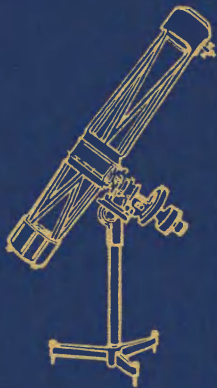


ТЕЛЕСКОП АСТРОНОМА-ЛЮБИТЕЛЯ

М.С. НАВАШИН

М.С. НАВАШИН

ТЕЛЕСКОП
АСТРОНОМА-
ЛЮБИТЕЛЯ



М. С. НАВАШИН

ТЕЛЕСКОП АСТРОНОМА-ЛЮБИТЕЛЯ

Под редакцией В. П. ЦЕСЕВИЧА

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1975

52

Н 15

УДК 522.2

Михаил Сергеевич Навашин

ТЕЛЕСКОП АСТРОНОМА-ЛЮБИТЕЛЯ

М., 1975 г., 432 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *С. Я. Шкляр*

Корректор *А. Л. Ипатова*

Сдано в набор 28/VII 1975 г. Подписано к печати 27/XI 1975 г.
Бумага 84×108¹/₃₂ тип. № 2. Физ. печ. л. 13,5. Условн. печ. л. 22,68.
Уч.-изд. л. 23,39. Тираж 28 000 экз. Т-17393. Цена книги 91 коп.
Заказ № 778.

Издательства «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. 198052, Ленинград, Л-52, Измайловский про-
спект, 29

Н 20605—161
053(02)-75 178-76

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательства «Наука», 1975 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	6
От автора (ко второму изданию)	7
От автора (к первому изданию)	9
Из предисловия автора к книге «Самодельный телескоп-рефлектор»	11
Глава I. Принципы действия телескопа и его устройство.	13
1. Основные сведения по геометрической теории телескопа	13
2. Поправки, вносимые дифракционной теорией в геометрическую теорию изображения	32
Глава II. Основы оптической конструкции телескопов	41
1. Естественные недостатки линз и зеркал и способы их исправления	41
2. Типы телескопов	57
3. Рефрактор или рефлектор?	72
4. Краткая история любительского телескопостроения	77
5. Создание телескопа своими силами	84
Глава III. Изготовление вогнутого главного зеркала для рефлектора	88
1. Вводные замечания	88
2. Материалы и приспособления	89
3. Кругление и шлифовка	104
4. Полировка	133
5. Испытание зеркала	142
6. Фигуризация	158
7. Параболическое зеркало	176
Глава IV. Вспомогательное (диагональное) плоское зеркало	203
1. Роль плоского зеркала в рефлекторе Ньютона	203
2. Призма полного внутреннего отражения вместо диагонального зеркала	204
3. Размеры и форма диагонального зеркала	205
4. Изготовление плоского диагонального зеркала	212
Глава V. Окуляры	238

Глава VI. Серебрение зеркал	250
Глава VII. Монтировка оптических частей телескопа. Юстировка и испытание	265
1. Основная задача	265
2. «Чикинская доска»	266
3. Устройство трубы рефлектора	271
4. Центрировка и юстировка телескопа	280
5. Испытание телескопа	283
Глава VIII. Самодельный телескоп системы Кассегрена	289
Глава IX. Устройство установки телескопа	300
1. Общие соображения	300
2. Азимутальные установки	302
3. Экваториальная установка	311
4. Регулирование экваториальной установки	319
Глава X. Работа с телескопом	323
1. Принадлежности телескопа	323
2. Атмосферные помехи и условия наблюдений	331
3. Уход за телескопом	336
4. Астрономический павильон	339
5. Программы наблюдений	342
Дополнения	344
I. Элементы теории оптических систем (В. П. Цесевич)	344
1. Основные законы распространения света	344
2. Главные плоскости и кардинальные точки	346
3. Построение изображений с помощью главных плоскостей	347
4. Геометрия параксиальных лучей	350
5. «Нулевые» лучи	353
6. Двояковыпуклая линза	357
7. Система, состоящая из двух линз	360
8. Окуляр Гюйгенса	361
9. Телескопические системы	362
10. Свойства конических сечений	364
11. Оптические свойства эллипсоида	367
12. Оптические свойства параболоида вращения	368
13. Оптические свойства гиперboloида	369
14. Расчет рефлектора Кассегрена	369
15. Дифракционные явления	377
II. Металлические и металло-стеклянные шлифовальники (А. С. Фомин)	378
1. Металлические шлифовальники	379
2. Металло-стеклянные шлифовальники	383
III. Некоторые приемы обработки и испытания астрономических зеркал, применяемые в современной практике любительского телескопостроения (М. М. Шемякин)	391

1. Станочек с вращающимся столиком . . .	391
2. Шлифовка металлическим кольцом . . .	392
3. Изготовление цементного шлифовальника .	393
4. Испытание зеркала	396
IV. Самодельные теневые приборы (А. Н. Подъяпольский)	397
1. Простейшая рычажная конструкция . . .	398
2. Более сложная конструкция	400
V. Самодельные астрономические окуляры (А. Н. Подъяпольский)	402
VI. Труба-каркас для телескопа (А. Н. Подъяпольский)	411
VII. Изготовление экваториальной установки (А. Н. Подъяпольский)	417
VIII. Фотометрический стандарт, рекомендованный для исследования телескопа (В. П. Цесевич) .	425

Литература	431
----------------------	-----

ОТ РЕДАКТОРА

Со времени второго издания книги прошло свыше семи лет. За это время астрономы-любители, как одиночки, так и объединенные в более или менее многочисленные коллективы, создали ряд телескопов, технике изготовления которых они учились по этой книге. Поэтому коллективы телескопостроителей, объединяемые Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом, высказали пожелания, чтобы их опыт был предан гласности, что и привело к некоторой переработке и дополнению 3-го издания книги.

Настоящее издание было подготовлено в известной мере еще при жизни автора. Окончательное редактирование текста было проведено уже после смерти автора, скончавшегося 28 сентября 1973 г.

В подготовке 3-го издания приняли участие М. М. Шемякин, который написал главу VIII, А. Н. Подъяпольский, А. С. Фомин и В. П. Цесевич, написавшие Дополнения.

В. П. Цесевич

*Светлой памяти
ДМИТРИЯ ДМИТРИЕВИЧА
МАКСУТОВА
соединявшего в себе
глубину ученого-специалиста
с лучшими чертами любителя*

ОТ АВТОРА (КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ)

Пять лет, прошедших со дня выхода в свет первого издания этой книги, были годами освоения космоса. Довольно вероятно, что ближайшее пятилетие увидит успехи, о которых пока можно лишь мечтать. Но происходящее гигантское развитие науки и техники возможно только при достаточном росте творческих сил, рождаемых народом и являющихся двигателем прогресса. Эти силы воплощаются в кадрах. А источником пополнения кадров телескопостроителей, и притом особенно ценным, являются массы астрономов-любителей, составляющих подобно любителям в других областях науки и техники замечательный слой энтузиастов, беззаветно преданных любимому делу.

Первая мысль, являющаяся у автора такой книги, как наша, это, конечно, мысль о читателях, бóльшая часть которых состоит именно из астрономов-любителей. За время, прошедшее после появления «Телескопа астронома-любителя», я получил сотни писем из разных мест страны, от читателей разных специальностей, профессий и возрастов. Пишут рабочие, колхозники, агрономы, инженеры, учителя, военнослужащие, студенты, научные сотрудники, преподаватели высшей школы и, конечно, школьники. Бóльшая часть читателей просит совета по

разным вопросам, часть сообщает о своих успехах, другие высказывают свои замечания, пожелания или предложения. Многие из высказываний читателей были очень полезны как материал для исправления и улучшения отдельных мест книги. Наиболее же общий вывод из всей массы писем состоит в том, что наши любители нуждаются не только в совете, но и в помощи делом. До сих пор любители-телескопостроители не снабжаются даже простейшими материалами, и в первую очередь обыкновенным толстым зеркальным стеклом. Организация снабжения астрономов-любителей материалами является поистине неотложной задачей, притом гораздо более важной, чем, вероятно, многие себе представляют. Уже давно пришло время приравнять астрономов-любителей к другим любителям, например, хотя бы к фотографам или коллекционерам различных направлений.

Моим читателям я выражаю глубокую благодарность за теплый прием, оказанный ими «Телескопу астронома-любителя» и убедивший меня в полезности книги для дела; еще больше я благодарен им за ряд замечаний, которые, как сказано выше, использованы для улучшения книги. Особенно я признателен инж. А. С. Фомину, который, как активный телескопостроитель и знаток дела, дал много ценных указаний и советов.

Первому изданию «Телескопа астронома-любителя» посчастливилось: оно несет на себе дату, открывшую эру космических путешествий. Второму изданию выпадает на долю не меньшее счастье: оно выходит в год 50-летия Советской власти и может, следовательно, считаться, хоть и малой, но лептой, поступающей в сокровищницу, составляющуюся из даров, которыми трудящиеся нашей страны отмечают этот великий юбилей.

27 ноября 1966 г.,
Ленинград

М. Навашин

ОТ АВТОРА (К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ)

Эта книга представляет значительно переработанное, исправленное и дополненное издание ранее вышедших двух работ автора, имевших целью служить пособиями для астрономов-любителей, стремящихся не только приобрести необходимые сведения по элементарной теории телескопа, но и овладеть мастерством, позволяющим своими силами построить высококачественный телескоп.

Многочисленные отклики, полученные от читателей, показали, какой громадный интерес вызывает эта тема и какова, следовательно, потребность в таких пособиях. В то же время из многочисленных читательских писем я смог извлечь немало уроков, использованных мною при подготовке нового издания книги. Читатели, которым я не смог ответить лично, найдут ответы на свои вопросы в этой книге.

Надо полагать, что в наши дни поразительных (но не неожиданных!) успехов в познании космоса интерес к астрономическим наблюдениям станет в полном смысле слова массовым. Достаточно подумать о естественном желании своими глазами наблюдать за полетом искусственных спутников и космических кораблей. По удивительной случайности окончание подготовки рукописи книги совпало с первым днем наступившей великой эры космических путешествий, когда состоялся первый в

истории человечества космический полет советского человека. Радостно, что на моей работе будет стоять эта великая дата. Не менее радостно чувствовать уверенность в том, что среди моих читателей будут космонавты, последователи замечательного советского человека Юрия Гагарина.

Пользуюсь случаем, чтобы выразить искреннюю благодарность чл.-корр. АН СССР, проф. Д. Д. Максутову, много сделавшему для улучшения книги.

12 апреля 1961 г.
Ленинград

М. Навашин

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К КНИГЕ «САМОДЕЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР»

Книга рассчитана в основном на астрономов-любителей (хотя она может оказаться полезной и специалисту), в первую очередь на преподавателей астрономии или руководителей астрономических кружков при рабочих клубах, домах пионеров, станциях юных техников и планетариях. Коллектив, сплотившийся вокруг руководителя, не только может создать хороший инструмент для серьезных наблюдений, но его члены в процессе самой работы над созданием телескопа приобретут ценнейшие знания. Можно не сомневаться в том, что такой кружок будет источником пополнения кадров телескопостроителей и астрономов-наблюдателей. Недаром вышел из любителей пионер советского телескопостроения А. А. Чикин, из любителей же вышли выдающиеся теоретики и конструкторы новых типов телескопов лауреаты Государственных премий Д. Д. Максutow, Н. Г. Пономарев и другие, которыми по справедливости гордится наша страна.

Задача книги — научить изготовлению настоящего телескопа, пригодного для серьезных работ. Поэтому я не касаюсь здесь изготовления телескопа из очковых стекол; читатель, который захотел бы построить такой телескоп, может обратиться к литературе, указанной в конце книги.

