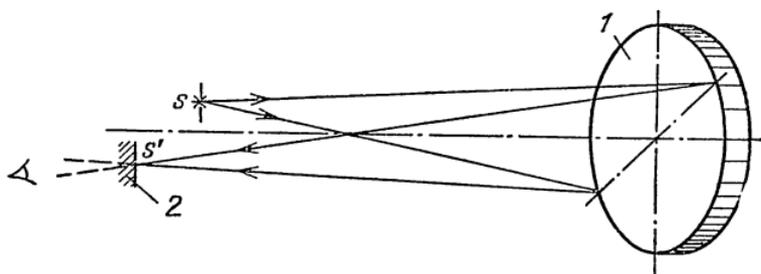


Рис. 62. Схема контроля формы оптической поверхности по методу Фуко

При введении непрозрачного экрана в пучок света, формирующий изображение на поверхности контролируемого зеркала, до этого равномерно освещенной, возникает *теневая картина*, перепад освещенности которой соответствует погрешности соответствующей зоны. При этом глаз аккомодируется на поверхность зеркала. Если нож поместить между идеальным сферическим зеркалом и его фокусом, то теневая картина разделится на две области: темную и светлую, причем первая из них перемещается в том же направлении, что и нож, вводимый в отраженный от зеркала конус световых лучей. Если нож вводится в конус лучей за фокусом, то направление движения тени меняется на противоположное. Наконец, если коснуться ножом геометрического фокуса зеркала, то оно должно внезапно и полностью погаснуть. В действительности «точечный» источник света представляет собой, конечно, хотя и очень маленький, но вполне реальный источник, обладающий действительными размерами. Поэтому фронт волны гаснет не мгновенно, а за то время, которое требуется ножу, чтобы перекрыть изображение источника света. Все зеркало оказывается залито полутенью. Отметим попутно, что данный способ, кроме всего, очень удобен для окончательного определения фокусного расстояния зеркала, так как

в процессе окончательной доводки зеркала положение центра кривизны может измениться на несколько миллиметров. Если определенная зона зеркала имеет какие-либо отклонения формы своей поверхности от сферы, т. е. имеет свой отличный радиус кривизны, то при помещении ножа

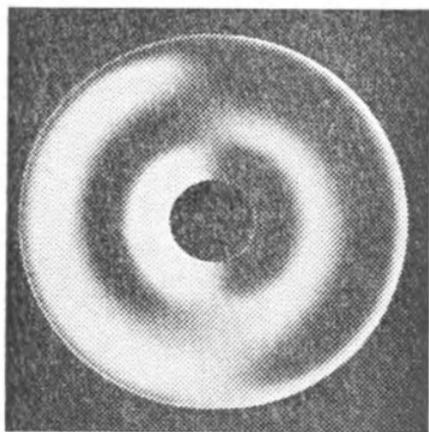


Рис. 63. Теневая картина некачественного зеркала

в определенное положение на оптической оси соответствующая зона гаснет. Конечный размер источника света и дифракционные явления, главным образом на ноже Фуко, приводят к тому, что теневая картина теряет свою четкость, появляются полутона. Более строго, именно граница полутени между светлой и темной областью однозначно соответствует положению ножа в центре кривизны этой зоны.

На практике, особенно у начинающего любителя, на поверхности вогнутого зеркала может существовать много зон с различными радиусами и центрами кривизны (рис. 63). Если погрешности имеют осевую симметрию, то зона, представляющаяся черной в правой половине теневой картины, оказывается светлой в ее левой половине и наоборот. Д. Д. Максотов [2] привел очень удачное сравнение этого явления с позитивным и негативным изображением в фотографии. Если мысленно разрезать теневую картину по вертикальному диаметру (по диаметру, параллельному лезвию ножа), а затем сложить обе половины и рассматривать их «на просвет», то вместо теневой картины мы должны увидеть приблизительно монотонно-темный полукруг.

При перемещении ножа Фуко вдоль оптической оси различные зоны контролируемой поверхности сразу или поочередно затеняются. Интерпретация любой теневой картины оказывается несложной, если представить себе наблюдаемую поверхность, как бы освещенную косыми лучами, причем источник света располагается с противоположной стороны вводимого в конус света края ножа. В этом случае характерный теневой рельеф поверхности правильно отражает ее отклонения относительно сферы сравнения, в центре кривизны которой в данный момент находится нож Фуко. Так как в процессе исследования зеркала нож перемещается вдоль оптической оси, то и тене-

вой рельеф поверхности принимает различные очертания в зависимости от положения ножа. Начинающему любителю важно усвоить, что в общем случае теневая картина не дает абсолютных значений отклонений формы контролируемой поверхности от интересующей, а лишь ее изменения относительно тех зон, которые в данный момент заполнены полутенью.

Кроме этого, теневая картина дает возможность судить не о всей форме поверхности сразу, а лишь в направлении, перпендикулярном кромке ножа. О другом направлении, параллельном кромке ножа, теневая картина не несет никакой информации. По мере удаления сечения от горизонтального направления чувствительность метода падает по синусоидальному закону, в результате чего при любых погрешностях формы поверхности вертикальный диаметр теневой картины (нож расположен вертикально) заполнен ровной полутенью. Этот эффект имеет свои положительные и отрицательные стороны. Например, если погрешности оптической поверхности имеют незональную структуру или различную кривизну во взаимно перпендикулярных направлениях, то в этих случаях метод может оказаться неприменимым, во всяком случае при какой-то определенной ориентации зеркала по отношению к ножу. К положительному достоинству метода можно отнести возможность создания нескольких разновидностей схем контрольного прибора.

Д. Д. Максудов предложил целый ряд усовершенствований классического метода Фуко. В качестве источника света оказалось гораздо удобнее брать не освещенное отверстие, а узкую щель, так как каждая ее точка создает изображение одной и той же формы и на одинаковом расстоянии от ножа. В результате мы имеем огромный выигрыш в освещенности наблюдаемой картины, поскольку через щель проходит больше света, чем через отверстие.

Другое усовершенствование носит название «первого метода щели и нити». Суть его состоит в том, что перекрытие изображения щели осуществляется с помощью тонкой нити, вместо того чтобы ту же операцию производить с помощью ножа. Хотя содержание теневого метода остается прежним, внешний вид теневой картины оказывается существенно другим (рис. 64). Она представляется в следующем виде: зоны, в центрах кривизны которых находится в данный момент нить, кажутся темными; кроме этого, аналогично методу испытания с ножом, диаметр теневой картины, параллельный нити, залит ровной полутенью. В этом

направлении теньевая картина также никакой информации не несет. Все остальное поле зеркала остается светлым. По сравнению с классическим этот метод особенно выигрывает при исследовании зеркал, форма поверхности которых существенно отличается от сферы. Это связано с тем, что поскольку теньевая картина в принципе обладает осевой

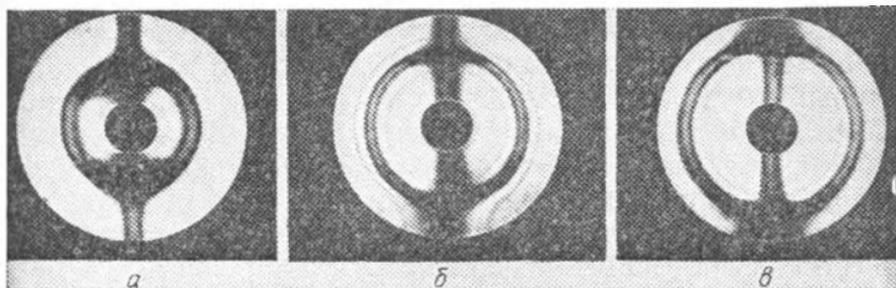


Рис. 64. Теньевые картины, полученные «методом нити»: *а* — нить в фокусе зоны, сравнительно близкой к центру зеркала (0,6 его радиуса), *б* — нить в более далекой зоне (0,7 радиуса), *в* — нить в зоне 0,8 радиуса

симметрией, появляется возможность более уверенно установить нить в центре кривизны исследуемой зоны.

Если нить несколько сместить вдоль оптической оси относительно фокальной плоскости, а затем сдвинуть в перпендикулярном направлении, в то же время оставляя ее в пучке отраженных от зеркала лучей, то в случае идеального сферического зеркала форма тени нити остается прямой линией. Любое ее искривление в ту или другую сторону укажет на наличие определенной погрешности поверхности зеркала. Проведенные исследования показывают, что в случае малых сдвигов нити с оптической оси и достаточного удаления ее от положения центра кривизны центральной зоны форма нити непосредственно воспроизводит зависимость фокусного расстояния некоторой зоны зеркала от радиуса этой зоны. На рис. 65 показан вид теневой картины при испытании зеркала этим так называемым «вторым методом щели и нити». Следует отметить, что при испытании зеркала «вторым методом» исследуется не вся поверхность зеркала, а лишь кольцевая зона, размеры которой определяются внешним диаметром зеркала и некоторой окружностью с радиусом, равным расстоянию от центра зеркала до точки пересечения тени нити с горизонтальным диаметром зеркала. Наиболее оптимальное значение этого радиуса колеблется в пределах от  $1/6$  до  $1/8$  диаметра зер-

кала. При расположении нити на большем расстоянии от оптической оси начинает сказываться нелинейность зависимости формы тени нити от формы поверхности зеркала. При меньшем расстоянии падает чувствительность метода.

По простоте устройства и схемной реализации метод Фуко занимает особое положение среди других оптических

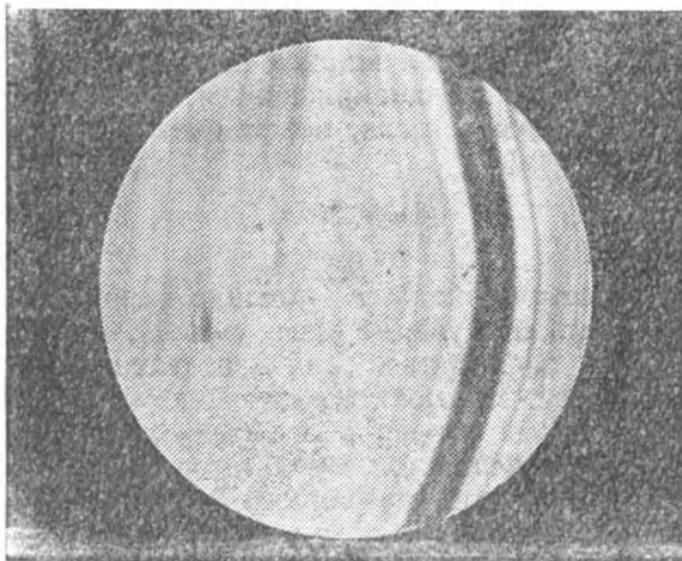


Рис. 65. Форма тени нити, непосредственно воспроизводящая форму исследуемой поверхности

методов. Одним из основных его достоинств является высокая точность. Д. Д. Максудов уделил этому вопросу немало места в своей монографии [2]. Он предлагает следующую оценку возможности теневого метода в смысле его предельной чувствительности. Она составляет на отражающей поверхности зеркала величину порядка  $\frac{\lambda}{50} \dots \frac{\lambda}{100}$ , что соответствует деформации волнового фронта  $\frac{\lambda}{25} \dots \frac{\lambda}{50}$ .

Само собой разумеется, столь высокая чувствительность проявляется лишь при соблюдении ряда условий. Прежде всего она зависит от степени перекрытия дифракционной границы изображения щели ножом Фуко. Светящаяся щель в теневом приборе должна иметь точно прямолинейную границу. Любые ее неровности, а также зазубрины, непрямолинейность самого лезвия ножа Фуко приводят к тому, что даже при оптимальных условиях перекрытия

уменьшается контраст теневой картины и соответственно падает чувствительность метода. Оптимальные условия перекрытия наступают тогда, когда лезвие ножа установлено строго параллельно границе изображения щели, причем здесь имеется в виду его пространственная ориентация.

Наибольшую чувствительность метод приобретает при использовании достаточно узких щелей, сравнимых по размеру со структурой дифракционного изображения. В этом случае контраст теневой картины получается максимальным. Необходимая ширина щели связана с диаметром зеркала и его радиусом кривизны и, с учетом спектральной чувствительности глаза, может быть найдена по формуле

$$\delta = 4,88\lambda \frac{r}{D}, \quad (70)$$

где  $D$  — диаметр зеркала,  $r$  — радиус кривизны зеркала.

Делать щель еще уже не имеет смысла, так как в этом случае будет наблюдаться лишь падение освещенности теневой картины. Изготовить такую щель и проконтролировать полученный размер в любительских условиях не просто. Обычно неплохих результатов можно добиться, если на кусочке алюминированного стекла аккуратно сделать тонкую царапину лезвием остроотточенной бритвы. Оценить полученный размер можно на любом микроскопе, снабженном окулярным микрометром. Необходимо, чтобы микрометр был градуирован в соответствии с оптической силой микрообъектива, так как сам по себе окулярный микрометр измерит не ширину щели, а лишь ширину ее изображения. Если щель окажется шире размера дифракционной структуры ее изображения, то предельная чувствительность теневого метода несколько снижается. В связи с тем, что дифракционная граница изображения более широких щелей не меняет своего характера, вместо источника света в виде отверстия или узкой щели используют источник, представляющий собой равномерно освещенный так называемый «полубесконечный прямоугольник». Разумеется, на практике используется прямоугольник конечной длины, с той лишь разницей, что она (длина) обычно превышает величину  $\delta$  приблизительно в тысячу раз. Назовем размер прямоугольника, параллельный кромке ножа, высотой. Она выбирается такой же, как длина щели в классическом методе Фуко. Высота прямоугольника определяется размером так называемой изопланатической области изображения, волновые aberrации в которой не пре-

вышают некоторого заданного предела, в данном случае критерия Рэлея. Не вдаваясь в подробности, укажем лишь, что допустимый размер прямоугольника (или щели), особенно для светосильных зеркал, не должен превышать 1 ... 1,5 мм.

Выше уже говорилось о важности строгой ориентации щели и ножа параллельно друг другу. Необходимость такой достаточно сложной в реализации процедуры отпадает, если воспользоваться устройством, изображенным на рис. 66. По мере передвижения устройства с ножом Фуко вверх изображение ( $s'$ ) протяженного источника ( $s$ ) становится всё уже, и в пределе возникает теневая картина поверхности исследуемого зеркала.