Будучи наставлением к изготовлению телескопа, книга мало касается вопросов, относящихся к работе с телескопом. Но она отчасти может служить своеобразным введением в практику телескопических наблюдений, так как читатель, усвоивший на практике ее содержание, приобретет предварительный опыт.

Имея практический опыт, я мог на деле проверить все, о чем я пишу. Я не сомневаюсь, конечно, что многие

из моих советов далеки от идеала, зато это «советы очевидца». А ничто так не ценно для начинающего, как совет человека, собственноручно сделавшего то, что сперва может показаться слишком трудным. Разумеется, совет через книгу — далеко не то, что личный пример, но он много полезнее чтения наставлений-компиляций, где часто несущественное заслоняет основное и решающее, а встречаются и недоразумения, сбивающие читателя с толку. Кое-какие подробности, которые в изобилии встречаются в книге, могут показаться на первый взгляд излишними; однако, как показал опыт, именно от таких «мелочей» часто зависит весь успех дела. Еще многое предстоит сделать в области уточнения и рационализации любительского телескопостроения, и не один из моих читателей, я уверен, еще сделает свой вклад в это важное дело.

Нет никакого сомнения в том, что никто из читателей не потерпит поражения при попытке построить себе телескоп. Конечно, чисто технические трудности, прежде всего при подборе необходимых материалов, неизбежны, но, как показал опыт, они всегда преодолимы.

При работе над книгой автору очень помогло широкое использование опыта других любителей телескопостроения. Особенно же большую товарищескую помощь ему оказал проф. Д. Д. Максutow как в приобретении собственного опыта при сооружении рефлектора, так и рядом ценных советов и указаний, которые не только позволили устранить недочеты и упущения при составлении книги, но и немало содействовали обогащению ее содержания.

В дореволюционной России наука была уделом одиночек, не встречавших поддержки и даже наталкивавшихся на противодействие; в нашей стране, при построении коммунистического общества, даже любители-одиночки всегда найдут товарищескую помощь, не говоря уже о деятельности коллективов, перед которыми открыты широчайшие возможности. Если эта книга хоть сколько-нибудь поможет практическому развитию коллективного творчества на пользу дальнейшего процветания астрономии — науки, в которой наша страна издавна занимала почетное место, автор будет считать свою задачу выполненной.

Ленинград, май 1952 г.

...чтобы узнать вещь, нужно ее сделать; ибо хотя вы думаете, что знаете ее, в этом не может быть уверенности, пока вы не попытаетесь ее сделать.

Софокл

Г Л А В А I

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ТЕЛЕСКОПА И ЕГО УСТРОЙСТВО

1. Основные сведения по геометрической теории телескопа

Возможности человеческого зрения ограничены. Даже человек с острым зрением не может различить деталей, видимых под углом, меньшим чем $1\frac{1}{2}$ —2 минуты дуги. Так, например, миллиметровые деления линейки различимы на расстоянии, не превышающем $2—2\frac{1}{2}$ м; печатные буквы этой книги сольются в сплошные полосы, если их рассматривать примерно с такого же расстояния, и т. д. На расстоянии, в тысячу раз большем ($2—2\frac{1}{2}$ км), мы уже с трудом разглядим предметы размером в 1 м. На Луне же, находящейся на расстоянии, в 150 000 раз большем, глаз едва ли различит предмет размером менее 150 км.

Рассматривая мелкие предметы, мы стараемся приблизить их к глазам, однако после некоторого предела глаз перестает ясно их видеть. Расстояние, на котором нормальный глаз может без особого усилия рассматривать предмет, равно примерно 25 см; это так называемое «расстояние ясного зрения». На расстоянии ясного зрения можно еще различить предмет размером около 0,1 мм, что близко к предельному углу в $1\frac{1}{2}$ минуты. Чтобы разглядеть более мелкие детали, нужно рассматривать предмет на расстоянии, меньшем 25 см. Сделать это можно с помощью увеличительного стекла. Тогда детали, представлявшиеся раньше под углом, меньшим

одной минуты, представятся под бoльшим углом и станут различимы.

Для наблюдателя, находящегося на Земле, единственный способ увеличить угол, под которым он видит, например, Луну, — это создать ее изображение и рассматривать его вблизи. Чем крупнее будет полученное изображение Луны, тем больше будет угол, под которым нам представится каждая деталь на ней, и тем более мелкие детали станут доступными нашему зрению.

Создать вблизи от наблюдателя изображение далекого предмета и позволить, таким образом, различить подробности, недоступные невооруженному глазу, — первое назначение телескопа.

Самая «мелкая» деталь лунного диска, доступная невооруженному глазу, имеет в поперечнике около 150 км (!). Поэтому простым (невооруженным) глазом на Луне можно увидеть только темные пятна равнин и светлые горные районы. Не будь телескопа, мы, вероятно, до сих пор не знали бы природы этих пятен. Но первый же взгляд, брошенный Галилеем через его маленькую зрительную трубу, сразу открыл истинный вид лунной поверхности с ее кратерами, горами и низменностями.

Зрачок человеческого глаза даже в полной темноте имеет диаметр не более 6—8 мм. Через такое небольшое отверстие проходит столь мало света, что глазу обычно недоступны звезды слабее 6-й звездной величины. Отверстие объектива телескопа несравненно больше зрачка глаза; объектив собирает в сотни и тысячи раз больше света и узким пучком направляет его в наш глаз. Таким образом, глядя в телескоп, мы как бы увеличиваем свой зрачок до размера объектива; количество света, падающего в глаз наблюдателя, при этом увеличивается пропорционально площади объектива.

Собрать как можно больше света от далекого предмета — таково второе назначение телескопа.

Галилей мог видеть в маленький объектив своего телескопа звезды всего на 2 звездные величины более слабые, чем те, которые доступны невооруженному глазу. Но и такой слабый по современным понятиям инструмент совершил коренной переворот в представлениях о Вселенной. Самые большие современные телескопы почти в миллион раз мощнее человеческого глаза. С их помощью можно было бы видеть звезды, на 15 звездных

величин более слабые, чем видимые невооруженным глазом, т. е. звезды до 21-й величины.

Итак, назначение телескопа — *увеличить угол, под которым видно небесное тело, и собрать как можно больше лучей света, идущих от него.*

Принцип действия телескопа настолько прост, что может быть объяснен в нескольких словах: изображение далекого предмета, даваемое объективом (линзой или вогнутым зеркалом), рассматривается в окуляр, как в лупу. В простейшей форме он осуществляется теперь в игрушечной зрительной трубе, сделанной из двух очковых стекол.

Сколь ни прост этот принцип, он стал известен лишь в начале XVII в., а для практического осуществления телескопа, пригодного для настоящих астрономических наблюдений, потребовались большие усилия величайших умов того времени.

За свою 350-летнюю историю конструкция телескопа изменялась в соответствии с развитием его теории, причем теория, как правило, опережала практику. Все это время шла борьба между сторонниками линзовых и зеркальных телескопов (рефракторов и рефлекторов).

В наше время конструкция телескопа несравненно совершеннее конструкции его прототипа начала XVII в. Вполне естественно, что его устройство отвечает требованиям теории, поэтому успешно пользоваться телескопом может лишь тот, кто достаточно владеет этой теорией. Нечего и говорить, конечно, как важно значение теории для того, чтобы построить телескоп, хотя бы и небольшой.

Следовательно, знакомство с основами теории телескопа — наша первая задача.

На рис. 1 изображены продольные разрезы телескопа с линзовым объективом (рефрактор) и телескопа с зеркальным объективом (рефлектор) системы Ньютона. Приводя их здесь для общей ориентировки, мы пока обратимся к оптической схеме с тем, чтобы позднее вернуться к изучению телескопа, но уже более детальному.

Пусть линза *Об* (рис. 2) есть объектив, на который падают лучи *s* от звезды. Прямая *EF*, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей объектива, будет его *оптической осью*; в точке *F* расположен *главный фокус*. Так как расстояние до звезды громадно и она кажется точкой, то лучи *s*, идущие от звезды, практически

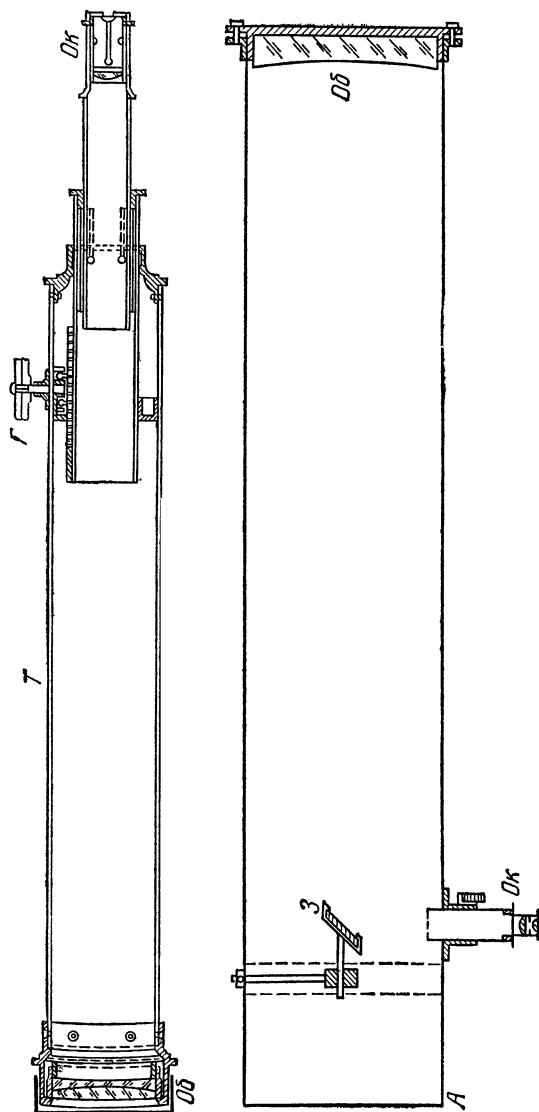


Рис. 1. Продольные разрезы рефлектора (вверху) и рефлектора (внизу).

параллельны; поэтому, пройдя через объектив и преломившись в нем, они пересекутся в главном фокусе F , где создадут *изображение* звезды. Но так будет лишь в том случае, если оптическая ось нацелена на звезду. На рис. 2 показаны лучи s' , идущие от звезды, находящейся в стороне от оси. Изображение этой звезды, конечно,

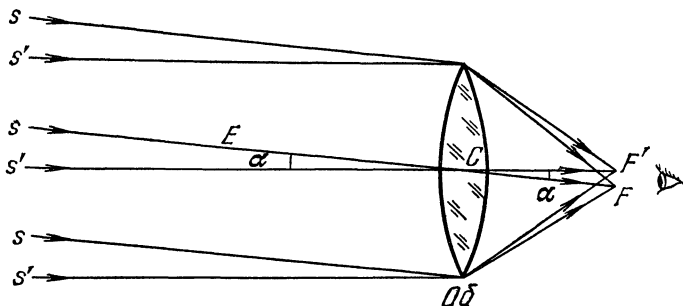


Рис 2. Образование изображения линзовым объективом.

также окажется в стороне от оси, в точке F' , лежащей в плоскости, перпендикулярной к оптической оси и проходящей через главный фокус; эта плоскость называется *фокальной плоскостью*.

Если бы объектив был наведен на небесное тело, обладающее видимым поперечником, например, на Луну, то наш чертеж изображал бы ход лучей от двух точек этого тела, например, от противоположных краев лунного диска. Изображение, созданное объективом в фокальной плоскости, как видно из чертежа, будет *обратным*. Из чертежа также ясно, что если смотреть из центра объектива, то угловые расстояния между небесными телами (или между двумя точками одного тела) и их изображениями равны, так как $\angle FCF' = \angle sCs'$. Обозначив эти углы буквой α , мы можем написать уравнение

$$FF' = FC \operatorname{tg} \alpha.$$

Ввиду малости угла α можно принять $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$. Тогда

$$FF' = FC \cdot \alpha,$$

где угол α выражен в радианах. Из этого уравнения следует, что одному и тому же угловому расстоянию на небе будет соответствовать тем большая линейная величина изображения, чем больше расстояние FC , т. е. фокусное расстояние объектива. Измерив диаметр изобра-

жения Луны в фокальной плоскости миллиметровой линейкой, мы найдем, что при фокусном расстоянии, равном 1 м, он составит около 9 мм, а при двухметровом фокусном расстоянии — около 18 мм. Разумеется, глядя из центра объектива, мы увидели бы изображение Луны в фокальной плоскости точно под тем же углом, как и на небе, т. е. под углом около $1/2^\circ$.

Поместившись позади фокуса, будем рассматривать изображение (см. рис. 2); глаз расположим при этом на расстоянии ясного зрения от изображения (25 см). Если бы фокусное расстояние объектива было равно также 25 см, то изображение было бы видно под одинаковым углом как из центра объектива, так и из точки, находящейся на расстоянии ясного зрения позади фокуса, т. е. под тем же углом, под каким виден предмет непосредственно на небе. Если же фокусное расстояние объектива превосходит 25 см, то изображение будет находиться ближе к глазу, чем к объективу; глаз, следовательно, увидит его под большим углом, и предмет представится наблюдателю в увеличенном виде. Это видимое увеличение прямо пропорционально фокусному расстоянию объектива. Оно равно частному от деления фокусного расстояния на величину расстояния ясного зрения. Таким образом, объектив с фокусным расстоянием в 1 м даст четырехкратное увеличение; изображение Луны, образованное таким объективом, при рассматривании с расстояния в 25 см будет видно не под углом в $1/2^\circ$, под каким представляется простому глазу Луна на небе, а под углом в 2° . Если теперь мы воспользуемся лупой (или окуляром) для рассматривания изображения в фокусе объектива, то мы еще увеличим его в соответствии с фокусным расстоянием нашей лупы или окуляра. В самом деле, при рассматривании через лупу нам придется приблизить ее настолько, чтобы ее фокальная плоскость совпала с фокальной плоскостью объектива. Тогда, по закону действия линзы, лучи от объектива после преломления в лупе выйдут параллельными пучками и, попав в глаз, преломятся в нем, создав изображение на сетчатой оболочке. Глаз будет в таком случае видеть отчетливое изображение Луны под углом, во столько раз большим, во сколько раз расстояние от лупы до этого изображения меньше расстояния от объектива до изображения, т. е. во столько раз, во сколько фокусное расстояние лупы (окуляра) меньше фокусного расстояния

объектива. Таким образом, увеличение зависит только от фокусных расстояний объектива и окуляра *).

Если обозначить фокусное расстояние объектива через f_1 и фокусное расстояние окуляра через f_2 , то увеличение M **) определится формулой

$$M = \frac{f_1}{f_2}.$$

Рассматривая через окуляр с фокусным расстоянием в 10 мм изображение, созданное объективом с фокусным расстоянием в 1 м (1000 мм), мы получим увеличение в $1000/10 = 100$ раз.

Из сказанного понятен смысл выражения «телескоп приближает предметы». Действительно, увеличивая угол, под которым виден предмет, телескоп вызывает совершенно такой же геометрический эффект, какой наблюдается при приближении к предмету.

Увеличение, даваемое телескопом, можно оценить, глядя на предмет одним глазом через телескоп, а другим непосредственно. Очень удобно для этого рассматривать кирпичную стену, находящуюся на таком расстоянии, чтобы невооруженный глаз мог еще различать в ней отдельные кирпичи. При некотором навыке удастся видеть одновременно обоими глазами и сосчитать, сколько кирпичей, видимых одним глазом непосредственно, укладывается в одном «большом» кирпиче, видимом другим глазом через телескоп.

*) Некоторые ошибочно полагают, что при рассматривании изображения без окуляра получается увеличение, равное отношению фокусных расстояний объектива и глаза; это было бы верно лишь в том случае, если бы глаз мог действовать как окуляр, т. е. его можно было бы настолько приблизить к объективу, чтобы его передняя фокальная плоскость совпала с фокальной плоскостью объектива. Но при таком положении глаза лучи приняли бы в нем параллельное направление и никакого изображения на сетчатке не дали бы, т. е. ничего, кроме света, глаз не увидел бы. Нужно ясно представлять, что нормальный глаз обычно приспособлен для рассматривания достаточно удаленных предметов, т. е. что он строит на сетчатке отчетливое изображение из лучей, падающих на него почти параллельно. Поэтому глаз ни в какой оптический прибор не может увидеть изображения, если из этого прибора в него входит пучок сильно расходящихся (или сходящихся) лучей.

**) M принимается нами для обозначения увеличения телескопа как заглавная буква от латинского слова «Magnificatio» (увеличение). В дальнейшем все особые формы увеличения мы будем обозначать латинской буквой m (например, равнозрачковое увеличение m), а если будет необходимо, то с соответственным индексом.

В связи с вопросом об увеличении телескопа стоит сказать несколько слов о кажущихся размерах наблюдаемого светила. Пожалуй, нигде так не сказывается субъективность оценки, как при попытке определить видимые размеры того или иного небесного тела в телескоп. Между тем сделать это не так уж трудно. Приведем простой расчет для Юпитера, диск которого виден невооруженным глазом под углом около $40''$.

Пусть телескоп с данным окуляром дает увеличение в 400 раз; каждая секунда расстояния на небе будет представляться при этом увеличении под углом в $400''$, а диск Юпитера — под углом около $16\,000''$ (около $4^\circ,5$). Отнеся этот угловой диаметр к расстоянию ясного зрения (25 см), мы найдем, что изображение Юпитера

будет иметь диаметр в $\frac{25 \cdot 4,5}{57} \approx 2\text{ см}$. Хотя такой расчет и приближителен, он дает вполне верное понятие о порядке величин, из которых видно, как ошибаются те, кому Юпитер в 3-дюймовую трубу кажется величиной с чайное блюдце, а Луна — с колесо. Вообще о видимых линейных размерах светил лучше не говорить, а иметь в виду только их угловые размеры (для невооруженного глаза и при наблюдении в телескоп).

До сих пор мы имели дело только с фокусным расстоянием объектива, но ничего не говорили о его диаметре. Диаметр *свободного отверстия* (D) объектива, т. е. его рабочей части, не закрытой оправой, определяет количество проходящего света; отсюда понятно его большое значение. Величину D долгое время было принято выражать в дюймах. Инструменты различались по числу дюймов свободного отверстия (3-дюймовый, 5-дюймовый и т. д.), причем для крупнейших из них число дюймов отверстия служило и продолжает служить как бы собственным именем (например, 30-дюймовый пулковский рефрактор). В настоящее время в странах, пользующихся метрической системой, обычно принято измерять диаметр свободного отверстия в миллиметрах.

Количество света, проходящее через объектив, пропорционально площади объектива, т. е. пропорционально D^2 .

Важнейшей величиной, характеризующей объектив, является отношение диаметра свободного отверстия объектива к его фокусному расстоянию $\left(\frac{D}{f}\right)$, носящее на-

звание *относительного отверстия*, или, что не вполне строго (и даже неверно), светосилы *).

Мы будем обозначать относительное отверстие буквой A (от слова апертура — отверстие). Часто бывает удобно пользоваться величиной, обратной относительному отверстию, т. е. $\frac{1}{A}$; эту величину проф. Д. Д. Максудов назвал *относительным фокусом* и обозначил символом V . Таким образом, относительное отверстие A объектива с $D = 200 \text{ мм}$ и $f = 3000 \text{ мм}$ будет равно $\frac{1}{15}$ или $1:15$, а его относительный фокус V равен 15. К величине свободного отверстия объектива и его относительного отверстия нам придется еще много раз возвращаться впоследствии.

Все сказанное относится как к линзовому объективу рефрактора, так в равной мере и к зеркальному объективу рефлектора, с той лишь разницей, что в последнем изображение получается по ту же сторону от объектива, где находится предмет, так как лучи, идущие от предмета, не проходят сквозь объектив, а отражаются от него (рис. 3). Это не имеет принципиального значения, и вся терминология и рассуждения, применявшиеся нами к линзовому объективу, без всяких оговорок годятся и для объектива зеркального. На практике, впрочем, разграничивают оба типа объективов, сохраняя название «объектив» лишь для линзовых объективов, а зеркальные называя «зеркалами». Однако такое разграничение вызывается скорее традицией, чем действительной необходимостью. Все дальнейшие рассуждения этой главы одинаково относятся, как к рефрактору, так и рефлектору, если нет особой оговорки.

*) Эта ошибка особенно широко распространена среди любителей. «Светосилой» правильно называть характеристику, указывающую отношение освещенности изображения, созданного объективом, к яркости предмета. Светосила объектива определяется величиной $\left(\frac{D}{f}\right)^2$, т. е. квадратом его относительного отверстия.

Так, например, объектив с относительным отверстием $1:2$ в четыре раза светосильнее и, следовательно, создаст вчетверо большую освещенность изображения, чем объектив с относительным отверстием $1:4$. Это хорошо известно любителям фотографии, которые, уменьшая отверстие диафрагмы объектива на два деления и изменяя тем самым величину его относительного отверстия в два раза, в четыре раза увеличивают выдержку при съемке, чтобы получить нормально экспонированный негатив.

Наблюдаемый предмет виден в телескоп отчетливо лишь в том случае, если окуляр установлен на строго определенном расстоянии от фокуса объектива. Это такое положение, при котором фокальная плоскость окуляра совмещена с фокальной плоскостью объектива.

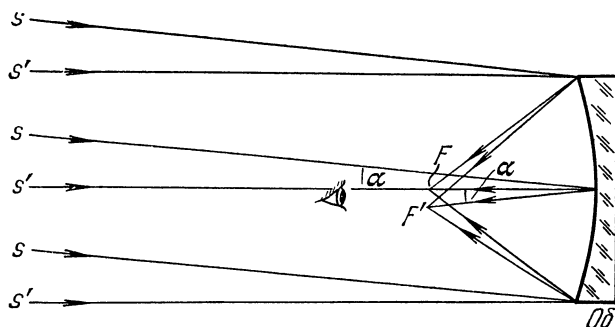


Рис. 3. Образование изображения вогнутым зеркалом.

Приведение окуляра в такое положение, при котором наиболее отчетливо виден объект, называется наводкой на фокус, или *фокусировкой*. Когда телескоп наведен на фокус, то лучи от каждой точки предмета выходят из окуляра параллельными *).

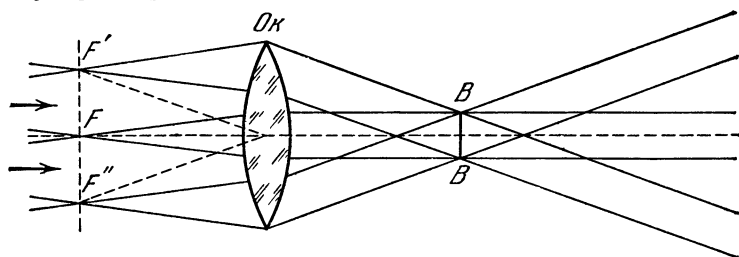


Рис. 4. Образование выходного зрачка телескопа.

Пусть линза Ok (рис. 4) есть окуляр, наведенный на фокус телескопа, в который наблюдаются три звезды. Световые лучи от изображений этих звезд, образованных в точках F, F', F'' в фокальной плоскости объектива,

*) Конечно, речь идет о нормальном глазе. Для близорукого глаза окуляр нужно несколько придвинуть, для дальновзорного — отодвинуть. В связи с этим выходящие из окуляра лучи отклоняются от параллельности: в первом случае становятся расходящимися, во втором — сходящимися.