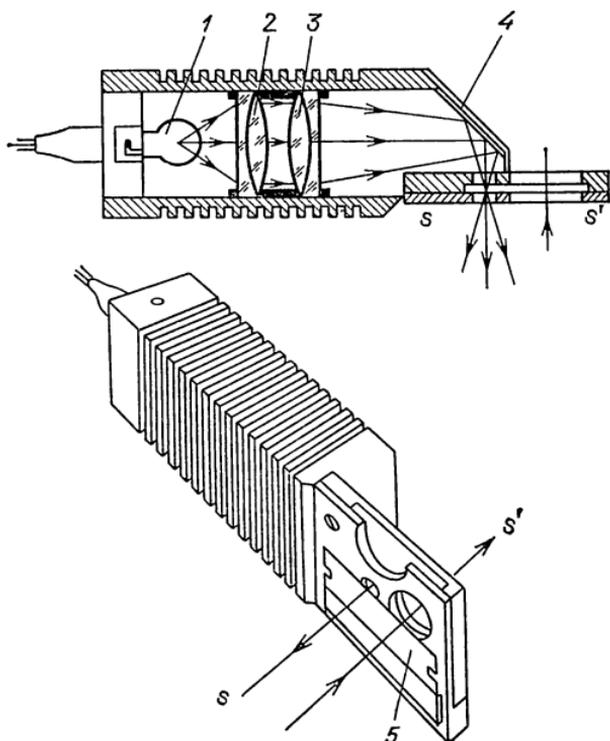


Рис. 66. Схема устройства для контроля по методу ножа Фуко: 1 — лампа, 2, 3 — осветительная система, 4 — зеркало, 5 — нож Фуко

Если щель и ее изображение далеко отстоят друг от друга, то изображение щели оказывается испорченным аберрациями кома и астигматизм, и тогда анализ погрешностей теневой картины становится затруднительным. Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы по возможности сблизить источник света и его изображение. Допуск на смещение

$D:f'$	$2\Delta_y$ , мм	$D:f'$	$2\Delta_y$ , мм
1:2	0,6	1:6	15
1:3	1,9	1:8	36
1:4	4,5	1:10	71
1:5	9	1:15	240

источника света перпендикулярно оптической оси  $\Delta_y$  можно оценить с помощью формулы, приведенной в книге Д. Т. Пуряева [18],

$$\Delta_y \leq 256 \frac{l}{A^3}, \quad (71)$$

где  $A=D/f'$  — относительное отверстие зеркала,  $l$  — допустимая деформация волнового фронта.

Пусть нам предстоит исследовать зеркало диаметром 300 мм и светосилой  $\frac{D}{f'} = 1:4$  из центра кривизны. Зададимся точностью определения деформации волнового фронта  $l < \frac{\lambda}{4}$ , где  $\lambda=0,555$  мкм. Тогда допуск на смещение точечного источника света перпендикулярно оптической оси вблизи центра кривизны будет  $\Delta_y \approx 2$  мм. Соответственно максимальное расстояние между источником света и его изображением будет равно удвоенному значению  $\Delta_y$ . Составим табл. 16 предельных значений  $2\Delta_y$  в зависимости от относительного отверстия зеркала. Как видно из таблицы, при контроле светосильных зеркал допустимы лишь очень небольшие расстояния между источником света и его изображением.

Если вспомнить, что методом Фуко невозможно обнаружить астигматизм, одна из осей симметрии которого расположена параллельно лезвию ножа, то оказывается возможным использовать это важное свойство в очень интересной схеме контроля, где в качестве светоделительного узла применяются разделительный кубик или плоскопараллельная полупрозрачная пластинка (рис. 67). При такой конструкции как источник света, так и его изображение находятся на одной оптической оси. К сожалению, при этом неизбежно вводится значительный хроматизм изображения. Поэтому рекомендуется в оптической схеме использовать

сине-зеленый светофильтр, повышающий контрастность теневой картины.

Любитель при конструировании своего теневого прибора должен обязательно позаботиться о том, чтобы глаз наблюдал теневую картину в условиях высокой контрастной чувствительности. Если освещенность теневой картины на сетчатке глаза окажется недостаточной, то можно просто не заметить отдельные погрешности поверхности. При

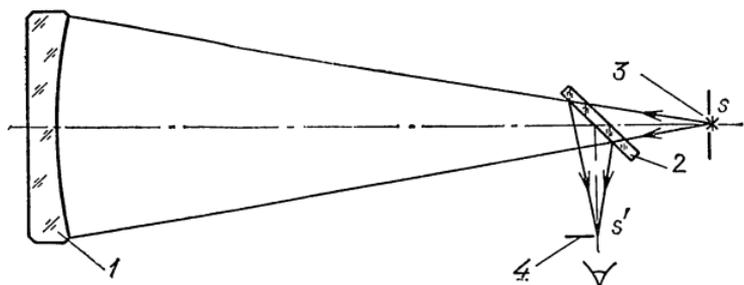


Рис. 67. Схема теневого прибора для контроля на оптической оси системы: 1 — зеркало, 2 — светоделитель, 3 — источник света, 4 — нож Фуко

использовании в качестве источника света кинопроекторных или галогенных ламп освещенность теневой картины при исследовании одиночного полированного зеркала обычно бывает вполне достаточной и позволяет производить испытания зеркала даже днем при очень узких щелях «дифракционной» ширины. При широких щелях («полу-бесконечный» прямоугольник) иногда приходится применять нейтральный фильтр, чтобы ослабить световой поток и защитить глаз от переутомления. Контрольные схемы, содержащие две полированные поверхности, требуют применения источников света повышенной яркости, например, дуговых ламп высокого и сверхвысокого давления или специальных схем подсветки.

Существует большое разнообразие вариантов конструктивного исполнения теневого прибора. Мы приведем лишь два из них. Они с успехом могут быть изготовлены любителями и обеспечить требуемую чувствительность теневого метода. При создании первого за основу взята конструкция диапроектора «Свет», однако можно использовать другой подобного типа. Штатный объектив вынимается и на его место устанавливается через переходное кольцо слабый микрообъектив от микроскопа, имеющий увеличение 8—10 $\times$  и апертуру 0,2 ... 0,3 (эти данные написаны на корпусе объектива). «Точечный» источник — щель, прорезанная на

куске металлической фольги, — закреплен в пустой рамке для диапозитива и вставлен в соответствующее посадочное гнездо. На корпус микрообъектива надеваются оправка, в которой установлено маленькое плоское зеркало. Оптическая схема прибора приведена на рис. 68. Внешний край плоского зеркала выполняет функции ножа Фуко. В случае необходимости на втулке может быть закреплена рамка с нитью,

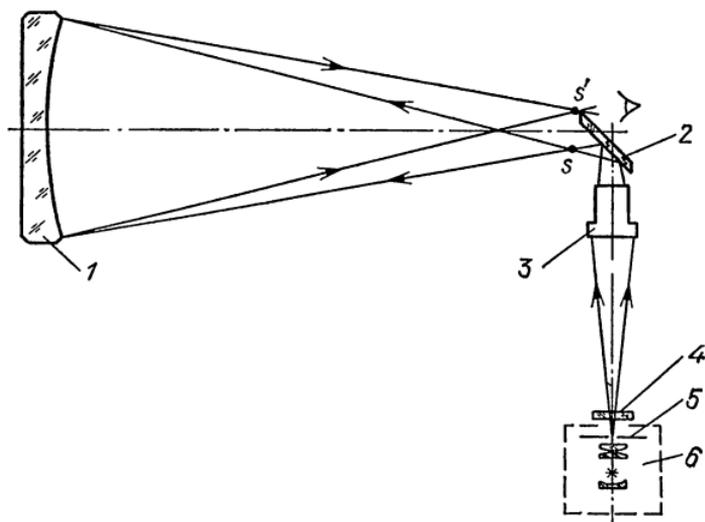


Рис. 68. Схема теневого прибора с плоским зеркалом: 1 — зеркало, 2 — плоское зеркало, 3 — микрообъектив, 4 — светофильтр, 5 — «точечный» источник света, 6 — осветительная система

Оптическая осветительная система, состоящая из двух плосковыпуклых линз и рефлектора, достаточно равномерно подсвечивает щель по всей ее длине, равной около 10 мм, и шириной порядка 0,1 мм. Микрообъектив строит ее изображение в непосредственной близости от наклонного плоского зеркала, в результате чего ошибки его поверхности практически не влияют на вид теневой картины исследуемого зеркала. При таком методе испытаний в качестве «точечного» источника используется не сама щель, а ее действительное изображение, как бы подвешенное в воздухе. Если расстояние от опорного торца микрообъектива до щели, закрепленной в рамке для диапозитива (рабочее расстояние), составляет 147 мм, то размеры изображения щели можно сразу определить через увеличение микрообъектива. В конкретном случае они при 10-кратном объективе составляют: длина 1 мм, ширина 0,01 мм. Совершенно понятно, что изменение в небольших пределах рабочего расстояния приведет соответственно к пропорциональному из-

менению масштаба изображения. Это можно использовать для получения требуемой ширины «точечного» источника. Следует предупредить читателя, что иногда встречаются микрообъективы с иным рабочим расстоянием — до 200 ... 250 мм, для которого и приведено увеличение, нанесенное на корпусе. Поэтому рабочее расстояние лучше определить экспериментально путем измерения действительной длины изображения щели.

Оптическая схема с микрообъективом и плоским зеркалом удобна еще тем, что позволяет очень просто добиться пространственной параллельности изображения щели внешнему краю плоского зеркала. Действительно, при вращении объектива вокруг его оптической оси совместно с плоским зеркалом изображение щели также совершает вращательное движение в плоскости, в которой лежит нож Фуко. В данном случае ситуация сходна с той, которая может возникнуть при наклоне одной рамки со щелью. Тем не менее в предложенном варианте нужного результата удастся достигнуть гораздо проще и увереннее.

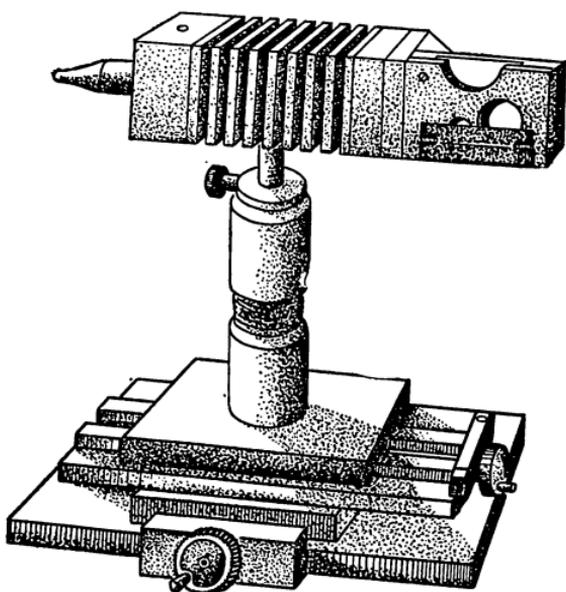


Рис. 69. Общий вид прибора для контроля по «методу ножа Фуко»

Если поверхность испытуемого зеркала еще сохраняет остатки матовости, то непосредственный поиск изображения щели может оказаться слишком утомительным для последующего анализа теневой картины. Поэтому возможность

быстрого съема рамки со щелью позволяет производить поиск положения светового «зайчика» в условиях высокой освещенности сетчатки глаза, что является очень важным еще и для дневных наблюдений.

Другой вариант прибора для контроля по методу ножа Фуко показан на рис. 69. В качестве «точечного» источника света здесь используется устройство, изображенное на рис. 66. Расстояния между оптическими элементами конструкции прибора должны быть подобраны таким образом, чтобы тело накала лампы проектировалось осветительной системой в плоскость протяженного источника.

Во всех случаях «точечный» источник света должен иметь возможность плавно перемещаться в пространстве по трем взаимно перпендикулярным направлениям, что достигается применением микрометрических винтов, причем в одном из направлений — вдоль оптической оси зеркала — необходимо использовать отсчетное устройство с соответствующей ценой деления (см. табл. 2). В любительских условиях очень часто для этих целей используется индикатор часового типа.

Установка для исследования зеркала должна располагаться на солидной устойчивой опоре, потому что в противном случае неизбежные вибрации лезвия ножа или нити относительно изображения щели делают наблюдения столь утомительными и неточными, что о какой-либо высокой чувствительности теневого метода говорить уже не приходится.

Чрезвычайно сильно на отчетливую видимость теневой картины влияют турбулентные потоки воздуха в помещении. Мощные конвекционные потоки большей частью возникают от близко расположенных отопительных устройств, от плохо закрытого окна или двери, особенно в зимнее время. В некоторых случаях при исследовании крупных зеркал, имеющих по необходимости большой радиус кривизны, бывает трудно подобрать в домашних условиях помещение, в котором можно было бы обеспечить высокую однородность воздуха на пути лучей. Так, при исследовании 600-миллиметрового зеркала автору приходилось самому вместе с теневым прибором находиться в одном помещении, а зеркало устанавливать в коридоре. В этом случае из-за сильных конвекционных потоков на зеркале регистрировалась картина «бегущих теней», не имеющая ничего общего с реальным искажением формы оптической поверхности. Для их устранения приходилось изолировать от остальной массы воздуха рабочее пространство от зеркала до

теневого прибора, для чего на ряды проволоки, натянутой между ними, накрывались листы газетной бумаги. Турбулентные потоки, кроме того, могут возникать еще от мощной лампы теневого прибора и от присутствия самого наблюдателя.

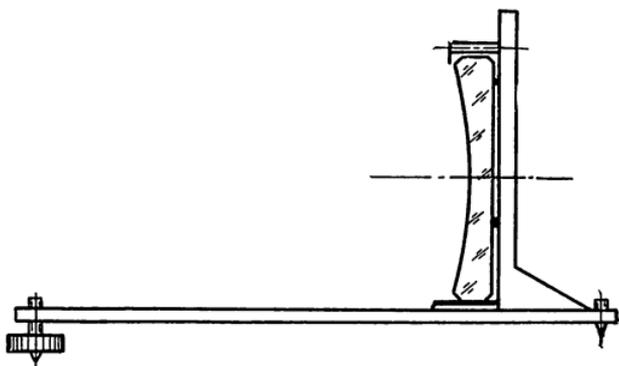


Рис. 70. Испытательная рамка зеркала

Перед тем как перейти к испытанию зеркала, нужно позаботиться об его удачном расположении в контрольной схеме. Зеркала небольших и средних размеров удобно размещать на испытательной рамке, как показано на рис. 70. Рамка может быть выполнена из дерева или металлических уголков. Для увеличения устойчивости задние опорные

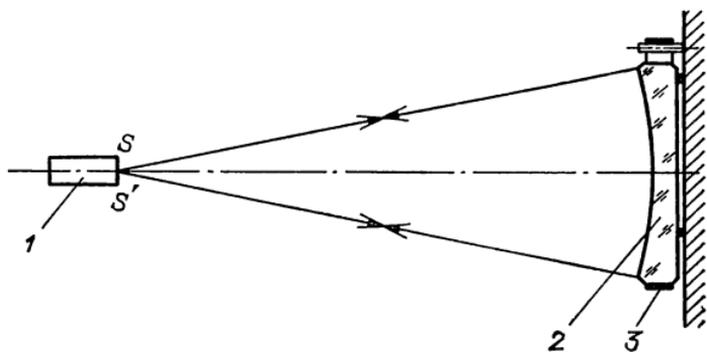


Рис. 71. Схема испытания зеркала на ремне: 1 — теневого прибора, 2 — зеркало, 3 — поддерживающий ремень

ножки лучше вынести несколько назад. Вращением передней опоры добиваются предварительной грубой ориентации оптической оси зеркала в направлении на нож или нить теневого прибора.