превращаются окуляром в параллельные пучки, пересекающиеся в плоскости $ВВ$. Сколько бы ни было звезд или, что то же, точек изображения (например, диска Луны), каждая из них даст такой же пучок параллельных лучей, и все эти пучки, имея одинаковый диаметр, пересекутся в одной и той же площадке $ВВ$. Эта площадка $ВВ$ будет сечением самой узкой части двойного конуса лучей, образованного пучками световых лучей, выходящих из окуляра. Она носит название *выходного зрачка*. Наведя телескоп на светлое небо, мы легко можем увидеть выходной зрачок, поднеся к окуляру экран из кусочка белой бумаги или, лучше, из матового стекла. Приближая и удаляя этот экран, мы найдем такое положение, при котором светлый кружочек имеет наименьшие размеры и в то же время наиболее отчетлив. Легко понять, что выходной зрачок есть не что иное, как изображение отверстия объектива, т. е. входного зрачка телескопа, образованное окуляром.

Здесь, как ясно читателю, имеется в виду *положительный* окуляр, в простейшем случае представляющий собой собирающую (выпуклую) линзу (схема рис. 4). Но в качестве окуляра может быть использована и отрицательная (рассеивающая) линза; теперь такое устройство применяется лишь для простейших (театральных) биноклей. Система с окуляром из рассеивающей линзы (носящая название галилеевой трубы) не имеет выходного зрачка позади окуляра. О последствиях этого сказано ниже (стр. 58).

Так как конус лучей от объектива превращается окуляром, наведенным на «бесконечность» (фокусированным на очень далекий предмет, небесное тело), в параллельный пучок лучей, диаметр которого равен диаметру выходного зрачка, то мы можем вывести еще некоторые важные следствия (рис. 5). Если $Ок$ есть окуляр, диаметр свободного отверстия которого равен диаметру выходного зрачка d (для пучка лучей от звезды, помещенной для простоты на оптической оси) и фокус которого совмещен с фокусом F объектива $Об$, то из подобия треугольников следует

$$\frac{D}{d} = \frac{f_1}{f_2} = M,$$

откуда

$$d = \frac{D}{M},$$

т. е. диаметр выходного зрачка равен диаметру объектива, деленному на увеличение, а увеличение равно отношению диаметра объектива к диаметру выходного зрачка. Последнее отношение позволяет определить

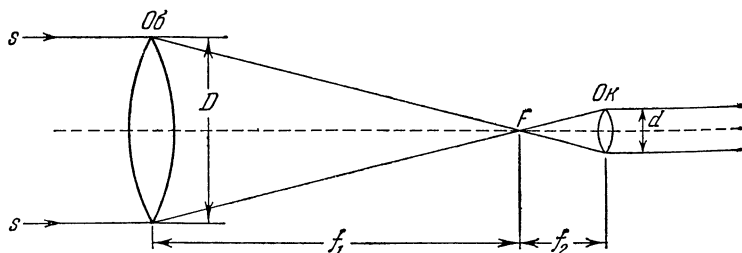


Рис. 5. Зависимость между увеличением, диаметром объектива и диаметром выходного зрачка.

увеличение, даваемое телескопом, если неизвестны ни фокусное расстояние объектива, ни фокусное расстояние окуляра. Понятно, что, зная диаметр выходного зрачка, легко найти фокусное расстояние окуляра, которое, вообще говоря, непосредственно измерить далеко не просто. Из равенства $\frac{D}{d} = \frac{f_1}{f_2}$ находим $f_2 = \frac{d f_1}{D} = dV$. Нужно только измерить диаметр выходного зрачка, что

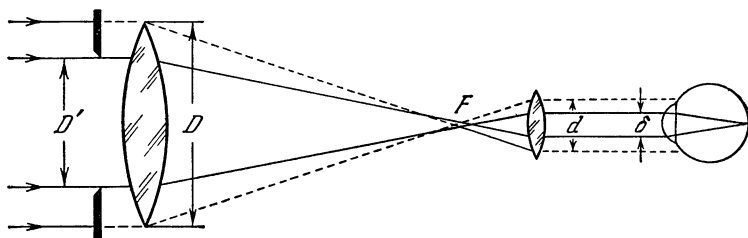


Рис. 6. Ограничение выходного зрачка равносильно уменьшению отверстия объектива диафрагмой.

легко можно сделать, сфокусировав выходной зрачок на матовом стекле или даже на кусочке прозрачной бумаги. Существуют для этого и специальные несложные приспособления.

В выходном зрачке концентрируется весь свет, собираемый объективом. Поэтому, заслоняя часть выходного зрачка, мы как бы заслоняем часть объектива (рис. 6). Отсюда вытекает одно из важнейших правил: выходной зрачок не должен быть больше зрачка

глаза наблюдателя, иначе часть света, собранного объективом, будет потеряна. Кроме того, поскольку выходной зрачок представляет собой наиболее узкую часть конуса лучей, выходящих из окуляра, не безразлично, на каком расстоянии от окуляра помещается глаз: держа глаз слишком далеко от окуляра, т. е. в более широкой части конуса лучей (см. рис. 4), мы рискуем получить для внеосевых точек поля зрения лишь часть света, выходящего из окуляра, и тем самым также уменьшить полезное поле зрения. Вот почему, между прочим, очки, не позволяющие достаточно близко придвинуть глаз к окуляру, обычно мешают смотреть в бинокль или в телескоп. Из сказанного ясно, что надо конструировать телескоп так, чтобы выходной зрачок не был слишком близок к глазной линзе окуляра; это достигается, как мы увидим дальше, конструкцией и подбором подходящих окуляров.

Из определения выходного зрачка следует, что величина его тем меньше и он тем ближе к окуляру, чем короче фокусное расстояние окуляра (чем «сильнее» окуляр), и наоборот, чем «слабее» окуляр, тем больше выходной зрачок и тем он дальше отстоит от окуляра. Определим увеличение, которое дает окуляр, образующий выходной зрачок, равный зрачку глаза; это так называемое *наименьшее полезное* или *равнозрачковое увеличение*, которое мы обозначим через m . Его можно получить по только что выведенной формуле, в которой нужно диаметр выходного зрачка d приравнять диаметру зрачка глаза δ :

$$m = \frac{D}{\delta}.$$

Найдем теперь зависимость между наименьшим полезным увеличением m , фокусным расстоянием f_2 окуляра и фокусным расстоянием f_1 объектива. Поскольку $m = \frac{f_1}{f_2}$, то фокусное расстояние окуляра определится как частное от деления фокусного расстояния объектива на наименьшее полезное увеличение

$$m = \frac{D}{\delta} = \frac{f_1}{f_2}; \quad f_2 = \frac{f_1 \delta}{D} = V \delta.$$

По этой формуле, зная диаметр зрачка человеческого глаза, легко найти фокусное расстояние самого слабого

полезного окуляра простым умножением величины от-носительного фокуса объектива на диаметр зрачка глаза.

Если принять диаметр зрачка глаза равным 6 мм, то наименьшее полезное (равнозрачковое) увеличение будет равно, следовательно, одной шестой диаметра объектива (в миллиметрах) или (если почему-либо удобнее иной расчет) соответствующее фокусное расстояние самого слабого окуляра должно быть равно ушестеренному относительному фокусу. При наблюдениях очень ярких объектов (например, Луны) зрачок глаза сужается и наименьшее полезное увеличение соответственно увеличивается.

Бинокли обычно рассчитываются таким образом, чтобы их увеличение приближалось к наименьшему полезному (равнозрачковому), причем диаметр зрачка глаза чаще всего принимается равным 5 мм. Так, полевой шестикратный бинокль имеет объектив диаметром в 30 мм, а десятикратный — в 50 мм.

При рассматривании изображения в фокусе объектива невооруженным глазом, без окуляра, с расстояния ясного зрения мы сможем использовать все отверстие объектива лишь в том случае, если его относительное отверстие не превышает 1 : 40, так как глаз будет находиться на расстоянии 25 см позади фокуса объектива. В самом деле, приняв диаметр зрачка глаза $\delta = 6$ мм, имеем (из формулы $f_2 = \sqrt{V\delta}$)

$$V = \frac{f_2}{\delta} = \frac{250}{6} \approx 42.$$

Так как диаметр зрачка глаза меняется от 6—8 мм (при полной темноте) до 2 мм (при ярком дневном освещении), то наименьшее полезное увеличение будет различно при разных условиях и при наблюдении предметов различной яркости. Поэтому при пользовании слабыми окулярами нужно всегда учитывать обстановку, определяющую величину зрачка глаза. Это станет понятно на конкретном примере. Положим, что наблюдается слабый объект (туманность) в темную ночь в телескоп с диаметром объектива, равным 100 мм; принимая, что в этом случае зрачок глаза имеет диаметр не менее 6 мм, мы имеем $m = \frac{100}{6} = 16,7$. При наблюдении днем, например, Венеры, нам с тем же объективом пришлось бы повысить минимальное полезное увеличение

по крайней мере втрое, т. е. до 50, так как диаметр зрачка глаза при ярком дневном освещении не больше 2 мм. Фокусные расстояния нужных в этих случаях окуляров мы легко найдем по только что приведенным формулам $f_2 = V\delta$ или $f_2 = \frac{f_1}{m}$. Если у нашего телескопа $V = 15$ (обычное отношение у рефракторов), то фокусное расстояние слабейшего полезного окуляра будет в случае ночного наблюдения туманности равно $15 \cdot 6 = 90$ мм, а для дневных наблюдений Венеры $15 \cdot 2 = 30$ мм. Исходя из фокусного расстояния объектива нашего телескопа, которое при $D = 100$ мм будет $100 \cdot 15 = 1500$ мм, мы получим, конечно, те же величины: для первого случая $f'_2 = \frac{1500}{16,7} = 90$ мм, а для второго $f''_2 = \frac{1500}{50} = 30$ мм.

Эти несложные рассуждения приводят нас еще к одному вопросу, связанному с использованием света, собираемого объективом,—к вопросу о *яркости изображения*. До сих пор мы не принимали во внимание видимого поперечника наблюдаемых светил, считая их «светящимися точками». Это в первом приближении справедливо при наблюдении звезд, угловой диаметр которых ничтожно мал. Количество света, собранное объективом от звезды, будет зависеть только от свободного отверстия объектива (если не считать потерь света в объективе). На него не будут влиять ни величина фокусного расстояния, ни окулярное увеличение, если мы только не спустимся ниже наименьшего полезного увеличения. Количество света, собираемого объективом, как мы уже говорили, пропорционально его площади или квадрату свободного отверстия. Поэтому если телескоп с объективом диаметром в 25 мм показывает звезды, например, 9-й звездной величины, то при $D = 50$ мм мы должны увидеть звезды вчетверо более слабые, т. е. приблизительно 10,5 звездной величины.

Звездная величина наиболее слабой звезды, доступной телескопу, определяет его *проницающую силу*. В табл. 1 приводятся приближенные значения проницающей силы телескопов с различными отверстиями.

Совершенно иначе обстоит дело с предметами, имеющими заметные угловые размеры, например, с планетами. Здесь телескоп будет уменьшать видимую яркость

Т а б л и ц а 1

Диаметр объек- тива, мм	Предельная звездная величина	Диаметр объектива, мм	Предельная звездная величина
50	10,3	200	13,4
70	11,1	250	13,8
100	11,9	500	15,3
140	12,6	1000	16,9

изображения, в то время как при наблюдении точечных объектов (звезд) он ее увеличивает пропорционально квадрату своего свободного отверстия. В самом деле, при увеличении фокусного расстояния f пропорционально увеличиваются и линейные размеры изображения такого светила; количество же света, собираемого объективом при неизменном диаметре D , остается, конечно, прежним. Одно и то же количество света распределяется, следовательно, на большую площадь изображения, которая растет пропорционально f^2 . Таким образом, при увеличении f (или, что то же, V) вдвое мы увеличиваем площадь изображения вчетверо. Количество света на единицу его площади, которое определяет яркость изображения, уменьшится в том же отношении. Поэтому изображение будет быстро тускнеть при уменьшении относительного отверстия. Совершенно такое же действие окажет и окулярное увеличение, понижающее яркость изображения в том же отношении, что и уменьшение относительного отверстия объектива. Поэтому для наблюдения слабых протяженных объектов (туманностей, комет) предпочтительно слабое увеличение, но, конечно, не ниже наименьшего полезного; оно может быть значительно повышено при наблюдении ярких планет, и в особенности Луны.