Крупные зеркала лучше подвешивать на прочном ремне, ширина которого приблизительно соответствует толщине зеркала (рис. 71). В этом случае удастся более рав-

номерно распределить нагрузки, действующие в толстой массе стекла. Испытательный стенд с зеркалом помещается на высоте около 1 м от пола. Контролируемое зеркало своей задней поверхностью касается трех направляющих винтов с наклеенными на их головки кусочками кожи или плотными резиновыми прокладками. Они позволяют осуществить предварительную ориентацию зеркала и в дальнейшем сильно упростить процесс юстировки при проведении контрольных испытаний, конечно, при условии, что теневой прибор всегда находится в одном месте. Внутреннюю поверхность ремня целесообразно смазать тальком или другим аналогичным ему материалом.

## § 2. ПОЛУЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ПРАВИЛЬНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Грубое полирование (снятие мата) не обеспечивает, как указывалось ранее, высокой точности оптической поверхности. Она достижима лишь на последних стадиях обработки стекла. В зависимости от целого ряда условий вязкость оптической смолы, характер и скорость движений инструмента и заготовки по-разному влияют на окончательный результат работы. До сих пор не создана единая теория, позволяющая связать их постоянно изменяющиеся в процессе работы характеристики с ожидаемыми изменениями формы поверхности. Поэтому все во многом зависит от интуиции и опыта работающего. Тем не менее соблюдение определенных требований позволит проще и быстрее добиться желаемого результата.

Для получения правильной сферической поверхности очень большая роль отводится вязкости полировальной смолы. В этом смысле оказывается выгодным применять более твердую смолу. Она, как говорят, лучше «держит» форму поверхности. Это происходит из-за того, что за время одного штриха смола не успевает видоизменить свою форму настолько, чтобы все ее точки оказывались в контакте со стеклом. Поэтому сильнее всего сполниваются возвышенные участки.

Длина штриха — нормальная, не более  $1/3$ — $1/4$  радиуса зеркала в каждую сторону. Увеличенный штрих приводит к «завалу» на краю, укороченный — к приподнятому краю. Форма штриха — лучше всего чередование прямолинейного движения с центральным положением полировальника с криволинейным штрихом, о котором упомина-

лось выше (см. рис. 49). Такие сочетания движений позволяют уменьшить опасность возникновения «завала» на краю зеркала, так как одной из причин его возникновения является прерывистость движений полировальника (зеркала) относительно зеркала (полировальника) при прямолинейном штрихе. В любительских условиях этот эффект бывает более ярко выражен в силу малых относительных вращательных движений зеркала и полировальника, особенно при немеханизированном способе обработки. Кроме этого, криволинейный штрих при небольшом смещении центров зеркала и обрабатывающего инструмента очень полезен для уничтожения всевозможных зональных ошибок — валиков, канавок.

Оценим размеры и характер имеющихся погрешностей оптической поверхности с помощью теневого прибора, используя для этого нож Фуко. Если характер поверхности имеет вид, подобный изображенному на рис. 63, то нужно сделать ее более плавной, сгладить имеющиеся неровности. В этом случае не следует, как иногда советуют, применять местную ретушь — сполирование кольцевого валика или бугра с помощью маленького полировальника. Такие погрешности являются следствием неправильного полирования, и нужно постараться выявить причину их возникновения, чтобы они не появлялись в дальнейшем. Вместе с тем местная обработка оптической поверхности еще не обеспечивает ее необходимую плавность. В результате после работы получается ряд мелких местных ошибок, также подлежащих сглаживанию. Вообще говоря, местная обработка зеркал — работа, прямо скажем, деликатная, и ее лучше не использовать. Этот метод применяют, как правило, на заключительной стадии обработки крупных зеркал, общая форма поверхности которых уже соответствует расчетной. Как «убрать» зональные ошибки, уже сказано: твердая смола в сочетании с криволинейным и нормальным штрихами.

Обратим внимание на характер отклонения тени от прямолинейности, а именно прямолинейность, как мы помним, соответствует идеальной сферической поверхности при испытании из центра кривизны. В предфокальном изображении прогиб от центрального диаметра говорит о наличии «ямы» в центре зеркала, выпуклость к центру — о наличии «бугра». Изгиб края тени от центрального диаметра свидетельствует о приподнятом крае, к центральному диаметру — о заваленном крае. Если заваленная кольцевая зона невелика по размеру — 1—2 мм, то принято гово-

ритель о «сорванном» крае. В зафокальном изображении картина будет обратной.

Существуют два основных приема изменения кривизны поверхности. Это *формовка* и *подрезка* полировальника. Формовка состоит в том, что на поверхности полировальника выдавливается углубление определенной формы, рассчитанной таким образом, чтобы кривизна оптической поверхности изменялась по определенному закону. Этот метод целесообразно использовать для получения асферических поверхностей — параболических, гиперболических и т. п. Для исправления же погрешностей оптической поверхности его применение невыгодно из-за того, что часто бывает очень сложно подобрать ту желаемую форму, которая способствовала бы плавному уменьшению погрешностей на поверхности изготавливаемого зеркала. В процессе работы затруднительно вносить коррективы в отформованную поверхность полировальника. Переформовка же требует большой затраты времени и труда.

Более удобной и гибкой в работе является подрезка полировальника, которая в наиболее простом случае заключается в сцарапывании или соскабливании определенных участков полировальника с целью уменьшения поверхности его соприкосновения с зеркалом. Подрезка площади полировальника способствует равномерному «течению» смоляной подложки за счет понижения поверхности, прилегающей к сцарапанным участкам полировальника, в силу того, что смола стекает в эти углубления, а также благодаря хорошему удалению отходов полирования и более удачному распределению полирующей суспензии.

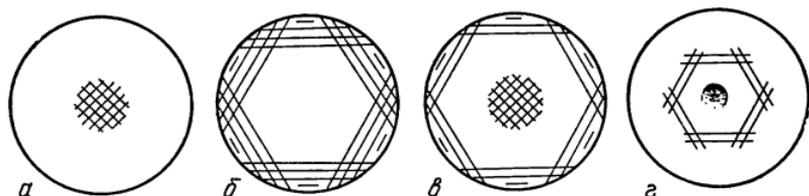


Рис. 72. Виды подрезки полировальника

В том случае, если необходимо усилить или ослабить срабатывание краевой или центральной зоны, применяется зональная подрезка. Подрезка центральной зоны полировальника (рис. 72, а) замедляет обработку центральной зоны зеркала, так как действующая площадь полировальника в центре уменьшается, а удельное давление на краю увеличивается и, следовательно, срабатывание краевой

зоны усиливается. Подрезка краевой зоны усиливает срабатывание центральной зоны зеркала (рис. 72, б). Для устранения «ямы» в центре зеркала и заваленного края применяется подрезка, приведенная на рис. 72, в; вид подрезки для устранения «бугра» в центре и приподнятого края дан на рис. 72, г. Можно рекомендовать некоторые основные приемы, позволяющие активно воздействовать на изменение формы оптической поверхности зеркала, находящегося лицевой стороной вверх. Для устранения «ямы» — подрезать центральную зону полировальника, уменьшить давление на полировальник, увеличить скорость вращения зеркала или в самом простом случае скорость обхода вокруг него, уменьшить число штрихов полировальника в единицу времени, немного увеличить длину штриха. Для устранения «бугра» — подрезать краевую зону полировальника, увеличить давление на полировальник, уменьшить скорость вращения зеркала, увеличить число штрихов полировальника в единицу времени, уменьшить длину штриха.

Одним из самых неприятных дефектов оптической поверхности является «завал» края. Он может возникнуть от целого ряда причин, частично уже рассмотренных выше, «выведение» же его подчас связано со значительными трудностями. Совершенно справедливо замечают некоторые, говоря, что «завал» легче предотвратить, чем устранить. Для этого прежде всего нужно подскоблить внешнюю зону

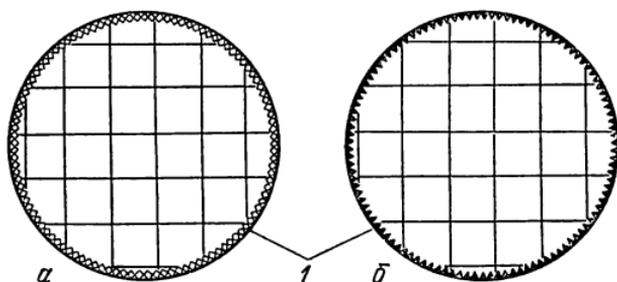


Рис. 73. Способы устранения «завала» края: *а* — соскабливание внешней зоны полировальника, *б* — специальная формовка; 1 — участки, с которых удалена смола

полировальника (рис. 73, *а*) или сделать более долговременную формовку (рис. 73, *б*). Возможное увеличение кривизны поверхности этой зоны легко устраняется увеличением длины штриха. Еще раз отметим, что при увеличенном диаметре полировальника по сравнению с зеркалом внешняя зона зеркала будет срабатываться интенсивнее, а

общая кривизна поверхности станет уменьшаться (формообразование пойдет на «бугор»). Если размер полировальника уменьшить, то внешняя зона будет срабатываться меньше. С этой целью диаметр полировальника выбирают равным 0,9 ... 1,0 диаметра зеркала. Имеющийся небольшой «завал» или «срыв» можно попытаться убрать коротким криволинейным штрихом с помощью неподрезанного полировальника и очень вязкой смолы. В этом случае ширина заваленной зоны постепенно уменьшается, завал превращается в «сорванный» край и затем сходит на нет, хотя в процессе работы он по своей величине относительно остальной поверхности может и возрасти. В некоторых случаях при большой величине погрешности приходится переходить на очень укороченный штрих по хорде. Таким образом, удастся убрать завал при обработке стекол средней твердости типа К 8 или иллюминаторного стекла. Для твердых стекол типа ЛК5, СО-115 этот прием малоэффективен. Если завал образовался на очень узкой зоне, порядка 1—2 мм, то его можно «убрать» соответствующим увеличением размера фаски на краю зеркала.

«Завал» или «срыв» края нужно отличать от дифракционного отклонения лучей на краю зеркала, которое к действительным погрешностям формы поверхности не имеет никакого отношения. Дифракционный эффект на темном сегменте зеркала проявляется в виде узкого светлого ободка, а на освещенном фоне зеркала аналогичен сорванному краю. Для выявления действительной природы загиба концов тени к центральному диаметру (в предфокальном изображении) достаточно укрепить с помощью пластилина концентрично с контролируемым зеркалом узкое кольцо, вырезанное из плотной бумаги или изготовленное из проволоки. Его диаметр должен быть на 1—2 см меньше, чем диаметр зеркала. Так как величина дифракционного эффекта в обоих случаях должна быть одинакова, более сильное его проявление на краю зеркала свидетельствует о том, что край «сорван».

Если форма тени близка к прямой, можно определить размер погрешности формы поверхности. Для этого используется метод продольных аберраций. Перемещая нож Фуко вдоль оптической оси, измеряют продольные аберрации зеркала  $\Delta s'$ , соответствующие «серой» теневой картине для данной зоны. В этом случае нас интересует полная продольная аберрация между центральной и краевой зонами зеркала.

В ходе полирования различные участки поверхности зеркала нагреваются, притом неравномерно. Если выбранное стекло для астрономического зеркала обладает малым коэффициентом температурного расширения, то форма его поверхности практически не искажается, и оно может быть подвергнуто контролю сразу после завершения очередного сеанса полирования. Для иных марок стекол требуется определенное время, чтобы вся масса стекла приняла температуру окружающей среды. Оно зависит от размера зеркала, характеристик оптического стекла и находится в пределах от нескольких минут до нескольких десятков минут.

Вопрос о точности изготовления совершенной оптической поверхности сферического зеркала подробно изложен в гл. 2 (см. табл. 2 и примеры 1, 2), и поэтому здесь его касаться не будем. Важно лишь еще раз подчеркнуть, что если относительный фокус зеркала удовлетворяет нижней границе неравенства (24), то форма тени может быть либо прямой линией, либо уклоняться в сторону параболоида, т. е. в предфокальном изображении вогнутостью своей направлена от центрального диаметра (рис. 65). В менее критичном случае форма тени может соответствовать сплюснутому сфероиду — незначительная выпуклость тени к центральному диаметру.

Если погрешность поверхности больше допустимой, то полировальник соответствующим образом подрезается. При этом нужно учесть, что даже в том случае, если поверхность полировальника вновь отформована, он продолжает еще некоторое время работать в прежнем режиме. Это связано с тем, что зернам полирующей суспензии требуется определенное время, чтобы внедриться на участке, где была соскоблена смола.

В заключение готовое зеркало имеет смысл проверить на присутствие возможного астигматизма поверхности. Для этого в центре кривизны исследуемого зеркала нужно поместить вместо щели круглое отверстие, диаметр которого должен обязательно удовлетворять условию (70). Вместо ножа Фуко устанавливается окуляр, фокусное расстояние которого в миллиметрах численно должно равняться удвоенному значению относительного фокусного расстояния будущего зеркала или быть меньше его. Легко определить, обладает ли окуляр достаточным увеличением: это будет в случае, когда в изображении отверстия видна дифракционная структура. В случае небольшого астигматизма изображение оказывается вытянутым в овал. Хотя

визуальная оценка сплюснутости дифракционного диска слишком примитивна и неточна, следует все же указать, что если большая ось овала превышает его малую ось не более чем на 10 ... 15 %, то качество изображения заметным образом страдать не будет, и дальнейшая обработка не потребуется. Сильный астигматизм делает зеркало непригодным для работы.

Исправление астигматизма состоит в выявлении причины его возникновения и в последующей переполировке зеркала. Эта погрешность формы поверхности может возникнуть от целого ряда причин. Обычно она происходит от неправильной разгрузки зеркала, нарушения режимов шлифования и полирования. Следует отметить, что астигматизму чаще подвержены зеркала более крупных размеров. Именно поэтому при их заводском изготовлении специально оговаривается наряду с точностью обработки предельный допуск на астигматизм поверхности.