При наблюдении звезд на фоне достаточно светлого неба с большой наглядностью выступает разница между протяженным объектом и звездой. По мере того как наблюдатель применяет все более сильные увеличения, фон неба становится темнее, звезды же остаются яркими и все сильнее выделяются на нем. Это происходит потому, что одно и то же количество света от фона неба распределяется на все большей площади, изображения

же звезд сохраняют почти прежние размеры. Возможность видеть в телескоп звезды днем объясняется именно этим. Впрочем, как мы скоро увидим (стр. 40), это верно лишь до известного предела увеличения, перейдя за который наблюдатель будет замечать уже и ослабление яркости звезд.

Представим теперь в количественной форме выводы, сделанные нами относительно яркости изображения. Правда, в случае точечных объектов (т. е. звезд) нельзя говорить об их «яркости», так как яркость есть сила света единицы площади, поэтому в случае звезд надо говорить об их блеске. Поэтому телескоп увеличивает блеск наблюдаемой в него звезды, так как площадь его объектива больше площади зрачка глаза. Если площадь объектива $S = \frac{\pi D^2}{4}$, а площадь зрачка глаза $s = \frac{\pi \delta^2}{4}$, то относительный блеск C изображения звезды, видимой в телескоп, определится по формуле

$$C = \left(\frac{D}{\delta}\right)^2.$$

Численно он будет, следовательно, равен квадрату наименьшего полезного (равнозрачкового) увеличения.

Приставляя глаз к телескопу, мы как бы увеличиваем площадь свободного отверстия глаза в отношении $C = \left(\frac{D}{\delta}\right)^2$ (рис. 7).

Величина C характеризует, однако, светособирающую силу телескопа лишь в отношении звезд, которые не имеют видимых размеров. В случае же протяженных объектов (планет, туманностей и т. д.) самый гигантский инструмент не будет иметь преимущества перед карманной зрительной трубкой в отношении видимой яркости изображения объекта при одинаковости зрачков выхода (d).

Видимую яркость изображения (без учета потерь света в телескопе) можно определить по формуле

$$B = \left(\frac{D}{\delta}\right)^2 : M^2 = \left(\frac{m}{M}\right)^2.$$

Это простое выражение имеет весьма важное значение. В переводе на язык наблюдателя оно означает, что яркость протяженного объекта в телескопе чрезвычайно быстро падает при повышении увеличения, именно пропорционально квадрату последнего. Так, например, если

мы с увеличением в 100 раз рассматриваем туманность в телескоп, наименьшее полезное увеличение которого составляет 20, мы снижаем видимую яркость этой туманности в $\left(\frac{100}{20}\right)^2$, т. е. в 25 раз.

Из этих соотношений выводятся практические заключения о наиболее рациональном выборе увеличений для

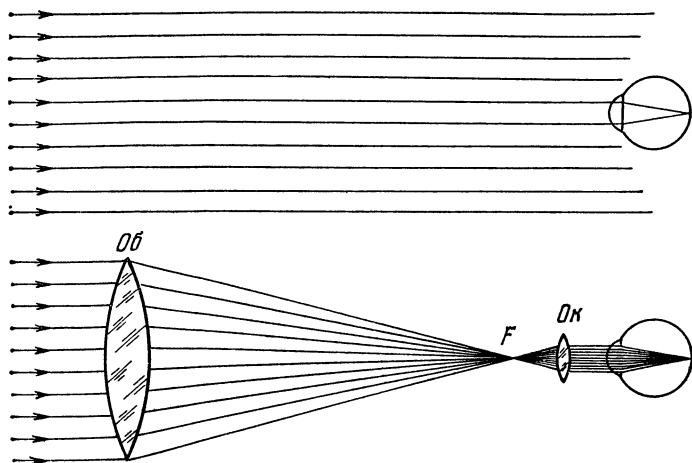


Рис. 7. Увеличение телескопом количества света, попадающего в глаз.

изучения светил того или другого рода. Предположим, что мы наблюдаем Сатурн в телескоп с объективом диаметром в 50 мм при 100-кратном увеличении; изображение будет настолько тусклым, что, несмотря на значительные видимые размеры планеты в телескопе, мы немного увидим на ней. Но, применив то же увеличение при наблюдении в телескоп с объективом диаметром в 100 мм, мы получим вчетверо более яркое изображение, что позволит гораздо лучше разобраться в деталях.

Относительную яркость изображения можно выражать и просто через диаметр выходного зрачка. Поскольку $d = \frac{D}{M}$, а $B = \left(\frac{D}{\delta}\right)^2 : M^2 = \left(\frac{D}{M}\right)^2 : \delta^2$, то $B = \left(\frac{d}{\delta}\right)^2$. Следовательно, при наблюдениях с одним окуляром имеем $B' = \left(\frac{d'}{\delta}\right)^2$, а с другим $B'' = \left(\frac{d''}{\delta}\right)^2$, откуда $\frac{B'}{B''} = \left(\frac{d'}{d''}\right)^2$.

Иначе говоря, относительные яркости изображений пропорциональны квадратам выходных зрачков. Вот, между прочим, почему в биноклях называют светосилой квадрат выходного зрачка.

Последнее, что нам осталось еще рассмотреть, это важный вопрос о *поле зрения* телескопа. Так называется угловой поперечник круглого участка неба, видимого в телескоп. В любом телескопе, какой бы конструкции он ни был, поле зрения зависит от фокусного расстояния объектива и ограничено диафрагмой окуляра (подробнее см. в главе об окулярах). Подобно тому как угол, под которым видно из центра объектива изображение светила в фокусе, равен углу, под которым оно представляется глазу на небе, поперечник окулярной диафрагмы виден из центра объектива под тем же углом, под которым представляется поперечник кружка неба, видимого в данный телескоп с этим окуляром. В окулярах различных систем диафрагма помещается различно, но глазу, помещенному в плоскости выходного зрачка и рассматривающему ее всегда с расстояния, пропорционального фокусному расстоянию окуляра, она представляется под определенным углом, различным для окуляров одной и той же системы, независимо от их фокусного расстояния. В то же время из центра объектива диафрагма видна под углом тем меньшим, чем больше фокусное расстояние объектива. Поэтому размер поля зрения при одном и том же окуляре обратно пропорционален фокусному расстоянию объектива.

Угол, под которым диафрагма окуляра видна наблюдателю, называется *угловым полем зрения окуляра*, в отличие от *углового поля зрения телескопа*, представляющего угловой поперечник видимого в телескоп кружка на небе. Если же в окуляре не было диафрагмы, то поле зрения ограничивалось бы оправой его передней линзы; так как оправа находится не в фокальной плоскости объектива, то лучи от объектов, находящихся достаточно далеко от оптической оси, частично заслонялись бы ею и, следовательно, предметы, находящиеся у края поля зрения телескопа, выглядели бы тусклее, чем центральные. Такое частичное преграждение света, вызывающее снижение яркости на краю поля зрения, называется *виньетированием*. Во избежание этого диафрагма окуляра, называемая *диафрагмой поля*, помещается так,

чтобы она совпала с фокальной плоскостью объектива. Все, что попадет в отверстие диафрагмы, будет поэтому посылать весь свой свет в глаз наблюдателя.

Мы вернемся к рассмотрению поля зрения, когда будем специально говорить об окулярах (гл. V). Здесь нам достаточно будет сказать, что величина поля зрения телескопа равна величине поля зрения окуляра, деленной на увеличение.

Так, при обычном окуляре с полем зрения в 40° при увеличении в 40 раз действительное поле зрения телескопа будет равно 1° . Телескоп с фокусным расстоянием в 1600 мм, снабженный таким окуляром с фокусным расстоянием в 20 мм, будет обладать полем зрения в $30'$, т. е. покажет весь диск Луны. Тот же окуляр, примененный к 30-дюймовому пулковскому рефрактору ($f = 14,06$ м), даст увеличение в 703 раза, и его поле зрения будет $\frac{40^\circ}{703} \approx 3',4$ или только 5 поперечников Юпитера. Чтобы увидеть в такой рефрактор весь диск Луны, понадобился бы громадный окуляр с фокусным расстоянием, равным $\frac{14\,060}{80} = 176$ мм, а диаметр его передней линзы должен был бы быть более 120 мм.

Действительное поле зрения становится, следовательно, очень малым при сильных увеличениях. При наименьшем полезном увеличении пулковского рефрактора, равном 125, поле зрения составляет всего около $20'$ или $\frac{2}{3}$ поперечника лунного диска, а при увеличении, например, 2800 оно менее $1'$, т. е. немногим более поперечника диска Юпитера.

Измерить угловую величину поля зрения телескопа проще всего, определяя время, в течение которого звезда, расположенная близ небесного экватора, пройдет суточным движением через все поле зрения по его диаметру. Это время в секундах, умноженное на 15, даст диаметр поля зрения в секундах дуги.

2. Поправки, вносимые дифракционной теорией в геометрическую теорию изображения

Выше мы рассматривали световые лучи как геометрические прямые, а их пересечения как математические точки. Однако это геометрическое представление годится лишь как первое приближение. Изображение, возникаю-

щее в действительности при преломлении и отражении света, заметно отличается от геометрического изображения, существующего лишь в нашем представлении.

Рассматривая в сильный окуляр изображение звезды, образованное объективом, мы замечаем, что оно не является точкой, как того требует только что разобранный геометрическая схема, а выглядит кружком, окруженным несколькими концентрическими кольцами, яркость которых быстро убывает к периферии (рис. 8).

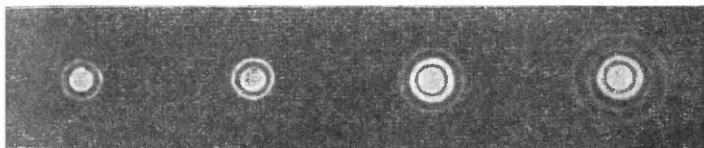


Рис. 8. Вид изображений светящихся точек различной яркости при их рассмотрении в фокусе объектива с помощью сильного окуляра.

Но этот светлый кружок — не истинный диск звезды, а видимый результат явления дифракции света.

Светлый центральный кружок называется *дифракционным диском*, а окружающие его кольца носят название *дифракционных колец*. Как показывает теория, видимый угловой поперечник дифракционного диска зависит от длины волны света (т. е. от цвета падающих лучей) и от диаметра объектива. Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$\rho = 1,22 \frac{\lambda}{D},$$

где ρ — угловой радиус дифракционного диска (при наблюдении его из центра объектива), D — диаметр свободного отверстия объектива (в сантиметрах) и λ — длина волны света (в сантиметрах). Это выражение дает угловой радиус диска в радианах; для перевода в градусные меры (секунды дуги) его нужно умножить на значение радиана в секундах. Следовательно,

$$\rho = 1,22 \frac{\lambda}{D} 206\,265 \text{ секунд дуги.}$$

Под таким углом радиус дифракционного диска виден из центра объектива; под таким же углом он

проектируется из центра объектива на небесную сферу. Угловой поперечник его будет, разумеется, вдвое больше. Как мы знаем (стр. 18), это равносильно тому, как если бы истинный диск наблюдаемой звезды имел такой угловой поперечник.

Линейный радиус дифракционного диска находится по формуле

$$r = \rho f, \text{ откуда } r = 1,22 \lambda V.$$

Таким образом, угловые размеры дифракционной картины изображения определяются диаметром объектива и длиной волны света (цветом лучей) и от f не зависят, а линейные размеры зависят от относительного фокуса и длины волны света, но не зависят от D . Подобным же образом от тех же величин зависят и размеры дифракционных колец, окружающих центральный диск. Из того, что размер колец зависит от длины световой волны, ясно, что в случае белого света они должны быть окрашены в радужные цвета; в действительности можно заметить, что внутренние края колец имеют синюю окраску, а наружные — красную (так как длина волны синих лучей меньше длины волны красных).

Из этих немногих сведений можно сделать выводы, имеющие большое значение для работы с телескопом: 1) чем больше диаметр объектива, тем мельче подробности, различаемые с его помощью; 2) для каждого объектива существует наименьшее угловое расстояние между двумя светящимися точками (например, звездами), которые еще возможно различить раздельно с помощью данного объектива; это наименьшее угловое расстояние называется *предельным углом разрешения* или *разрешаемым углом* и является фундаментальной характеристикой объектива, по которой оценивается его *разрешающая сила*. Чем меньше предельный угол разрешения, тем выше разрешающая сила объектива.

Реальное значение разрешающей силы станет нам вполне ясным, если мы будем наблюдать двойные звезды с малыми угловыми расстояниями между компонентами. Если бы изображения звезд в фокусе объектива были точками, то при сколь угодно малом расстоянии они наблюдались бы как раздельные; в достаточно сильный окуляр мы рассмотрели бы две раздельные точки. Но в действительности благодаря дифракции

изображения звезд — не точки, а кружки; а раз так, то при определенном минимальном расстоянии их изображения коснутся друг друга, и при дальнейшем уменьшении расстояния между компонентами они, все более и более налагаясь друг на друга, сольются в одно слегка продолговатое пятнышко (рис. 9). Реально

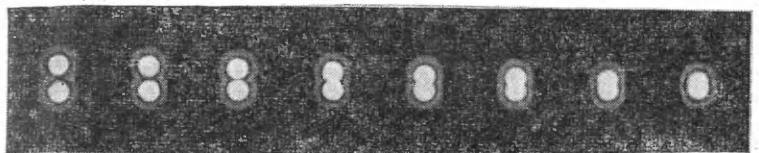


Рис. 9. Изображения двух звезд сливаются, если угловое расстояние между ними меньше разрешающей силы телескопа.

существующие две отдельные звезды будут казаться одной, и ни в какой окуляр нельзя будет увидеть два изображения. Единственная возможность увидеть две столь близкие звезды раздельно — это использовать объектив с большим свободным отверстием, так как он изобразит их в виде кружков меньшего углового размера.

Подставим теперь в формулу, выражающую угловой радиус дифракционного диска, величину длины волны света, взяв зелено-желтые лучи (к которым глаз наиболее чувствителен) со средней длиной волны $\lambda = 0,00055$ мм:

$$\rho = \frac{1,22\lambda}{D} \cdot 206\,265 = \frac{1,22 \cdot 0,00055}{D} \cdot 206\,265 = \frac{138}{D} \text{ (секунд дуги)}$$

или, округляя,

$$\rho = \frac{140}{D} \text{ (секунд дуги),}$$

где D выражено в миллиметрах.

Такой же подстановкой получим значение для линейного радиуса дифракционного диска (для тех же лучей)

$$r = 1,22 \cdot 0,00055 \cdot V = 0,00067 V \text{ мм} = 0,67 V \text{ мкм.}$$

Эти числа говорят сами за себя. Как бы ни была мала светящаяся точка, ее угловой радиус при

рассматривании в объектив с диаметром свободного отверстия, равным 140 мм, не может быть меньше 1"; она будет представляться, следовательно, кружком диаметром в 2". Если мы вспомним, что истинный угловой диаметр звезд редко превышает тысячные доли секунды, то станет ясно, сколь еще далеко от истины представление о предмете, даваемое таким объективом, хотя телескоп с объективом диаметром в 140 мм уже принадлежит к числу довольно сильных инструментов. Здесь уместно указать, что угловой радиус дифракционного диска, даваемого 200-дюймовым рефлектором ($D = 5000$ мм), равен $\frac{140}{5000} \approx 0",03$ — как раз величина наибольшего известного истинного углового диаметра звезды.

Угловой диаметр дифракционного диска не зависит от фокусного расстояния, а линейный его поперечник определяется относительным отверстием объектива. С тем же 140-мм объективом при относительном отверстии 1:15 линейный диаметр дифракционного диска будет

$$2r = 2 \cdot 0,00067 \cdot 15 \approx 0,02 \text{ мм} \approx 20 \text{ мкм.}$$

Не входя в подробности теории, которые завели бы нас слишком далеко, скажем, что фактическая величина предельного угла разрешения несколько меньше, чем угловой радиус дифракционного диска. Изучение этого вопроса приводит к выводу, что за меру разрешаемого угла практически можно принять дробь $\frac{120}{D}$ (при условии равенства блеска составляющих двойной звезды). Таким образом, объектив с диаметром свободного отверстия в 120 мм может на пределе разделить двойную звезду с расстоянием компонент равного блеска в 1". На поверхности Марса в эпохи великих противостояний (угловой диаметр диска около 25"), с помощью такого объектива можно еще различить два объекта, лежащие друг от друга на расстоянии $\frac{1}{25}$ видимого диаметра диска планеты, что соответствует примерно 270 км; на Луне могут быть раздельно видны объекты, находящиеся на расстоянии двух километров друг от друга.

Рассмотрим теперь связь между разрешающей силой и увеличением. Мы уже сказали, что как бы ни было

сильно увеличение, оно не может открыть ничего дополнительного за пределами разрешающей силы; как ни старались бы мы увеличивать изображение — окуляром или удлинением фокусного расстояния, — мы не откроем новых подробностей, а лишь увеличим видимый размер дифракционных дисков. Никакое увеличение, как бы сильно оно ни было, не может разделить двойную звезду с расстоянием компонент $0'',5$, если диаметр объектива меньше 240 мм. Поэтому совершенно бессмысленны многочисленные попытки (изредка воскресающие еще и теперь) устройства «сверхтелескопов», основанных на применении очень сильных окулярных увеличений. Граница разрешающей силы определена самой природой света (длинами световых волн), и отодвинуть ее можно лишь увеличением свободного отверстия объектива, т. е. увеличением его поперечника.

Если сильное увеличение как средство повышения разрешающей силы дальше известного предела и бесполезно, то оно, как ясно каждому, не должно быть и слишком малым, иначе детали изображения будут казаться настолько мелкими, что глаз не сможет их различать и объектив не будет использован на свою полную мощность.

Человеческий глаз как оптическая система, разумеется, также ограничен определенной разрешающей силой. Применяя к нему теорию телескопа и помня, что для глаза $D = 6$ мм (т. е. диаметр зрачка), мы получаем значение разрешающего угла $\frac{120}{6} = 20''$. На деле, однако, глаз обладает меньшей разрешающей силой вследствие ряда причин (оптические недостатки хрусталика и внутренних сред глаза, строение сетчатки и др.). Как мы видели, можно считать, что нормальный человеческий глаз способен различать угловое расстояние в $2'$, т. е. с расстояния 25 см будет раздельно видеть две точки, отстоящие друг от друга на 0,15 мм.

Таким образом, изображение, созданное объективом, должно быть увеличено с помощью окуляра по меньшей мере во столько раз, во сколько разрешающая сила объектива больше разрешающей силы глаза. Только тогда глаз увидит малейшие доступные объективу детали под углом, достаточным, чтобы можно было уверенно различать их. Если мы примем, что разрешаемый угол для глаза равен $120''$, то сказанное

можно было бы записать в виде простого равенства

$$m_p = \frac{120}{\psi},$$

где m_p — искомое необходимое увеличение, а ψ — разрешаемый объективом угол.

Так как

$$\psi = \frac{120}{D \text{ (мм)}},$$

то после подстановки будем иметь

$$m_p = \frac{120D}{120} = D \text{ (мм)}.$$

Получается интереснейший вывод: увеличение, позволяющее различить глазом все мельчайшие детали, доступные объективу телескопа, численно равно диаметру свободного отверстия объектива, выраженному в миллиметрах. Это увеличение называется *разрешающим*. Если мы вспомним, что наименьшее полезное увеличение m равно отношению диаметров объектива и зрачка глаза ($m = \frac{D}{\delta}$) и что $\delta = 6 \text{ мм}$, то получим важное соотношение между m_p и m :

$$\frac{m_p}{m} = \frac{D}{\frac{D}{6}} = 6.$$

Следовательно, разрешающее увеличение равно ушестеренному наименьшему полезному увеличению. Иными словами, оно соответствует выходному зрачку, вшестеро меньшему, чем зрачок глаза, т. е. имеющему диаметр в 1 мм. Его можно выразить через фокусное расстояние окуляра и относительный фокус объектива (\forall). Зная, что $\frac{f_1}{f_2} = D$, а $f_1 = \forall D$, получим

$$\frac{\forall D}{f_2} = D,$$

откуда $f_2 = \forall$, т. е. выраженное в миллиметрах фокусное расстояние окуляра, дающего разрешающее увеличение, равно относительному фокусу объектива. Отсюда легко понять, что чем меньше относительный фокус объектива (т. е. чем больше его относительное отверстие), тем сильнее нужны окуляры, и обратно.

Приведенные численные отношения, выведенные на основании геометрической оптики, оказываются не вполне точными при проверке жизнью, т. е. практикой наблюдений в телескоп. На деле оказывается, что разрешающим оказывается увеличение в 1,4 раза большее, чем найденное из наших формул. Поэтому формуле нужно придать такой вид:

$$m_p = 1,4D = 8,4m.$$

Фокусное расстояние окуляра, дающего разрешающее увеличение, найдется из соотношения

$$f_2 = 0,7 \text{ В}.$$

Следовательно, выходной зрачок телескопа, снабженного окуляром, дающим разрешающее увеличение, будет равен не 1 мм ($= \frac{\delta}{6}$), а $\frac{1}{1,4} = 0,7 \text{ мм}$.

Эти поправки, вносимые практикой, вовсе не означают, что геометрическая теория, на основании которой делаются расчеты, неверна. Дело в том, что она просто не принимает во внимание ряда обстоятельств, не относящихся к ее ведению и, прежде всего, вытекающих из особенностей глаза. Глаз — не только оптический инструмент, но и орган живого тела, обладающий многими свойствами, относящимися к ведению так называемой физиологии зрения.

Конечно, все наши расчеты верны лишь в том случае, если наблюдатель обладает нормальной остротой зрения, т. е. глазами с предельным углом разрешения, достигающим принятой нами величины $120''$. Многие думают, что близорукость вредит наблюдениям в телескоп. Это совершенно не верно, так как близорукость не имеет отношения к разрешающей силе глаза. Все отличие близорукого глаза от нормального в данном случае состоит в том, что он нуждается в несколько иной фокусировке, именно: близорукому человеку потребуется несколько придвинуть окуляр по направлению к главному фокусу объектива. В связи с этим близорукий наблюдатель оказывается даже в более выгодном положении, так как видит изображение под несколько большим углом. Правда, это преимущество при пользовании сильным окуляром очень незначительно в сравнении с тем, что выигрывает близорукий глаз при простом рассмотрении близких предметов.

Теперь рассмотрим влияние дифракции света на яркость изображения. Мы знаем, что в действительности изображением светящейся точки является не геометрическая точка, а дифракционный диск, окруженный дифракционными кольцами. Свет, собранный объективом от светящейся точки, например от звезды, распределяется, следовательно, на некоторую площадь, а не концентрируется в одной точке. Из этого следует, во-первых, что яркость изображения звезды в телескопе меньше той, которую можно было бы ожидать, так как часть ее света распределяется по дифракционным кольцам, и, во-вторых, что яркость изображения звезды уменьшается с применением все большего увеличения. Очевидно, это уменьшение яркости начинается с разрешающего увеличения, когда уже становятся различимыми дифракционные диски звезд. Поэтому не удивительно, что очень слабые звезды заметно тускнеют при самых сильных увеличениях.