### § 3. ПОЛУЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

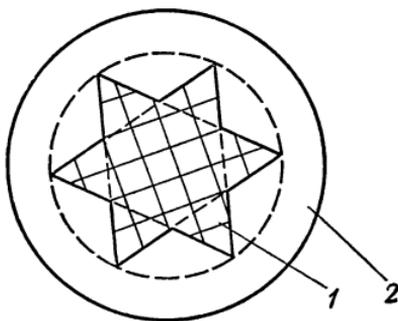
Наибольшее практическое распространение в любительской практике, да, пожалуй, и в профессиональном астроприборостроении, получила параболическая поверхность в силу своей способности строить идеальное безаберрационное, с точки зрения теории, изображение бесконечно удаленного источника света на оптической оси.

Как известно, подобную асферизацию можно получить тремя путями: углублением середины зеркала, плавным «заваливанием» всей поверхности от центра к краям и получением одновременно завала края и углубления центра. Во всех случаях безаберрационные на оптической оси поверхности будут отличаться друг от друга значением радиуса кривизны при вершине. Наиболее простым и доступным для любителя является первый путь, хотя в этом случае приходится снимать больше стекла, чем при параболизации от некоторой промежуточной зоны.

Для обработки изготавливается еще один дополнительный полировальник меньшего размера — в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с основным. Понятно, что эту отливку целесообразно сделать заранее вместе с остальными после грубой шлифовки зеркала. Вначале она вся покрывается слоем смолы, вязкость которой для этих целей может быть значительно меньше, чем у смолы основного полировальника. Затем смола формуется. Поверхность полировальника, пред-

назначенного для асферизации зеркала, должна иметь звездчатую форму. Она представляет собой правильную шестиконечную звезду, составленную из двух равносторонних треугольников, вписанных в окружность, соответствующую размеру меньшего полировальника (рис. 74). Формовку лучше делать по возможности более толстым материалом, например, картоном, чтобы не повторять ее многократно в процессе работы. После этого в смоле пропиливают

Рис. 74. Форма полировальника для параболизации зеркала: 1 — поверхность смолы, 2 — размер основного полировальника



ножовкой канавки, следя за тем, чтобы они также получились асимметричными по отношению к центру полировальника.

Если обрабатывается зеркало с «дыркой» в центре, то и в этом случае в центре полировальника снимается смола в виде круга соответствующего ей размера. Следует все же заметить, что гораздо лучше «слушается» полировальника сплошная поверхность зеркала, без отверстия в центре. Поэтому было бы правильно, пожалуй, с самого начала пойти по другому пути и не удалять из отверстия в главном зеркале вырезанный блок стекла, а оставить его приклеенным на защитном стекле. Чтобы шлифующе-полирующий материал не скапливался в сделанной прорези, ее до начала обработки зеркала заполняют мелкими древесными опилками почти до самого верха и окончательно замазывают шов гипсом. После затвердения гипса его покрывают водостойким лаком. Уровень загипсованного шва должен быть ниже обрабатываемой поверхности на 1—2 мм.

Полирование производится исключительно центральным штрихом со значительным выносом полировальника от центра зеркала на 0,5 ... 0,7 радиуса зеркала в каждую сторону. Если поверхность, подлежащая асферизации, имела удовлетворительную сферическую форму, то такой режим приводит, как правило, к хорошему результату. Кривизна поверхности меняется по закону, свойственному параболюиду, а его максимальная аберрация, об измерении

которой будет сказано несколько ниже, непрерывно увеличивается (для случая испытания из центра кривизны). Тем не менее иногда бывает так, что плавность поверхности нарушается и края зеркала, начиная с зоны 0,7 его радиуса, оказываются приподнятыми относительно остальной параболической поверхности. Почти во всех случаях это связано с тем, что относительная скорость вращения зеркала и обрабатывающего инструмента оказывается недостаточной. Если по тем или иным причинам простое увеличение скорости не представляется возможным, то устранить этот дефект помогает полировка по хорде со смещением центра полировальника от центра зеркала на 0,7 ... 0,8 его радиуса и общей длиной штриха 0,1 ... 0,2 диаметра зеркала.

Пользоваться таким штрихом приходится крайне аккуратно, остерегаясь резких движений; точка приложения

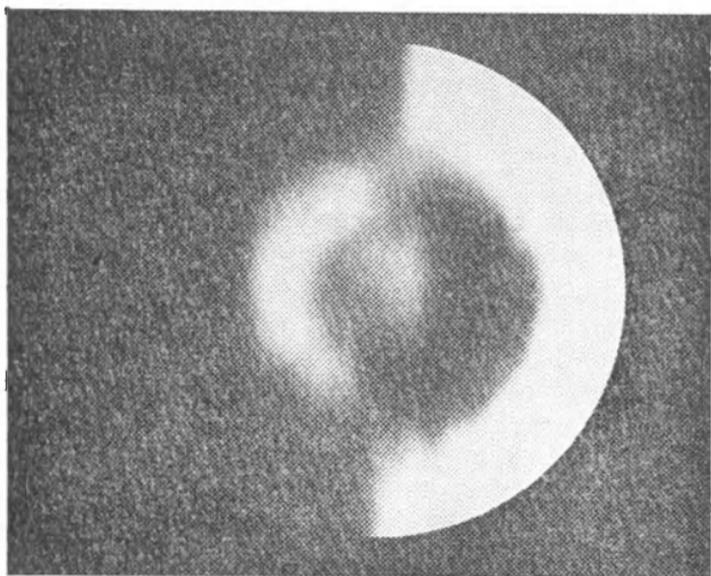


Рис. 75. Теневая картина 400-миллиметрового параболического зеркала на заключительной стадии асферизации

усилия к полировальнику должна находиться в его центре, иначе неизбежно появление «сорванного» края зеркала. Полирование по хорде не только способствует возникновению необходимого при параболизации плавного «завала» на краю зеркала, но и может привести к уменьшению аберраций его центральных зон. Здесь начинает расти «бугор», который можно видеть при теневом испытании, если, ко-

нечно, вырезанный блок стекла не удален (рис. 75). Если произошла перепараболизация зеркала и общая абберация превышает расчетную, то нет ничего проще уменьшить ее до требуемых значений, не нарушая общей плавности поверхности. Для этого достаточно немного уменьшить смещение центра полировальника относительно центра зеркала.

Для измерения асферичности зеркал целесообразно применить «метод щели и нити» Д. Д. Максутова в комбинации со специальным экраном, снабженным зональными щелями [23]. Этот экран позволяет освещать только три зоны контролируемой зеркальной параболической поверхности: центральную, краевую и промежуточную между ними (рис. 76, *а*). Если укрепить экран на зеркале, то, используя нить, можно определить места на оптической оси, в которых сходятся лучи от двух противоположных щелей данной зоны. Иначе говоря, определяя каждый из моментов, когда указанные выше зоны затеняются, можно весьма точно измерить значение абберации между ними. Если мы хотим, чтобы продольная абберация на зоне была равна половине максимальной, то радиус промежуточной дугообразной щели в маске должен быть равен  $0,707$  радиуса зеркала  $s$ .

Ширину щелей на экране обычно определяют экспериментально, поскольку они должны быть достаточно узкими для повышения точности и одновременно настолько широкими, чтобы избежать дифракционных явлений.

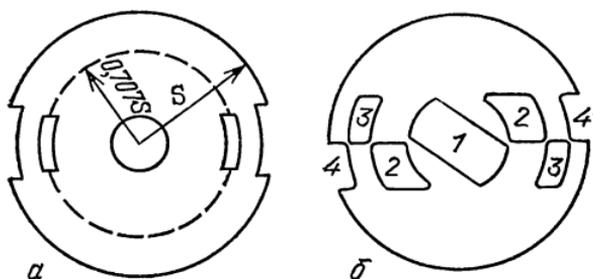


Рис. 76. Зональные экраны для контроля параболического зеркала: *а* — экран Ричи, *б* — экран Куде; 1—4 — щели

Куде [24] разработал более универсальный экран (рис. 76, *б*), в котором экспериментально находят ширину только краевой зоны, а радиусы и ширину внутренних зон определяют с учетом того, что последние непосредственно соединяются друг с другом и разность квадратов их радиусов постоянна. В этом случае линейное приращение продольной абберации равно постоянной величине. Основным недостатком

ком этого метода является то, что конечная ширина теневой картины нити иногда скрывает небольшие смещения всей тени при перемещении ее вдоль оптической оси.

Другим недостатком описываемого метода измерения продольных аберраций является зависимость чувствительности метода от радиуса зоны. В частности, для самой вершины зеркала продольная аберрация вообще теряет смысл: при любой ошибке падающий и отраженный пучки света пересекают оптическую ось в вершине зеркала, и измерение продольной аберрации становится невозможным.

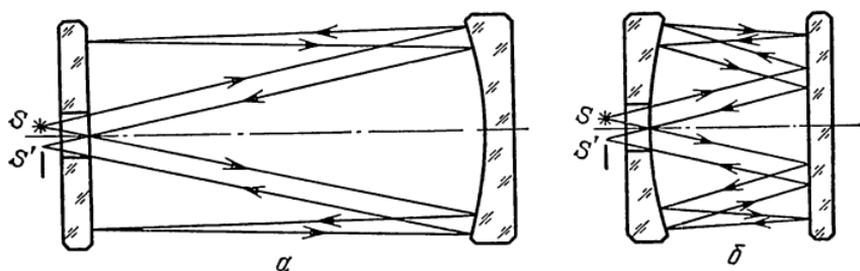


Рис. 77. Два варианта контроля вогнутого параболического зеркала с помощью эталонного плоского зеркала

Если телескопостроитель располагает зеркалом с плоской поверхностью высокого качества, то для контроля парабооида можно использовать теневой метод по схеме Ричи (рис. 77, а). Плоское зеркало должно иметь центральное отверстие. Если такого нет, то приходится использовать дополнительное диагональное плоское зеркало, хотя процедура юстировки при этом несколько усложняется. Предложенная автоколлимационная схема из ряда «нуль»-тест-методов, т. е. предназначенная для исследования систем, которые не должны иметь аберраций, обладает высокой чувствительностью, поскольку от эталонного плоского зеркала лучи света отражаются один раз, а от параболического — дважды. В результате этого все погрешности формы поверхности удваиваются. Поскольку наблюдаемый вид теневой картины симметричен, в принципе оказывается возможным использовать алюминированное плоское зеркало меньших размеров, позволяющее контролировать до 1/4 поверхности парабооида. Применение еще более мелких зеркал нежелательно, так как при этом существенно снижается точность измерений.

Юстировка схемы осуществляется следующим образом. Вначале точечный источник света устанавливается на оптической оси параболического зеркала на расстоянии его

фокуса. Это несложно сделать, если закрыть центр зеркала небольшим непрозрачным кружком. Изменяя положение и наклон параболического зеркала, необходимо добиться того, чтобы отражение источника света в зеркале скрылось за непрозрачным кружком. При этом глаз располагается у ножа Фуко. Затем, наклоняя и поворачивая плоское зеркало, подводим к ножу Фуко изображение источника света. Понятно, что лучи света сейчас проходят путь от щели к параболическому зеркалу, далее к плоскому и обратно. Если контролируемое зеркало имеет точно параболическую форму поверхности, а нож Фуко находится в его фокальной плоскости, то при поперечных смещениях ножа светящаяся картина зеркала погаснет одновременно во всех своих зонах. Попутно отметим, что, поскольку параболическое зеркало еще не алюминировано, нужно заранее позаботиться о достаточно ярком источнике света.

Как и при контроле сферического зеркала из центра кривизны, любое отклонение формы поверхности параболоида от идеальной приведет при данном методе испытаний к искривлению прямолинейной тени ножа (или нити). Существенная разница заключается лишь в том, что искажения тени соответствуют искажениям формы волнового фронта относительно параболической поверхности, а не сферической. Например, если в предфокальном изображении концы тени загнуты в направлении от вертикального диаметра, то края зеркала имеют большую кривизну, чем идеальная параболическая поверхность (т. е. края недопараболизированы); если в середине изгиб тени направлен от вертикального диаметра, то центру зеркала свойственна большая кривизна, нежели параболической поверхности (т. е. ее форма уклоняется в сторону гиперболоида). В зафокальном изображении соответственно будет обратная картина.

Другой вариант контроля вогнутого параболического зеркала в параллельном пучке света приведен на рис. 77, б. В принципе он мало чем отличается от рассмотренного выше. Уменьшение габаритов схемы в продольном направлении за счет трехкратного отражения лучей от эталонного плоского зеркала связано с дополнительным ужесточением требований на точность его поверхности. Обе схемы также позволяют провести исследования изготовленного зеркала на присутствие возможного астигматизма поверхности. Понятно, что эту работу имеет смысл проводить в том случае, если контролю подвергается одновременно вся поверхность готового зеркала, а не какая-то ее часть. В связи с тем, что

параболическое зеркало представляет собой светосильную оптическую систему, для выявления овальности дифракционного диска может возникнуть необходимость использования микроскопа вместо окуляра. Нужное увеличение при этом подсчитывается по формуле

$$\Gamma = \frac{250}{\nu}. \quad (72)$$

В заключение данного параграфа хочется рассмотреть такой способ аттестационного контроля готового и уже алюминированного зеркала, где в качестве эталонной плоскости выступает поверхность жидкости. Хорошо известно,

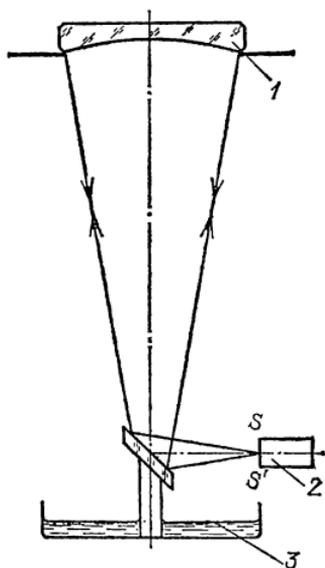


Рис. 78. Аттестационный контроль параболического зеркала, где в качестве эталонной плоскости используется слой жидкости: 1 — исследуемое зеркало, 2 — теневой прибор, 3 — слой жидкости;  $s$  и  $s'$  — источник света и его изображение соответственно

что радиус кривизны ее поверхности равен радиусу Земли. Если принять, что последний составляет 6400 км, то стрелка прогиба поверхности будет

$$\frac{y^2}{2r} = \frac{y^2}{2 \cdot 6,4 \cdot 10^9} \text{ мм}, \quad (73)$$

где  $y$  — полудиаметр рассматриваемой поверхности жидкости. Если стрелка прогиба не должна превышать  $\lambda/100$  ( $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$  мм), необходимо выполнить условие

$$y^2 \leq 6,4 \cdot 10^4 \text{ мм или } y \leq 252 \text{ мм.}$$

Схема контроля очень проста и не требует дополнительных пояснений (рис. 78). На практике, однако, возникает много проблем и прежде всего по устранению возмущающих воздействий вибрации. Кроме того, необходимо создать усло-

вия, при которых никакие соринки не осаждаются на поверхности жидкости, иначе неизбежны местные искажения эталонной плоскости. Для этой цели используют вязкие и чистые жидкости, такие как глицерин, минеральные масла и т. п. Вода не применяется, так как обладает низкой вязкостью. Хотя на первый взгляд контрольная схема выглядит очень заманчиво, автор советует с большой осторожностью подходить к ее практическому воплощению.

#### § 4. ПОЛУЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ВЫПУКЛОЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Обработка выпуклого зеркала для телескопа системы Кассегрена ведется обычным «классическим» методом (рис. 35). Рассчитанное по формуле (45) его фокусное расстояние контролируется в процессе работы по вогнутому зеркалу. Полировка выпуклого зеркала (снятие мата) проводится так же, как и в случае сферического вогнутого зеркала.

Полностью отполированная заготовка подлежит асферизации (гиперболизации). Для того чтобы знать, с каких участков поверхности вести в дальнейшем споллировывание стекла, нужно оценить получившуюся форму поверхности зеркала. К сожалению, проконтролировать выпуклую (рассеивающую) поверхность с достаточной точностью всегда было делом непростым.

Иногда для этого поступают следующим образом. Сначала изготавливают вогнутый эталон, обработанный под гиперболоид с заданным эксцентриситетом. Затем накладывают его на основное изделие и по виду интерференционной картины (см. § 6) судят о характере получившейся поверхности. Подобный метод изготовления выпуклого зеркала представляет для любителя очень большие трудности, и поэтому он здесь не рассматривается.

Другой способ состоит в том, чтобы преобразовать расходящийся пучок света от выпуклого зеркала в сходящийся за счет введения в оптическую схему контрольного оптического элемента. Само собой напрашивается для этой цели использовать полностью отполированное и алюминированное вогнутое параболическое зеркало будущего телескопа. В связи с тем, что один из фокусов такой системы находится в бесконечности, приходится ее исследовать в пучке параллельных лучей.

В одной из схем он создается при помощи вспомогательного параболического зеркала, которое может быть заме-

нено сферическим, если отношение его фокусного расстояния к диаметру удовлетворяет формуле (24). Схема испытания показана на рис. 79. Вспомогательное зеркало, щель, оба зеркала телескопа и нить должны быть расположены своими центрами на одной оптической оси. Выпуклое зеркало, кроме того, должно крепиться в оправе так, чтобы его можно было легко вынимать для доводки и снова вставлять без нарушения юстировки схемы. Необходимо обеспечить плавную регулировку наклона всех зеркал для обеспечения их соосности.

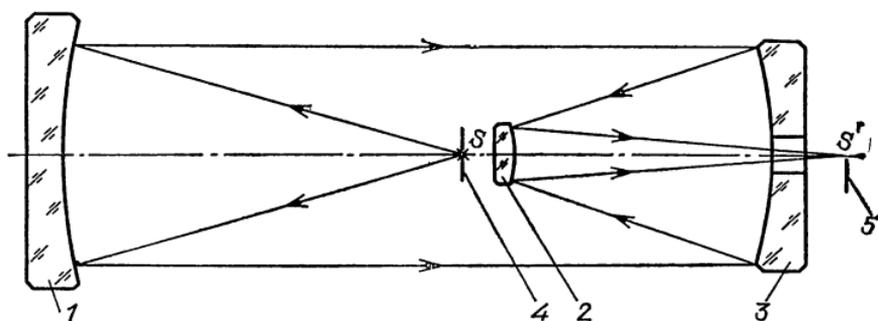


Рис. 79. Оптическая схема контроля выпуклого гиперболического зеркала с помощью вспомогательного вогнутого в параллельном пучке световых лучей: 1 — вспомогательное зеркало, 2 — гиперболическое зеркало, 3 — параболическое зеркало, 4 — источник света, 5 — нож Фуко

Несмотря на относительную доступность такого метода контроля (к постройке телескопа системы Кассегрена любитель обычно приступает, уже имея определенный опыт), он не свободен от некоторых недостатков. В собранном виде контрольная схема достаточно громоздка. Допуск на установку «точечного» источника света вблизи фокальной плоскости вспомогательного зеркала невелик. Мощный источник освещения щели, помещенный на пути лучей, создает в направлении вертикального диаметра волнующуюся теневую картину, образованную потоками струй горячего воздуха. Введение дополнительного плоского зеркала может только еще более усложнить процесс юстировки контрольной схемы. Наконец, погрешности изготовления всех трех зеркал равным образом переносятся на рассматриваемую теневую картину.

В этом смысле гораздо более удачной представляется автоколлимационная схема контроля с плоским зеркалом в параллельном пучке лучей, изображенная на рис. 80. Ее юстировка несложна. Сначала добиваются соосности главного и вторичного зеркал, наблюдая через отверстие

в главном зеркале за концентричностью расположения отражений зеркал. Если плоское зеркало приблизительно перпендикулярно оптической оси системы, то в этом положении глаз также видит светлый «зайчик» от источника света. Осторожно наклоняя плоское зеркало, приводим «зайчик» в центральное положение, добываясь того, чтобы он скрылся за выпуклым зеркалом. В этот момент где-то рядом должно находиться и автоколлимационное изображение. На практике вся операция занимает времени не

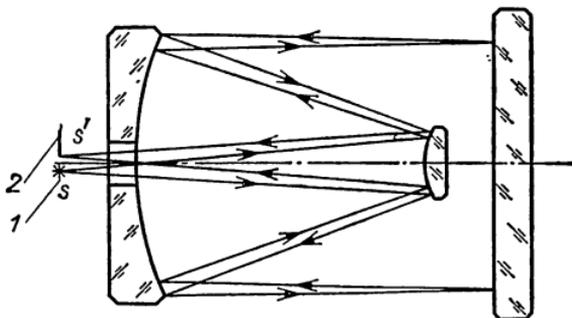


Рис. 80. Оптическая схема контроля выпуклого гиперболического зеркала с помощью эталонной плоскости: 1 — источник света, 2 — нож Фуко

больше минуты. Данная схема обладает большей чувствительностью, чем изображенная на рис. 79, так как лучи света дважды отражаются от испытуемой поверхности.

В телескопе системы Кассегрена выпуклое зеркало должно иметь такую форму поверхности, при которой изображение в эквивалентном фокусе будет безаберрационным. Понятно, что в случае испытания в автоколлимационной схеме с помощью ножа Фуко мы обязаны стремиться к плоскому теневому рельефу или добиваться прямолинейности изображения нити. Следует отметить, что сферическая аберрация в телескопе (и, соответственно, в автоколлимационной схеме) будет отсутствовать только при одном вполне определенном рассчитанном расстоянии между зеркалами. Проведем испытание вторичного зеркала по любой собранной контрольной схеме. Если оно имеет форму, близкую к сферической, то в предфокальном изображении изгиб тени будет направлен от центрального диаметра и внешне будет напоминать параболаид при контроле его из центра кривизны. Это означает, что поверхность имеет завал на краю и яму в середине (рис. 81). Очевидно, что для получения гиперболаида нужно понизить некоторую промежуточную зону.

Наиболее эффективно работает кольцевой полировальник со средним радиусом кольца около  $0,7$  радиуса зеркала. Внутренний диаметр кольцевого полировальника может быть равным примерно  $0,5$ , а внешний —  $0,8$  диаметра зеркала. К сожалению, при полировке кольцом обычно не удается придать поверхности необходимую плавность.



Рис. 81. Форма поверхности выпуклого зеркала: 1 — гиперболическая, 2 — сферическая

Более удачным является звездчатый полировальник (рис. 82). Он отформовывается путем выдавливания углубления в разогретой смоле полировальника при помощи звездочки, вырезанной из ватмана и смоченной водой. Хорошие результаты дает полировальник, изображенный на рис. 83. В сочетании с центральным штрихом небольшой длины ( $0,1 R$ ) он формирует очень плавную поверхность. К сожалению для получения гиперболической поверхности невозможно рекомендовать какой-либо строго определенный вид полировальника хотя бы потому, что, в отличие от параболоида, таких кривых, различающихся эксцентриситетом,

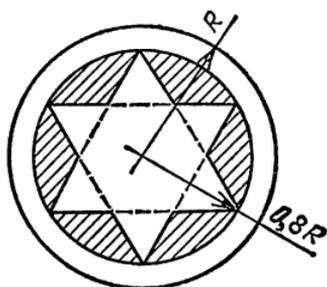


Рис. 82. Звездчатый полировальник для асферизации выпуклого зеркала (выступающие участки смолы для наглядности заштрихованы)

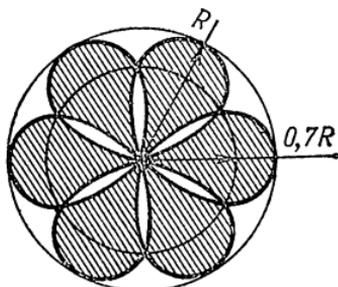


Рис. 83. Фигурный полировальник для асферизации выпуклого зеркала (выступающие участки смолы для наглядности заштрихованы)

тотом, существует бесконечное множество. Тем не менее, если любитель хорошо усвоил связь между теневой картиной и формой зеркала, то для него не составит особого труда для каждого конкретного случая несколько видоизменить форму полировальника. Следует иметь в виду, что асферируемую деталь лучше располагать сверху.

В заключение хочется добавить следующее. Если «точечный» источник света и нож Фуко (нить) находятся почти

строго на оптической оси системы, то контролю подвергается не вся поверхность вторичного зеркала, а та ее часть, которая формирует изображение в центре поля зрения инструмента. Чтобы исследовать краевую зону, нужно теневой прибор сдвинуть как одно целое к краю поля зрения. Компенсация смещения автоколлимационного изображения достигается соответствующим разворотом плоского зеркала.

## § 5. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Как известно, любые теневые образования при контроле сферической поверхности методом Фуко свидетельствуют об ее погрешностях в этом месте. В применении к параболическим зеркалам данный метод требует значительно больших затрат времени и менее точен; погрешности оптической поверхности здесь могут быть определены лишь по результатам многочисленных измерений в различных зонах.

Среди различных методов контроля оптических поверхностей *компенсационный* метод выделяется особыми преимуществами. Применительно к любительскому телескопостроению он является перспективным методом для контроля крупных астрономических зеркал. Так же как и метод Фуко, компенсационный метод является бесконтактным, позволяя одновременно контролировать всю поверхность зеркала, а не отдельные ее участки.

Идея контроля параболических зеркал компенсационным методом была впервые высказана и практически реализована в 1921 г. советским академиком В. П. Линником [25]. В 1924 г. Д. Д. Максудов предложил использовать компенсационный метод для контроля параболических зеркал с помощью значительно меньших по размеру сферических зеркал [2]. В дальнейшем идея контроля компенсационным методом была развита в работах Куде [26], Долла [27], Росса [28], Оффнера [29] и ряде других.

Существуют два вида компенсации аберраций асферической поверхности — это так называемые *оптическая компенсация* и *компенсация аберраций нормалей* асферической поверхности. Основное их различие состоит в том, что в первом случае лучи света падают на контролируемую асферическую поверхность под разными углами, определяемыми условиями работы всей системы в целом, а при компенсации аберраций нормалей все лучи падают нормально к контролируемой поверхности. Типичным примером опти-

ческой компенсации является хорошо известная система Шмидта, состоящая из двух оптических элементов: плоскопараллельной пластины, одна или обе поверхности которой соответствующим образом асферизованы, и вогнутого сферического зеркала. Пластина определенным образом трансформирует падающий волновой фронт, компенсируя аберрации, вносимые сферическим зеркалом, в результате чего достигается высокое качество изображения всей системы в целом. В более широком смысле под оптической компенсацией можно понимать введение определенных оптических поверхностей, в том числе и сферических, волновые аберрации которых компенсируют аберрации главного зеркала. Примером может служить оптическая схема Д. Д. Максудова.

Недостаток контроля асферических поверхностей методом оптической компенсации заключается в том, что вывод о качестве изготовленной поверхности делают по результатам контроля всей оптической системы. В то время как результирующее качество изображения системы оказывается вполне удовлетворительным, сама асферическая поверхность может быть и не идеальной с точки зрения теории качества. Это объясняется тем, что получение необходимой асферичности поверхности осуществляется по достижении нужного качества изображения системы, в состав которой она входит.

Чаще используют второй тип компенсации, так называемую компенсацию нормалей контролируемой поверхности. Она заключается в том, что с помощью дополнительного линзового или зеркального оптического элемента — компенсатора падающий на него плоский или сферический волновой фронт трансформируется таким образом, что выходящие из него лучи света падают нормально к контролируемой асферической поверхности, т. е. образуют с ней прямой угол.

Простые и небольшие компенсаторы получили успешное применение по следующим причинам.

1. Вогнутые асферические зеркала сами преобразуют расходящийся волновой фронт от точечного источника в сходящийся волновой фронт, искаженный аберрациями контролируемой поверхности.

2. Бóльшая часть аберраций, вносимых контролируемой асферической поверхностью, относится к аберрациям, рассмотренным в главе 2.

3. Знак аберрации контролируемой асферической поверхности противоположен знаку аберраций, вносимых

компенсационным вогнутым зеркалом или простой выпуклой линзой.

Благодаря первой причине компенсатор может быть значительно меньше контролируемой асферической поверхности. Вторая позволяет получать хорошую компенсацию при одном оптическом элементе удобной формы. Наконец, третья дает возможность использовать простую вспомогательную оптику. Простые по конструктивному исполнению компенсаторы могут применяться для контроля любых вогнутых асферических поверхностей, образованных вращением отрезка конического сечения вокруг главной оси. Предпочтение обычно отдается линзовому компенсатору, так как зеркальный компенсатор менее удобен в обращении из-за необходимости введения дополнительного оптического элемента для вывода в сторону от оптической оси пучка световых лучей. В связи с тем, что исследование выполняется с использованием монохроматического источника света, хроматизм линз роли не играет.