Исследования показывают, что около 15% света звезды распределяется по дифракционным кольцам, а 85% приходится на центральный дифракционный кружок. Здесь в свою очередь свет распределяется не равномерно, а концентрируется к центру, что несколько компенсирует уменьшение яркости изображения звезды при возрастании увеличения телескопа.

В этой главе мы вкратце рассмотрели принципы, лежащие в основе действия телескопа (рефрактора или рефлектора). Эти принципы непосредственно вытекают из основных законов образования изображений линзами или зеркалами. Начиная со следующей главы, мы обратимся к реальному телескопу с его достоинствами и недостатками, вытекающими из особенностей конструкции и технического выполнения. Мы будем учитывать влияние внешних условий, особенности наблюдаемого объекта и т. п. Но исходные понятия, которые мы рассмотрели в этой главе, будут непрерывно служить основой многих заключений, поэтому к ним придется неоднократно возвращаться. Строитель телескопа и наблюдатель не должны забывать о них в своей повседневной работе.

Г Л А В А II

ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЕЛЕСКОПОВ

1. Естественные недостатки линз и зеркал и способы их исправления

Рассматривая принципы действия телескопов, мы совершенно не касались формы и качества линз и зеркал, а также особенностей материала, из которого они изготавливаются. Как мы сейчас увидим, оптические принципы могут быть использованы на практике лишь при соблюдении целого ряда условий, осуществление которых зачастую встречает много технических трудностей. Вся история телескопа состояла, в сущности, в изучении и преодолении этих технических трудностей, поскольку основные принципы геометрической оптики были известны до постройки первого телескопа.

Самыми основными недостатками линз и зеркал являются так называемые а б е р р а ц и и, т. е. отклонения хода лучей от той идеальной схемы, которую мы описали в первой главе. При малых относительных отверстиях объектива aberrации не столь велики, но при значительном относительном отверстии aberrации настолько возрастают, что объектив может оказаться практически негодным к употреблению.

Аберрации свойственны и линзам, и зеркалам, хотя и в различной степени. Мы начнем знакомство с ними в исторической последовательности, т. е. с aberrаций линз, которые стали первой помехой на пути телескопостроителей.

а) Хроматическая аберрация. Рассматривая в лупу или в окуляр изображение, образованное простой двояковыпуклой линзой (например, очковым стеклом), мы сейчас же заметим, что оно окрашено в радужные цвета. Стараясь получить четкое изображение (отфокусировать его), мы обратим внимание на то, что оно будет выглядеть различно при различных положениях окуляра: придвинув окуляр ближе к линзе, мы увидим оранжево-красную кайму вокруг изображения, отодвинув дальше — сине-фиолетовую. Рассматривая в таких условиях изображение звезды, мы напрасно стали бы искать знакомый нам из теории дифракционный диск: несмотря на все наши старания отфокусировать изображение, звезда будет выглядеть непомерно большим пятном, во много раз большим, чем мы могли ожидать из формулы $\rho = \frac{140'}{D}$ секунд дуги. Именно такими, а может быть, и еще более расплывчатыми, как можно судить по некоторым описаниям современников, видел звезды Галилей в свой первый телескоп в начале XVII в. Этот порок свойствен любой линзе. Он носит название *хроматической (цветовой) аберрации*.

Хроматическая аберрация линз в принципе столь же неустранима, как дифракция света, но вредное действие

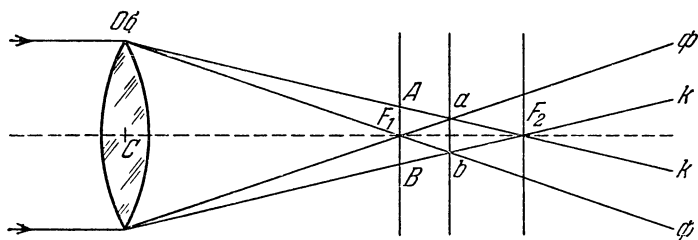


Рис. 10. Объяснение хроматической аберрации.

ее, как мы сейчас видели, неизмеримо сильнее. Она происходит оттого, что световые лучи разной длины волны неодинаково преломляются линзой (рис. 10); красные лучи преломляются слабее, синие и фиолетовые — сильнее. Если бы звезда посылала лучи какой-либо одной длины волны, например, желтые, то хроматическая аберрация отсутствовала бы. Но так как звезда излучает свет различных длин волн, то вместо одного изображения

получается множество изображений, окрашенных во все цвета спектра и вытянутых в ряд вдоль оптической оси. Ближе всех к линзе расположится фиолетовое изображение (F_1), дальше всех красное (F_2), а между ними окажутся в порядке возрастающей длины волны синее, зеленое и желтое изображения. Объясняя действие выпуклой линзы, учебники обычно рассматривают ее состоящей из призмочек, каждая из которых отклоняет проходящий сквозь нее луч, заставляя его пересекать оптическую ось в точке фокуса. Применяя подобный прием для объяснения хроматической аберрации, мы с полным основанием можем заключить, что изображение точки, образованное линзой, есть своеобразный спектр, причем лучи разных цветов пересекаются в различных фокусах F_1 , F_2 и промежуточных.

Вполне понятно, что, где бы мы ни помещали окуляр, стараясь сфокусировать изображение, большая часть лучей будет «не в фокусе». Так, приведя фокальную плоскость окуляра в положение F_1 , т. е. в фокус фиолетовых лучей, мы пересечем конус остальных лучей ближе их фокусов и увидим красную кайму или ореол вокруг изображения. Ореол будет именно красным, потому что красные лучи, проходя на наибольшем расстоянии от оптической оси линзы, дают здесь самый широкий ореол. Наведя окуляр на F_2 , мы получим другую картину: синий ореол вокруг изображения. Фиолетового изображения мы можем и не увидеть, так как к фиолетовым лучам глаз мало чувствителен.

Вследствие хроматической аберрации световые лучи не могут быть сведены в одну точку, и поэтому изображение светящейся точки будет иметь вид окрашенного кружка. Этот кружок будет наименьшим при наводке окуляра на некоторую плоскость ab (см. рис. 10), где мы увидим желто-зеленое «ядрышко», окруженное пурпурным ореолом.

Вредное влияние хроматической аберрации можно оценить, найдя способ определения диаметра того наименьшего кружка, в виде которого в силу хроматической аберрации представляется нам изображение светящейся точки. Но, изучая хроматическую аберрацию, мы сталкиваемся с новым для нас явлением: с отсутствием общего фокуса для всех лучей. Изображение оказывается растянутым вдоль оптической оси. Если размытость изображения в кружок можно назвать *поперечной*

абберацией, то растянутость его вдоль оптической оси будет *продольной абберацией*. Не касаясь теории, скажем, что величина поперечной абберации зависит от диаметра линзы и оптических свойств стекла, из которого она изготовлена. Очень важно, что на нее не влияет величина фокусного расстояния (а следовательно, и относительного фокуса). Можно приблизительно принять, что поперечная хроматическая абберация линзы, сделанной из кронгласа, составит около $1/120$ ее диаметра. Иными словами, такая линза образует изображение светящейся точки в виде окрашенного кружка, диаметр которого будет близок к $1/120$ ее свободного отверстия. Этот кружок называется кружком хроматической абберации.

Сравним теперь размер кружка хроматической абберации с линейным размером дифракционного диска; последний зависит от относительного фокуса V и от длины волны λ и его радиус равен $r = 1,22\lambda V$. Для объектива с $D = 140$ мм и $V = 15$ мы нашли (см. стр. 36), что дифракционный диск должен иметь диаметр около 0,02 мм. Кружок же хроматической абберации у объектива такого же поперечника, состоящего из одной линзы, сделанной из кронгласа, будет около 1,17 мм ($= \frac{140}{120}$), т. е. в 58 раз больше дифракционного диска. Соответственно этому и разрешающая сила такого объектива будет в десятки раз ниже теоретически возможной. Легко видеть, что разрешающая сила такого объектива лишь в два раза превзойдет разрешающую силу невооруженного глаза. Итак, хроматическая абберация разбивает иллюзии, которые могли возникнуть у нас после знакомства с идеальной схемой телескопа.

В таком именно состоянии телескоп находился почти полтора года, в течение которых оптики работали над задачей уменьшения цветного ореола вокруг изображений, превращающего звезды в радужные пятна и размывавшего детали поверхности Луны и планет.

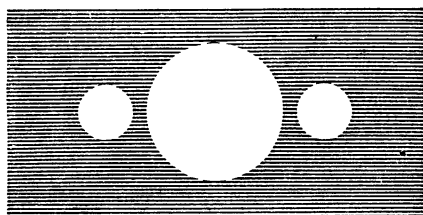
Однако оптики знали простое средство уменьшить вред от хроматической абберации: поскольку абберация зависит только от диаметра объектива, то надо соответственно увеличить фокусное расстояние последнего. Масштаб изображения при этом возрастет и поперечная абберация, остающаяся без изменения, будет меньше снижать разрешающую силу.

Дадим более строгое описание этого способа. Кружок aberrации при рассматривании в окуляр, имеющий заданное фокусное расстояние, будет виден под одним и тем же углом при любом фокусном расстоянии объектива; изображение же предмета видно под углом, пропорциональным фокусному расстоянию объектива. Таким образом, казалось бы, достаточно увеличить фокусное расстояние нашего объектива в 58 раз, чтобы он достиг возможного идеала. Действительно, угловой диаметр кружка aberrации сравняется тогда с угловым диаметром дифракционного диска, и ожидаемая резкость изображения должна приблизиться к теоретически возможной (предельный угол разрешения нашего объектива равен $1''$). Но тогда длина телескопа достигнет чудовищной величины — 122 м (!). При этом визуальное поле зрения у такого телескопа будет ничтожно малым. В самом деле, минимальное полезное увеличение для объектива с $D = 140$ мм равно 23, для его получения требуется окуляр с фокусным расстоянием в 5,3 м. Понятно, что такой слабый окуляр в отношении увеличения мало чем отличался бы от простого стекла, с которым наблюдатель стал бы в 5,3 м позади фокуса объектива. Подобный окуляр, построенный по типу наших современных окуляров, должен был бы иметь линзы поперечником около 1 м, чтобы обеспечить поле зрения около $1/2^\circ$, но вряд ли нашелся бы фантазер, которому пришлось бы в голову сделать такой окуляр. Тогда проще наблюдать вовсе без окуляра, поместив глаз на расстоянии 250 мм от фокуса; увеличение было бы в этом случае примерно в 244 раза, а поле зрения, ограничиваемое поперечником зрачка глаза ($d = 6$ мм), составило бы около 0,2 минуты дуги.

Самое удивительное, что подобные инструменты не только существовали, но в течение 150 лет считались образцовыми. Именно с помощью таких телескопов последователи Галилея, ученые XVII в. Гюйгенс, Кассини, Гевелий, сделали крупные открытия в астрономии — открыли кольца Сатурна, его яркие спутники и пр.