В системе В. П. Линника компенсатором служит двойная склеенная линза, установленная по ходу лучей перед центром кривизны при вершине параболического зеркала. Точечный источник света расположен перед линзой на расстоянии, равном двойному фокусному расстоянию линзы. Изображение точечного источника света, построенное отраженными от параболоида лучами, располагается на небольшом расстоянии от оптической оси вблизи центра кривизны исследуемого зеркала. Достоинством схемы является то, что лучи света проходят через компенсатор один раз, поэтому погрешности формы его поверхностей, граничащих с воздухом, переносятся на волновой фронт уменьшенные приблизительно в два раза. Помимо этого погрешности волнового фронта контролируемого зеркала при однократном отражении лучей удваиваются. К сожалению, изображение точечного источника света располагается вне оптической оси системы, поэтому изображение в той или иной степени оказывается испорченным аберрацией ко́ма, особенно для достаточно светосильных зеркал.

В 1927 г. А. Куде [26] применил компенсатор для контроля параболического зеркала диаметром 300 мм с относительным отверстием 1 : 5, который состоял из двух оптических компонентов с общей нулевой оптической силой и имел собственные размеры около 4 см. Компенсатор располагался вне оптической оси параболоида. Таким образом, данная схема была нецентрированной, что и являлось ее основным недостатком.

В 1943 г. Ф. Росс [28] предложил использовать двояковыпуклую линзу диаметром 250 мм для контроля параболического зеркала диаметром 5 м Паломарской обсерватории (США). Однако с помощью одной линзы не удалось полностью компенсировать aberrации нормалей параболического зеркала. Росс показал, что для достижения компенсации, при которой влияние остаточных зональных aberrаций станет намного меньше возмущающего воздействия атмосферы, необходимо добавить к преломляющему сферическому компоненту, компенсирующему сферическую aberrацию параболоида, асферическую пластину. Максимальное отступление асферической поверхности от плоскости составляет 18 мкм. Преимущество предложенного устройства Росса заключается в том, что оно свободно от комы и поэтому нечувствительно к смещениям точечного источника света и ножа Фуко с оси системы. Кроме этого, поскольку лучи света проходят через компенсатор дважды, он должен вносить только половину aberrаций по сравнению с устройством Куде. Отличительная особенность данной оптической схемы состоит в том, что для контроля параболического зеркала — поверхности, описываемой кривой второго порядка, исследователи решили применить асферическую поверхность более сложного профиля несмотря на трудности ее изготовления и контроля.

В 1947 г. Х. Долл [27] опубликовал для астрономов-любителей линзовый метод контроля параболических зеркал. Он предложил использовать простую плосковыпуклую линзу для компенсации aberrаций параболического зеркала. Линза установлена вблизи его центра кривизны выпуклой поверхностью к источнику света. Удовлетворительная компенсация достигается для зеркал с небольшим относительным отверстием.

Долл отметил, что, поскольку сферическая aberrация линзы является функцией ее сопряженных расстояний, диапазон применения плосковыпуклого компенсатора может быть значительно расширен [27, 30]. Его устройство, идентичное схеме Куде, позволяет при правильном выборе линзы с коротким сопряжением вести компенсационный контроль параболоидов с  $f'_0/f'$  в диапазоне 5. . .20, где  $f'_0$  — фокусное расстояние контролируемого зеркала, а  $f'$  — фокусное расстояние компенсатора. При этом для компенсации aberrаций в центре кривизны параболоида необходимо выдерживать соотношение

$$\frac{f'_0}{f'} = \frac{1}{4} (m-1)^2 \left[ \frac{n^2(m-1)^2}{(n-1)^2} + \frac{(3n+1)(m-1)}{n-1} + \frac{3n+2}{n} \right], \quad (74)$$

в котором  $m=l'/l$  ( $l'$  — расстояние от линзы до центра кривизны при вершине параболоида, а  $l$  — расстояние от линзы до положения точечного источника света),  $n$  — показатель преломления стекла линзы компенсатора. Правило знаков при этом таково, что  $m>1$ . Полезные советы по изготовлению и использованию рассмотренного устройства приведены в работах [31, 32].

Рассмотрим компенсатор Долла для параболического зеркала диаметром 600 мм и фокусным расстоянием 3000 мм (относительное отверстие зеркала 1 : 5). Задав  $m=2$ ,  $n=1,52$ , из уравнения (74) получаем отношение  $f_0'/f'=5,888$ , укладывающееся в пределы, установленные Доллом. Основные характеристики компенсатора при этом будут следующие:  $f'=-509,50$ ,  $l=-254,75$  и  $l'=-509,50$ . Параболическое зеркало, изготовленное с помощью такого компенсатора, имело бы отклонение формы поверхности порядка  $\lambda/40$  (средняя квадратическая погрешность). Диаметр линзы компенсатора составляет при этом всего лишь около  $1/42$  диаметра контролируемой детали.

Следует иметь в виду, что в устройстве Долла присутствует остаточная кома, поэтому необходимо обеспечить соосность компенсатора и исследуемого зеркала, а точечный источник света располагать точно на оптической оси системы.

Чтобы проверить возможность линзового компенсационного метода, М. А. Уханов [33] в 1961 г. осуществил предельно простую схему (аналог Росса) исследования из центра кривизны параболического зеркала диаметром 600 мм и относительным отверстием 1 : 4. Для компенсации сферической аберрации была использована одна линза, световой диаметр которой составлял всего лишь 67 мм. Она располагалась на некотором расстоянии впереди центра кривизны параболоида. С целью удобства центрировки всей схемы линза была механически соединена с теневым прибором для наблюдения и измерения аберраций как бы в самостоятельный прибор, обеспечивающий необходимые движения отдельных элементов: линзы, источника света, ножа Фуко и всего прибора в целом. Для освещения применялась ртутная лампа со светофильтром, выделяющим линию 546,1 нм.

Сама методика исследования параболического зеркала в принципе несложна и включает следующие этапы: центрировку установки, измерение радиуса кривизны поверхности параболоида и расстояния между линзой и параболоидом, наблюдение погрешностей зеркала и измерение

аббераций. В своей работе М. А. Уханов приводит ценные практические сведения о методике контроля параболического зеркала на всех этапах его изготовления.

Интересную схему линзового компенсатора предложил в 1963 г. А. Оффнер [29]. Он установил дополнительную полевую линзу (корректор) между компенсатором и контролируемой поверхностью вблизи центра кривизны при вершине параболического зеркала. Чем это было вызвано? Выше говорилось о том, что введением в контрольную схему асферического элемента, например по схеме Росса, возможно устранение сферической aberrации параболического зеркала с любой степенью точности. К сожалению, выполнение самого асферического элемента с необходимой точностью связано с известными технологическими трудностями. Поэтому желательно, чтобы оптические поверхности компенсатора были ограничены плоскими или сферическими сторонами, которые уверенно поддаются контролю.

При разработке своего компенсатора Росс выявил следующую закономерность. Чем дальше он помещал линзу от центра кривизны контролируемого зеркала, тем лучше была компенсация остаточных aberrаций параболоида. В пределе компенсатор должен был быть расположен в непосредственной близости к параболоиду, однако в этом случае его пришлось бы делать таким же большим, как и контролируемую поверхность. Оффнер решил использовать это свойство и указал, что небольшая линза, образующая действительное изображение точечного источника в центре кривизны параболоида, в сочетании с полевой линзой, изображающей ее на параболоиде, с оптической точки зрения эквивалентна большой линзе вблизи контролируемой поверхности.

В компенсаторе Оффнера используются линзы небольших размеров. Допуск на точность их изготовления является умеренным. Метод применим и для исследования из центра кривизны вогнутых гиперболических зеркал, используемых в телескопах системы Ричи — Кретьена.

Контроль выпуклых асферических зеркал компенсационным методом сложнее. В этом случае нарушается одно из условий, приведенных выше, состоящее в том, что вогнутые асферические зеркала сами преобразуют расходящийся волновой фронт от точечного источника в сходящийся волновой фронт, искаженный aberrациями контролируемой поверхности. Поэтому размер вспомогательного оптического элемента должен превышать диаметр контролируемого.

Для исследования выпуклого гиперболического зеркала Д. Хиндл [34] предложил использовать автоколлимационную компенсационную схему, использующую большое вогнутое сферическое зеркало, центр кривизны которого совмещен с одним из фокусов исследуемого выпуклого гиперболического зеркала. Такое вспомогательное зеркало получило название *сферы Хиндла*. Лучи света, вышедшие из другого фокуса гиперболического зеркала, последовательно отразившись от него и от сферического зеркала, возвращаются обратно по тому же пути в исходную точку. Понятно, что центральная часть зеркала остается неисследованной. Чтобы она не была чрезмерно большой, расстояние между зеркалами должно быть значительным, а значит, и сфера Хиндла должна иметь большой диаметр.

Подобное контрольное устройство реализовано на практике любителем телескопостроения Е. Е. Андреевым (МО ВАГО), при этом радиус кривизны его сферы составляет 620 мм, а диаметр 230 мм ( $\sqrt{\geq 2,7}$ ). В дальнейшем планируется изготовление более мощного компенсатора размером 300 мм и радиусом кривизны 480 мм ( $\sqrt{\geq 1,62}$ ). Как видим, любителями в последнее время освоены такие приемы изготовления астрономической оптики, которые в недавнем прошлом могли быть реализованы лишь в заводских или лабораторных условиях опытными мастерами-оптиками

## § 6. КОНТРОЛЬ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Наиболее простым для любителя способом контроля плоских поверхностей остается так называемый *интерференционный способ*. Суть его состоит в том, что при тесном сближении двух отполированных поверхностей, радиусы кривизны которых по абсолютной величине приблизительно равны друг другу, но противоположны по знаку, в воздушном зазоре между ними возникают интерференционные кольца (кольца Ньютона). Пара соседних колец отстоит друг от друга на расстояние, соответствующее увеличению зазора на величину  $\lambda/2$ . Таким образом, вид интерференционной картины характеризует относительную форму поверхности двух стекол. Понятно, что если контролируются два стекла, кривизна которых неизвестна, то определить истинную их кривизну путем наблюдения интерференционных полос оказывается невозможным.

Такая задача решается просто, если в распоряжении любителя имеется плоское «пробное» стекло или поверхность, у которой заранее известно отступление от плоскост-

ности (порядка нескольких длин волн). На рис. 84 изображено простое устройство для наблюдения интерференционной картины. Полупрозрачная пластина может являться куском простого оконного стекла или плексигласом. Рассеивающий экран желательно иметь полупрозрачный, освещенный сверху сильной лампой накаливания или медицинской ртутной лампой.

Если сложить вместе две точно плоские стеклянные пластины, то вместо колец Ньютона мы увидели бы, что все

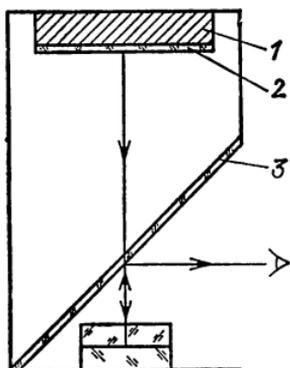


Рис. 84. Устройство для наблюдения интерференционных полос: 1 — рассеивающий экран, 2 — светофильтр, 3 — полупрозрачное стекло

стекло заливает один какой-либо цвет в зависимости от толщины создавшегося воздушного зазора. Для вполне чистых поверхностей, когда ничто не мешает им сблизиться предельно тесно, таким критерием является равномерный серо-золотистый тон. Если осторожно приподнять верхнее стекло с одного края, то появляются параллельные полосы. Важно, что они все время остаются прямыми. Ясно, что если обрабатываемая поверхность имеет отступление от плоскостности, то это вызовет искривление интерференционных полос.

При рассматривании картины в белом свете видно, что полосы имеют цветовую окраску: фиолетовый край полосы обращен к вершине образовавшегося воздушного клина, а красный — к основанию. Поэтому для более контрастного выделения полос на общем фоне их наблюдение желательно вести через светофильтр в узком участке спектра.

Тщательно обезжиренные спиртом поверхности накладывают одна на другую, остерегаясь скольжения. Никакого нажима производить не следует, вполне достаточен собственный вес стекла. Если интерференционные полосы не появились, то это свидетельствует о недостаточной очистке поверхностей — между стеклами могли остаться волоски от протирачного материала. Тогда операцию чистки нужно повторить.

Определить знак контролируемой поверхности очень легко. Добьемся того, чтобы интерференционная картина была представлена в виде колец. Если поверхность выпуклая, то при опускании головы (т. е. при увеличении угла падения лучей) видимые кольцеобразные полосы разбегаются от центра к краям, они как бы скатываются с вершины бугра; если поверхность вогнутая, то они, наоборот, будут сбегаться к центру. Понятно, что в случае выпуклой поверхности полировку зеркала нужно продолжить в верхнем положении, а в случае вогнутой — в нижнем.

Чувствительность испытания тем выше, чем шире полосы, т. е. чем меньше отличается кривизна обрабатываемой детали от эталонной поверхности. Поэтому, полируя зеркало, нужно постараться добиться того, чтобы сразу было видно не более трех-четырех колец. Легко нажав на один край стекла, получим вместо колец интерференционные полосы и оценим величину их прогиба относительно расстояния между соседними полосами. Если стрелка прогиба полос составляет не более  $1/4$  этого расстояния, то работу можно считать законченной. Погрешность поверхности соответствует критерию Рэлея. Тем не менее ее все же лучше уменьшить до  $1/5 \dots 1/6$ .

Способ контроля с помощью эталонной поверхности прост, но требует наличия «пробного» плоского стекла. Если его нет, то обычно применяют метод наклонных пучков в сочетании со схемой исследования Кóммона. В ней расходящийся пучок лучей трансформируется в сходящийся к ножу пучок лучей с помощью вогнутого сферического зеркала.

Схема Кóммона для исследования плоскостей представлена на рис. 85. Здесь  $s$  — точечный источник света, находящийся на расстоянии  $L$  от контролируемой плоской поверхности  $1$  и совмещенный с положением центра кривизны вогнутого сферического зеркала  $2$ . Расходящийся пучок света падает вначале на зеркало  $1$ , наклоненное на угол  $\omega$  к оси пучка, затем на зеркало  $2$  и возвращается в точку  $s'$ , сопряженную с источником света теневого прибора. Если форма поверхности зеркала  $2$  представляет собой идеальную сферу, то в случае зональных или местных погрешностей на плоской поверхности мы будем наблюдать определенную теневую картину. Следует иметь в виду, что она видна в соответствующей проекции, и поэтому истинные искажения формы будут несколько отличаться от видимых.

Для диагонального плоского зеркала опасны не только местные погрешности, но и общая «ненулевая» кривизна

поверхности. Выше уже отмечалось, что наклонный пучок, отраженный от такой поверхности, приобретает астигматизм. Его измерение по схеме Кóммона возможно следующим образом. Установим на теновом приборе вместо ножа Фуко сильный окуляр и посмотрим на изображение светящейся точки. Если зеркало неплоское, то можно легко заметить, что изображение точки во внефокальных положениях вырождается в линию (фокаль). Фокусируя окуляр сначала на одну фокаль, а затем на другую, мы можем

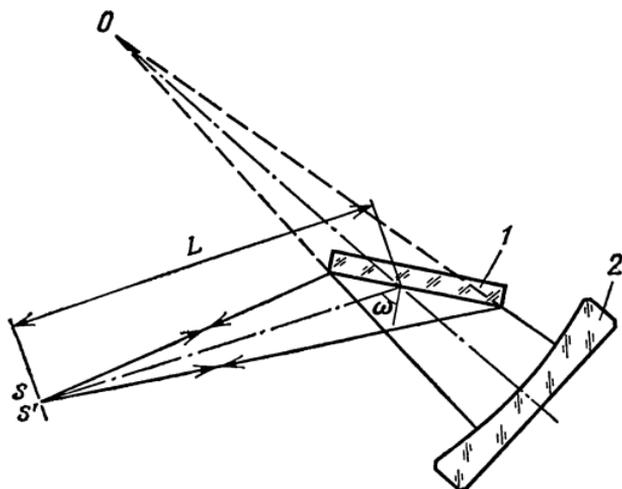


Рис. 85. Испытание плоского зеркала по схеме Кóммона (вид сверху): 1 — исследуемое плоское зеркало, 2 — эталонное сферическое зеркало

измерить так называемую астигматическую разность  $\Delta_{sm}$ . В плоскости наилучшего изображения, находящейся между фокалями на расстоянии  $\frac{\Delta_{sm}}{2}$ , изображение точки имеет круглые очертания определенного размера. Допуск на эту величину при условии изготовления поверхности, удовлетворяющей критерию Рэлея, составляет

$$\Delta_{sm} = 0,8 \frac{L^2}{D^2} \text{ мкм.} \quad (75)$$

Выражение приведено для случая, когда  $\omega = 45^\circ$  при  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ . Например, плоское зеркало имеет диаметр  $D = 100 \text{ мм}$ , а расстояние  $L = 2000 \text{ мм}$  и  $\omega = 45^\circ$ ; тогда  $\Delta_{sm} = 320 \text{ мкм}$ .

Выяснить знак поверхности обычно не составляет труда. Если зеркала расположены вертикально, как показано на рис. 85, то в случае выпуклой поверхности в предфокаль-

ном изображении фокаль выглядит вертикальным штрихом, а в зафокальном — горизонтальным. Для вогнутой поверхности возникает обратная картина, т. е. в предфокальном изображении — горизонтальное расположение штриха, в зафокальном — вертикальное.

В случае, когда испытывается совершенно плоское зеркало, установленное под углом  $45^\circ$  к оси вогнутого зеркала, причем размеры последнего превышают контролируемые, предфокальные и зафокальные изображения светящейся точки представляют собой контур плоского зеркала, проектирующийся на сферическое. При других соотношениях размеров внефокальные изображения являются окружностями. Фокальное изображение при плоской поверхности всегда выглядит точкой.

Для полной уверенности в плоскостности зеркала *1* испытания нужно вести в двух положениях, поворачивая зеркало на  $90^\circ$  вокруг его нормали.

ОКУЛЯРЫ

Проводить визуальные наблюдения в телескоп можно в принципе, и без окуляра, если поместить глаз на расстоянии ясного зрения от фокальной плоскости объектива (см. гл. 1, § 5). Однако небольшое увеличение и ограниченное поле зрения, получившееся в этом случае, заставят очень скоро отказаться от такого метода наблюдений. При этом будет сильно утомляться глаз. Нормальный глаз человека устроен так, что он строит на сетчатке резкое изображение наблюдаемого предмета без напряжения аккомодирующих мышц глаза в том случае, если в глаз от предмета попадает параллельный пучок лучей. Это достигается, когда в оптической системе телескопа используется окуляр, причем его передний фокус совмещен с задним фокусом объектива. Для близорукого или дальнозоркого глаза, когда наблюдения ведутся без очков, приходится изменять сходимости лучей, выходящих из окуляра, прибегая к его перефокусировке. В первом случае окуляр нужно незначительно сместить по направлению к объективу. Обратные действия приведут к сходимости лучей за окуляром, позволив тем самым и дальнозоркому человеку видеть предметы отчетливо. Таким образом смещением окуляра на величину  $\Delta$  мы должны изменить сходимость пучка лучей, выходящего из телескопа, на величину, равную степени аметропии (нарушения нормальной аккомодации) глаза, выраженную в диоптриях  $\varphi$  \*),

$$\Delta = \pm \varphi f'^2. \quad (76)$$

Здесь  $\Delta$  и фокусное расстояние окуляра  $f'$  выражены в метрах. Как ясно из формулы, слабые окуляры при значи-

---

\*) В оптике диоптрией называется оптическая сила  $\varphi$  системы, у которой заднее фокусное расстояние  $f'$  положительно и в воздухе равно 1 метру. Если фокусное расстояние системы равно 0,5 м, то  $\varphi=2$  диоптриям и т. д.

тельной аметропии глаза требуют значительных перефокусировок.

Для окуляра очень важным параметром является положение его выходного зрачка (см. гл. 1, § 3) относительно последней линзы. Известно, что при уменьшении фокусного расстояния окуляра применительно к конкретной оптической схеме пропорционально уменьшаются все его конструктивные параметры, в том числе и вынос выходного зрачка. В связи с тем, что величина данного отрезка не должна быть меньше 4 ... 5 мм, приходится при расчете очень сильных окуляров учитывать это условие.

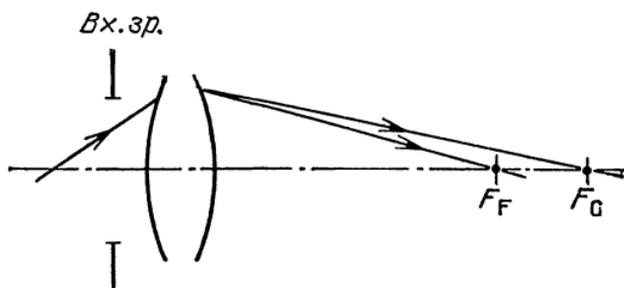


Рис. 86. Хроматизм положения. Плоскости фокусировки для лучей разных длин волн ( $F_F$ ,  $F_G$ ) находятся на разных расстояниях от окуляра. *Вх. зр.* — входной зрачок

Окуляру как реальной оптической системе свойственно вносить дополнительные искажения наблюдаемого объекта, построенного объективом. Помимо уже рассмотренных ранее основных монохроматических aberrаций, сюда следует добавить еще и хроматические aberrации. Одна из них, так называемый *хроматизм положения*, возникает из-за того, что показатели преломления линз, из которых изготовлен окуляр, различны для лучей разных длин волн. В результате плоскости фокусировки для лучей разных длин волн находятся на разных расстояниях от окуляра (рис. 86). Поэтому как бы наблюдатель ни совмещал фокальную плоскость окуляра с фокальной плоскостью объектива, изображение точечного объекта будет окружено на оси системы цветной каймой. Появление другой aberrации — *хроматизма увеличения* связано с тем, что положение главных плоскостей для лучей разных длин волн может не совпадать. В результате фокусные расстояния, отсчитываемые от соответствующих главных плоскостей, будут разными, а значит, разным будет и размер изображения в разных лучах (рис. 87). Наблюдатель увидит, что при наличии хроматизма увеличения на краях изображения появляется цвет-

ная кайма, наблюдаемая по всему контуру изображения предмета. Важно подчеркнуть, что правильно подобранный окуляр может частично исправить недостатки объектива и поэтому должен обязательно ему соответствовать.

Рассмотрим отдельные типы окуляров.

Простейшим является одиночная короткофокусная собирательная линза. По сравнению с другими окулярами у нее имеются определенные преимущества — простота изготовления, малые потери света на отражение и поглощение в стекле, отсутствие рефлексов и значительный вынос выходного зрачка. Пусть в качестве окуляра используется

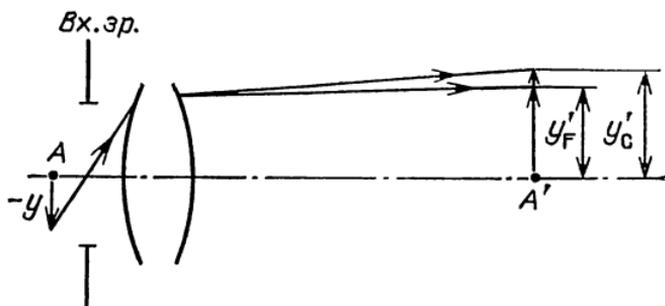


Рис. 87. Хроматизм увеличения. Размер изображения ( $y'_F$ ,  $y'_C$ ) разный в лучах разных длин волн

плоско-выпуклая линза. Если ее расположить выпуклой стороной к объективу, то сферическая aberrация, вносимая ею, будет значительна и резкость на оси небольшая, но aberrации наклонных пучков (кома, астигматизм) и дисторсия маленькие. Таким образом, при таком расположении однолинзовые окуляры могут быть применены лишь в том случае, если относительное отверстие объектива не очень велико.

Если же ее ставить выпуклой стороной к глазу, то резкость на оси будет удовлетворительна, хотя неискаженное aberrациями поле зрения будет небольшим. Такое ее положение целесообразно применять при наблюдении в светосильный объектив, так как иначе значительная сферическая aberrация окуляра сильно испортит качество изображения. В телескопе со светосильным объективом сферическая aberrация окуляра и его хроматизм положения будут не столь заметны лишь при применении больших увеличений или малых выходных зрачков. В то же время хроматизм увеличения будет весьма значительным. Поэтому при наблюдениях оказывается возможным использовать лишь центральную, весьма небольшую часть поля зрения (около  $15^\circ$ ). Хрома-

тизм увеличения является наиболее вредной aberrацией любого окуляра.

Окуляр Гюйгенса (рис. 88). Хотя одиночная линза и обладает определенными достоинствами, однако ее недостатки заставили ими пренебречь. Первым типом усовершенствованного окуляра был окуляр Гюйгенса, изоб-

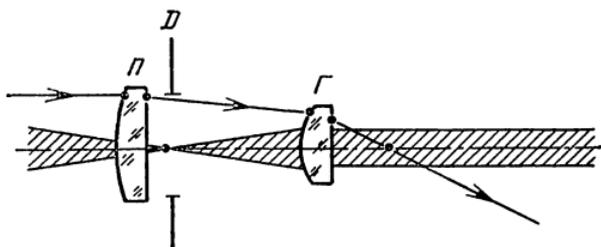


Рис. 88. Окуляр Гюйгенса

ретенный знаменитым физиком в середине XVII в. Он содержит две, как правило, плоско-выпуклые линзы, разделенные воздушным промежутком и обращенные своими выпуклыми поверхностями к объективу. Передняя линза П, ближайшая к объективу, называется *левой*, или *коллективом*. Ее задача состоит в том, чтобы сжать пучки лучей. Это позволяет уменьшить диаметр второй по ходу лучей линзы Г — *глазной* при том же угловом поле. Фокальная плоскость окуляра Гюйгенса находится между линзами, вследствие чего им нельзя пользоваться как лупой. Хотя в окулярах этого типа практически отсутствует хроматизм

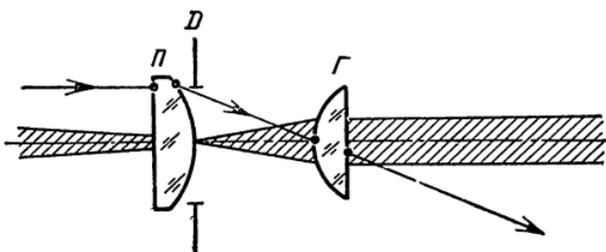


Рис. 89. Окуляр Рамсдена

увеличения, тем не менее сферическая aberrация, хроматизм положения и кривизна поля препятствуют получению четких изображений. Астигматизм и дисторсия в окуляре Гюйгенса незначительны. Размер его поля зрения составляет около  $50^\circ$ .

Окуляр Рамсдена (рис. 89). Представителем другого типа окуляров, фокальная плоскость которых находится перед линзами, является окуляр Рамсдена. Так

же, как и окуляр Гюйгенса, он содержит две линзы, но они обращены своими выпуклыми поверхностями друг к другу. Обе линзы имеют равное фокусное расстояние и должны отстоять друг от друга также на величину их фокусного расстояния. В такой системе лучше всего исправляется сферическая аберрация и хроматизм положения. Кривизна поля очень незначительна. Однако астигматизм существенно больше, чем в окуляре Гюйгенса. Недостатком этого окуляра является то, что выпуклая поверхность передней линзы находится в фокусе глазной линзы, вследствие чего все царапины и пылинки на ее поверхности совершенно отчетливо видны и мешают наблюдениям. Еще существеннее, что в этом окуляре выходной зрачок расположен очень близко к глазной линзе и даже может оказаться внутри нее, куда невозможно поместить глаз наблюдателя. Это ведет, разумеется, к ограничению поля зрения. Поэтому в чистом виде окуляр Рамсдена, как он изображен на рис. 89, не применяется. На практике обычно берут расстояние между линзами несколько меньшим, чем их фокусное расстояние (от  $2/3$  до  $3/4$ ), т. е. жертвуют ради устранения указанных недостатков исправлением хроматизма увеличения. Размер его поля зрения составляет около  $40^\circ$ .

О к у л я р К е л ь н е р а (рис. 90). Дальнейшим усовершенствованием окуляров является применение в них

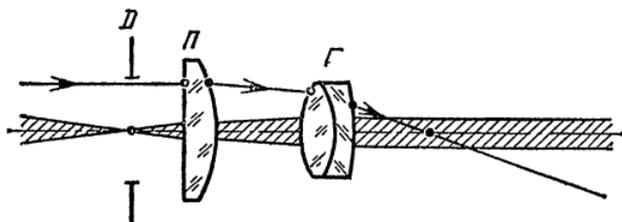


Рис. 90. Окуляр Кельнера

глазной линзы, склеенной из двух сортов стекла: крона и флинта. Передняя, полевая линза осталась прежней — плоско-выпуклой. В этом случае удастся существенно уменьшить хроматизм увеличения и хроматизм положения, несколько уменьшить сферическую аберрацию и астигматизм. Значение дисторсии практически такое же, как и в случае рамсденовского окуляра. Окуляр Кельнера обладает широким угловым полем, порядка  $50^\circ$ . Вынос выходного зрачка больше, чем в окуляре Гюйгенса и тем более в окуляре Рамсдена, но все же недостаточен для сильных окуляров. Поэтому наибольшее распространение этот тип окуляра получил в схемах с фокусным расстоянием 15 ... 25 мм.

Симметричный окуляр (рис. 91). Данный тип окуляра получил, пожалуй, наибольшее распространение. Это связано с тем, что при достаточной простоте конструкции он обладает существенно большим выносом выходного зрачка по сравнению с окуляром Кельнера. Кроме того, у него удовлетворительно исправлена сферическая

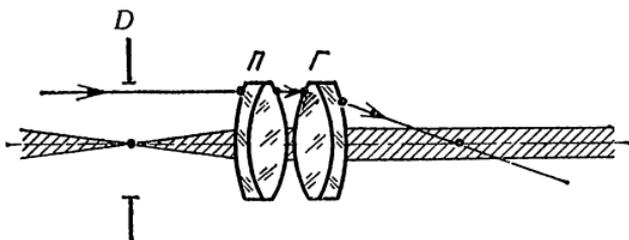


Рис. 91. Симметричный окуляр

абберация. Он может быть осуществлен с плоским полем, небольшим астигматизмом и чуть более заметной дисторсией, чем у кельнеровского окуляра. Симметричную схему целесообразно применять для сильных и средних окуляров. Поле зрения ее достигает  $45^\circ$ .

Окуляр с вынесенным зрачком (рис. 92). Для особо сильных окуляров с фокусным расстоянием от 7 до 3,5 мм в Государственном оптическом институте (ГОИ) разработана специальная оптическая схема с сильно

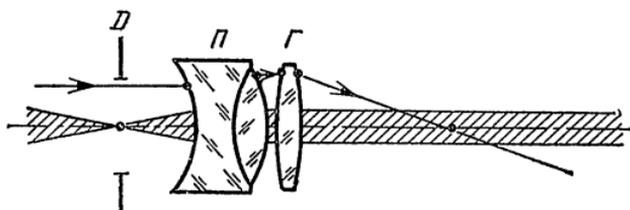


Рис. 92. Окуляр с вынесенным выходным зрачком

вынесенным окулярным кружком. Она обладает чрезвычайно малой сферической aberrацией, что позволяет использовать данный тип окуляра с наиболее светосильными отражательными телескопами. Кроме этого, у нее хорошо исправлены хроматические aberrации, астигматизм и кривизна поля изображения. К сожалению, искажение подобия предмета, создаваемое ею, — дисторсия, значительно и составляет несколько десятков процентов. Поле зрения свыше  $40^\circ$ .

Ортоскопический окуляр (рис. 93). Он является, пожалуй, наилучшим из существующих двух-

компонентных схем. Окуляр состоит из тройной склеенной полевой линзы и очень близко расположенной к ней простой плоско-выпуклой глазной линзы. Выходной зрачок находится на значительном расстоянии от последней поверхности глазной линзы, что, как известно, особенно важно для сильных окуляров. Все aberrации в нем очень хорошо исправлены, а дисторсия по сравнению с окуляром с вынесенным выходным зрачком приблизительно на порядок меньше. Видимое поле у него до  $40^\circ$ .

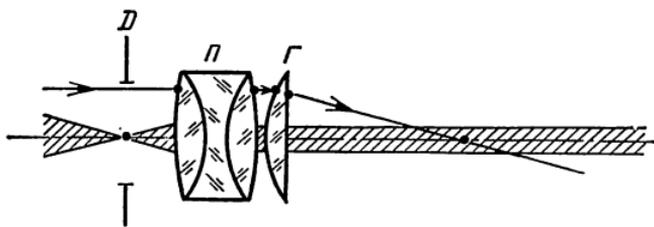


Рис. 93. Ортоскопический окуляр

В настоящее время разработан целый класс так называемых *широкоугольных окуляров*, поле зрения которых превышает  $60^\circ$ . Они представляют собой сложные многокомпонентные склеенные системы. За счет этого удалось добиться высокого качества изображения по всему полю, однако они сложны в изготовлении. Фокусные расстояния их, как правило, достаточно значительны, и поэтому их можно использовать лишь для получения слабых увеличений.

Из краткого описания свойств основных типов окуляров выделим вслед за Д. Д. Максуповым следующие положения:

- 1) Окуляры с фокусными расстояниями меньше 5—7 мм желательны типа с «вынесенным зрачком».
- 2) Окуляры с фокусным расстоянием меньше 10—14 мм и с удовлетворительным исправлением дисторсии желательны типа «симметричных».
- 3) Для светосильных и сверхсветосильных объективов наилучшим типом оказываются окуляры с вынесенным зрачком и ортоскопический, а затем идут типы окуляров в следующей последовательности: симметричный, Кельнера, Рамсдена, одиночная линза, Гюйгенса.
- 4) Все окуляры, кроме одиночной линзы и окуляра Гюйгенса, могут быть рассчитаны с достаточно плоским полем.
- 5) Астигматизм лучше всего исправлен в окуляре Гюйгенса, а затем в окуляре с вынесенным зрачком.

6) Дисторсия наибольшая (если не считать одиночной линзы) в окуляре с вынесенным зрачком и наименьшая в ортоскопическом и в симметричном окуляре специального расчета.

7) Хроматизм увеличения достаточно мал во всех окулярах, кроме окуляра Рамсдена, где он недоисправлен, и одиночной линзы, где он вовсе не исправлен. Хроматизм увеличения особенно хорошо исправлен в окуляре с вынесенным зрачком и ортоскопическом.

8) В отношении простоты конструкции и изготовления окуляры можно разделить на четыре группы: а) одиночная линза; б) окуляры Рамсдена и Гюйгенса; в) окуляры Кельнера, симметричный, с вынесенным зрачком, ортоскопический; г) широкоугольный.

В заключение еще раз хочется акцентировать внимание читателя на том, что светосильная зеркальная система особенно требовательна к окулярам хорошего качества. Автор считает, что желание изготовить подобные окуляры из «оптического сырья» — набора мелких линзочек, клеенных систем и блоков не выдерживает, вообще говоря, никакой критики хотя бы уже потому, что любителю неизвестна марка стекла, из которого изготовлена данная линза, а значит, и ее показатель преломления, который необходим для правильного конструирования всей оптической системы. Если же пытаться самому изготовить линзы из оптического стекла с известными характеристиками, то придется столкнуться с целым рядом трудностей. Собственно говоря, задача здесь перед любителем будет стоять примерно такая же, как в случае изготовления объектива для телескопа рефрактора, даже если у него уже имеется аберрационный расчет интересующей схемы окуляра, т. е. определены оптимальные радиусы кривизны линз, их толщины, воздушные промежутки и др. Основные этапы работы будут заключаться в следующем: изготовление рабочего инструмента («чашка», «гриб») для шлифования линз под заданный радиус кривизны, изготовление пробных стекол, полирование линз, контроль качества получающейся поверхности, ее центрировка, подрезка под заданный диаметр, просветление, склейка и др. Поэтому автор настоятельно рекомендует воспользоваться окулярами заводского изготовления. Наиболее удачные из них содержатся в призмённых биноклях, зрительных трубах, теодолитах и в ряде других оптических приборов, правильному выбору которых может помочь настоящая глава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максutow Д. Д.* Астрономическая оптика.— 2-е изд.— Л.: Наука, 1979.—395 с.
2. *Максutow Д. Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики.— 2-е изд.— М.: Наука, 1984.—272 с.
3. *Михельсон Н. Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция.— М.: Наука, 1976.—512 с.
4. *Навашин М. С.* Телескоп астронома-любителя.— 3-е изд.— М.: Наука, 1975.—432 с.
5. *Сикорук Л. Л.* Телескопы для любителей астрономии.— М.: Наука, 1982.— 240 с.
6. Любительское телескопостроение: Сб. статей/Сост. М. М. Шемякин. Под ред. М. С. Навашина.— М.: Наука, 1964.—108 с.
7. Любительское телескопостроение: Сб. статей, вып. 2/Сост. М. М. Шемякин. Под ред. М. С. Навашина.— М.: Наука, 1966.—100 с.
8. Любительские телескопы. Сб. статей/Под ред. М. М. Шемякина.— М.: Наука, 1975.—120 с.
9. *Михельсон Н. Н.* Расчет отсекаелей в телескопе типа Кассегрена//Оптико-механическая промышленность.— 1974.— № 5.— С. 28—30.
10. *Подъяпольский А. Н., Шемякин М. М., Шуваев Г. В.* Изготовление самодельного телескопа-рефлектора / Астрономический календарь на 1980 год.— М.: Наука, 1979.—352 с.
11. *Наумов Д. А.* Изготовление 400-миллиметрового зеркала // Земля и Вселенная.— 1983.— № 2.— С. 74—76.
12. *Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н.* Теория оптических систем.—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1981.—432 с.
13. *Гвоздева И. П., Коркина К. И.* Теория оптических систем и оптические измерения — М.: Машиностроение, 1981.—384 с.
14. *Смирнов В. А.* Обработка оптического стекла.—3-е изд., перераб. и доп.— Л.: Машиностроение, 1980.—183 с.
15. *Винокуров В. М.* Исследование процесса полировки стекла.— М.: Машиностроение, 1967.

21. Стронг Д. Техника физического эксперимента.— Л.: Лен-издат, 1948.

22. Applied Optics.—1984.— P. 1907.

23. Ritchey G. W. On the Modern Reflecting Telescope and the Making and Testing of Optical Mirrors // Smithsonian Contrib. Knowl.— 1904.— V. 34.— P. 3.

24. Couder A. Recherches sur les Déformations des Grands Miroirs Employes aux Observations Astronomiques.— Thesis, Faculté des Sciences de Paris, 1932.

25. Линник В. П. Способ исследования параболических зеркал и астрономических объективов // Труды ГОИ.— 1931.— Т. VII, вып. 67.— С. 15.

26. Cuder A. Procédé d'examen d'un miroir concave non sphérique // Revue d'Optique théorique et instrumentale.— 1927, ann 6.— № 2.— P. 49.

27. Dall H. E. A Null Test for Paraboloids // Amateur Telescopes Making. Scientific American.— New York.— 1953.— V. 3.— P. 149

28. Ross F. E. Parabolizing Mirrors Without a Flat // Astrophysical Journal.— 1943.— V. 98.— P. 341.

29. Offner A. A Null Corrector for Paraboloidal Mirrors // Applied Optics.— 1963.— V. 2.— P. 153.

30. Dall H. E. A Null Test for Paraboloids // J. Br. Astron. Assoc.— 1947.— V. 57.— P. 201.

31. Schlauch J Construction of a Dall Null Tester // Sky and Telesc.— 1959.— V. 18.— P. 222.

32. Stolzmann D. E., M. Hatch Extensions of the Dall Null // Test Sky and Telesc.— 1976.— 52, 210.

33. Уханов М. А. Применение линзового компенсатора для исследования параболических зеркал и зеркал Манжена//Оптикомеханическая промышленность.— 1961.— № 5.— С. 27—29.

34. Hindle J. H A New Test for Cassegrainian and Gregorian Secondary Mirrors // Mon. Not. R. Astron. Soc.— 1931.— 91, 592.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>Глава 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕ-</b> <b>ЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ, . . . . .</b>	<b>8</b>
§ 1. Основные законы геометрической оптики . . . . .	8
§ 2. Оптическая система в представлении геометрической оптики . . . . .	9
§ 3. Ограничение пучков лучей в телескопической системе	11
§ 4. Физическое изображение точки . . . . .	13
§ 5. Разрешающая способность и увеличение . . . . .	18
<b>Глава 2. ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПОВ</b>	<b>23</b>
§ 1. Простая однозеркальная система . . . . .	23
§ 2. Простая однозеркальная система со вспомогательным плоским зеркалом . . . . .	35
§ 3. Сложная двухзеркальная система . . . . .	41
<b>Глава 3. ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ</b> <b>ПОВЕРХНОСТИ . . . . .</b>	<b>53</b>
§ 1. Общие замечания . . . . .	53
§ 2. Материалы для астрономических зеркал . . . . .	54
§ 3. Абразивная обработка стекла . . . . .	62
§ 4. Подготовительные операции . . . . .	66
§ 5. Шлифование рабочей поверхности зеркала . . . . .	70
§ 6. Полирование рабочей поверхности зеркала . . . . .	94
<b>Глава 4. ИСПЫТАНИЕ И ДОВОДКА ОПТИЧЕСКОЙ</b> <b>ПОВЕРХНОСТИ . . . . .</b>	<b>106</b>
§ 1. Метод исследования вогнутых зеркал . . . . .	106
§ 2. Получение и контроль правильной сферической по- верхности . . . . .	120
§ 3. Получение и контроль параболической поверхности	126
§ 4. Получение и контроль выпуклой гиперболической поверхности . . . . .	133
§ 5. Компенсационные методы контроля . . . . .	137
§ 6. Контроль плоской поверхности . . . . .	143
<b>Глава 5. ОКУЛЯРЫ . . . . .</b>	<b>148</b>
Список литературы . . . . .	156

*Наумов Дмитрий Алексеевич*  
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИКИ  
ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЬСКИХ  
ТЕЛЕСКОПОВ-РЕФЛЕКТОРОВ  
И ЕЕ КОНТРОЛЬ

Серия «Библиотека любителя астрономии»  
выпуск 9

Редактор *Г. С. Куликов*  
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*  
Технический редактор *С. Я. Шкляр*  
Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ 12762

Сдано в набор 15.06.87. Подписано к печати 16.12.87.  
Т-24291. Формат 84×108/32. Бумага книжно-журнальная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,4.  
Усл. кр.-отт. 8,82. Уч.-изд. л. 8,46. Тираж 44 000 экз.  
Заказ № 1000. Цена 40 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового  
Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография»  
имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли.  
113054 Москва М-54, Валовая, 28

Отпечатано во 2-й типографии издательства «Наука».  
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6. Зак. 1336

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

---

*Вышла из печати в 1987 году:*

**БАБАДЖАНОВ П. Б. Метеоры и их наблюдение.**— 1987.— 176 с. (Б-ка любителя астрономии)— 35 к. 94 000 экз.  
(Темплан 1987 г., № 136)

Популярное изложение современных представлений о метеорах: об их природе и частоте появления, о методах их исследования, о задачах и способах их наблюдений любителями астрономии. Приводятся результаты изучения главных метеорных потоков, распределения метеорных тел в межпланетном пространстве и притока метеорного вещества на Землю.

Указанную книгу можно приобрести в магазинах книготорга и Академкниги, распространяющих физико-математическую литературу.

Цена 40 коп.