Необходимость уменьшения вредного влияния хроматической aberrации заставила увеличивать относительный фокус инструмента, или, иначе говоря, увеличивать длину телескопа. Телескоп Гевелия имел длину около 49 м. Изготовить трубу для такого инструмента было тогда практически невозможно. Поэтому объектив на

деревянном каркасе с помощью блоков подвешивался к верхушке высокой мачты (в несколько десятков метров), а наблюдатель на земле с окуляром в руках «ловил» изображение светила, создаваемое объективом. Чтобы видеть объектив, приходилось освещать его особым фонарем, а нужное направление ему придавалось либо самим наблюдателем при помощи длинного шнура,



либо помощником, которому наблюдатель подавал команду. Изображение светила при 50-метровом фокусе «бежало» в силу суточного движения со скоростью 4 мм в секунду; значит, чтобы пронаблюдать

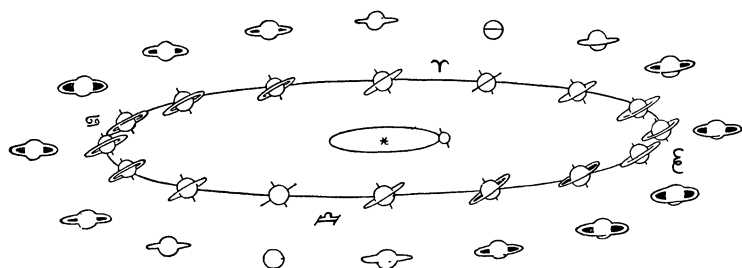


Рис. 11. Вверху — рисунок Сатурна, сделанный Галилеем. Сильная хроматическая aberrация телескопа Галилея не позволила различить кольцо, от которого были видны, при самом благоприятном положении планеты, только «ушки», принятые Галилеем за самостоятельные большие спутники. Внизу — рисунок Гюйгенса. Ослабив вред от aberrации путем увеличения относительного фокуса, Гюйгенс не только смог увидеть истинное строение кольца, но и проследить за изменениями его вида при различных положениях Сатурна на орбите.

светило в течение одной только минуты, наблюдателю с окуляром надо было, не теряя наводки на фокус и удерживая изображение светила в крошечном поле зрения, передвинуться почти на $1/4$ м. Яркость изображения протяженных предметов при этом была ничтожно мала.

Благотворное влияние уменьшения относительного отверстия объектива лучше всего видно из рис. 11, изображающего ошибочное представление о Сатурне, составившееся у Галилея, наблюдавшего с короткофокусным объективом, и у Гюйгенса, который с помощью

длиннофокусного объектива разгадал загадку строения Сатурна.

Можно найти и другой путь для уменьшения хроматической аберрации. Так как величина кружка аберрации пропорциональна отверстию объектива, то отчетливость изображения будет возрастать при уменьшении действующего отверстия при диафрагмировании объектива. Но при этом, как и в случае соответственного удлинения фокусного расстояния, увеличится относительный фокус V , а это повлечет за собой, как мы знаем, увеличение линейного размера дифракционного диска. Путем диафрагмирования можно добиться выравнивания действий хроматической аберрации и дифракции. Так, чтобы простейшая зрительная труба из очковой линзы с $f = 2 \text{ м} \left(\frac{1}{2} \text{ диоптрии} \right)$ была практически свободна от хроматической аберрации, нужно ее объектив задиафрагмировать до отверстия диаметром в 18 мм, но в этом случае ее разрешающая сила окажется очень малой (разрешаемый угол $\frac{120}{1,8} \approx 7''$).

Таким образом, диафрагмирование объектива невыгодно в том отношении, что оно понижает разрешающую силу, увеличивая угловые размеры дифракционного диска, а использование линз со сколько-нибудь значительным отверстием потребовало бы громадных фокусных расстояний, поскольку необходимое фокусное расстояние чрезвычайно быстро возрастает при увеличении отверстия. Если бы мы захотели использовать весь поперечник очкового стекла (около 40 мм), то нам пришлось бы для сохранения прежнего качества изображения увеличить фокусное расстояние до 10 м; при этом относительный фокус увеличился бы до 250. Правда, на практике можно удовлетвориться несколько меньшим отношением, но все же фокусное расстояние растет так быстро при увеличении отверстия, что о сколько-нибудь значительном объективе нельзя и думать. Именно поэтому необычайно длинные рефракторы XVII в. имели весьма скромные отверстия, редко превосходившие 100 мм.

Если бы большой рефрактор Пулковской обсерватории ($D = 76 \text{ см}$) имел объектив из простой линзы, то при самых минимальных требованиях к качеству изображения ему пришлось бы придать фокусное расстояние

почти в 1,7 км! И наоборот, с таким объективом при его действительном фокусном расстоянии (14,06 м) он мог бы иметь свободное отверстие не более 50 мм.

Борьба с хроматической аберрацией методом уменьшения относительных отверстий объективов, как мы видели, не достигает цели. Вполне естественно, что возникло стремление устранить хроматическую аберрацию путем создания объектива, одинаково преломляющего лучи всех цветов, т. е. ахроматического объектива.

Интересно отметить, что идея ахроматического объектива была ясна уже Ньютону после открытия им разложения белого света в спектр. Но ошибочные опыты внушили ему убеждение в принципиальной невозможности осуществления ахроматизма. Это мнение поддержал Гюйгенс. Влияние авторитетов таких ученых было столь велико, что практические планы по изготовлению ахроматического объектива были отложены почти на столетие. Лишь в 1747 г. член Петербургской Академии наук Л. Эйлер в своих замечательных исследованиях научно доказал возможность устройства ахроматического объектива. Чрезвычайно любопытно, что одним из самых ярых противников возможности ахроматизма оказался английский оптик Доллонд, который впоследствии, вопреки своим прежним высказываниям, изготовил ахроматический объектив, а затем и наладил производство ахроматических рефракторов.

В принципе задача создания ахроматического объектива несложна. В самом деле, если световые лучи после их преломления в двояковыпуклой линзе заставить пройти через вторую, вогнутую, линзу, которая, отклоняя лучи в противоположную сторону, удлиняет фокусное расстояние для синих лучей и укорачивает его для красных (рис. 12), то и те и другие сойдутся практически в одной точке, и хроматическая аберрация будет уничтожена. Но этого можно достичь лишь при соблюдении одного обязательного условия: вогнутая линза должна отличаться от выпуклой не только кривизной поверхностей, но и разностью показателей преломления для лучей разных цветов, своей дисперсией. Совершенно ясно, что если дисперсия обеих линз одинакова, то вогнутая линза, хотя и полностью скомпенсирует разложение света выпуклой линзой, но сделает лучи снова параллельными, т. е. уничтожит ее оптическое действие; пара

таких линз по своему преломляющему действию не отличалась бы от плоского стекла. В таком толковании и состояла только что отмеченная историческая ошибка Ньютона.

К счастью, различные сорта стекла обладают различной дисперсией. Чтобы вогнутая линза компенсировала хроматическую aberrацию выпуклой линзы и в то же время не уничтожала ее оптической силы, она должна быть сделана из стекла с другой дисперсией, а именно:

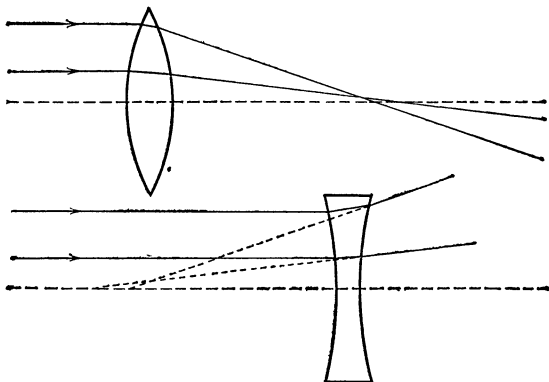


Рис. 12. Хроматическая aberrация собирающей и рассеивающей линз противоположна по знаку. Первая линза отклоняет синие лучи сильнее и в направлении оптической оси, вторая — в обратном направлении.

дисперсия между красными и синими лучами должна у нее значительно превосходить дисперсию между этими же лучами у выпуклой линзы, а показатель преломления для средних (желтых) лучей может быть примерно одинаков у обеих линз. Так как угловая дисперсия пропорциональна оптической силе линзы, то можно, очевидно, подобрать к выпуклой линзе вогнутую линзу с такой оптической силой, чтобы синие и красные лучи пересекали оптическую ось в одной и той же точке, т. е. достигнуть ахроматизма в отношении этих лучей.

Здесь необходимо сделать некоторое разъяснение. Говоря об ахроматизме, мы ни в коем случае не имеем в виду создания объектива, обладающего одинаковым фокусным расстоянием для всех лучей спектра. Речь идет, конечно, лишь об ахроматизации объектива в отношении определенных избранных лучей. Объективы ахроматизируются в соответствии с их назначением: визуальные — в отношении лучей, сильнее всего

действующих на глаз; фотографические должны быть ахроматизированы в отношении синих и фиолетовых лучей (для несенсибилизированных пластинок) и т. д. Остающаяся хроматическая aberrация объектива, производимая лучами тех цветов, для которых объектив не исправлен, называется вторичным спектром объектива.

Флинтглас имеет дисперсию, примерно вдвое бóльшую, чем кронглас. Поэтому вогнутая линза из флинтгласа, обладающая вдвое меньшей оптической силой, чем кронгласовая выпуклая линза, способна компенсировать хроматическую aberrацию последней. Комбинация из двух таких линз будет обладать достаточной положительной оптической силой для создания изображения. Подавляющее большинство ахроматических объективов («ахроматов») представляет именно комбинацию из двух линз: выпуклой из кронгласа и вогнутой из флинтгласа. Своей кронгласовой линзой объективы чаще всего обращены к наблюдаемому предмету.

Зеркальные объективы совершенно свободны от хроматической aberrации, поскольку они не преломляют, а отражают свет, и в этом главное их преимущество перед линзовыми объективами. Но зеркала страдают всеми остальными недостатками линз. К краткому разбору этих недостатков, общих для всех объективов, мы и перейдем.

б) Сферическая aberrация. Лучи широкого параллельного пучка, падая на сферическую поверхность линзы или зеркала после преломления или отражения, пересекаются не в одной точке (фокусе), а тем ближе к вершине поверхности, чем дальше от оптической оси они падают. Таким образом, независимо от цвета лучей, т. е. даже при абсолютном ахроматизме, лучи света от звезды не соберутся в одной точке (в главном фокусе), а каждая зона объектива образует фокус тем ближе к линзе или зеркалу, чем дальше зона отстоит от центра. В результате вместо идеального точечного изображения звезды получится размытое светлое пятно. Это несовпадение фокусов лучей различных зон, свойственное любому объективу, линзовому или зеркальному, называется *сферической aberrацией*. Как и в случае хроматической aberrации, мы сталкиваемся здесь с продольной и поперечной aberrациями (см. стр. 43—44).

Не входя в разбор теории, укажем лишь, что продольная aberrация лучей пропорциональна квадрату

расстояния точки их падения от оси (квадрату зоны), а поперечная — кубу этого расстояния. При увеличении фокусного расстояния объектива aberrации уменьшаются: продольная — пропорционально фокусному расстоянию, поперечная — пропорционально его квадрату.

Из рис. 13 видно, что существует такая плоскость F' , которая пересекает пучок лучей, идущих от объектива, в его наиболее узкой части, на некотором расстоянии от фокуса центральной зоны F_0 . Если поместить в этой

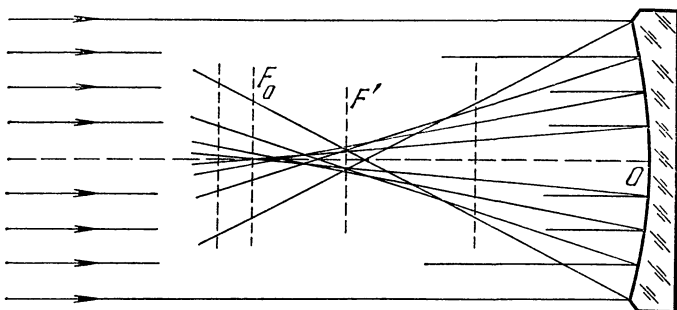


Рис. 13. Сферическая aberrация вогнутого сферического зеркала при отражении лучей, падающих на него от очень далекой точки, т. е. практически параллельных.

плоскости экран или использовать окуляр, то мы увидим самый маленький «кружок рассеяния». При всяком ином положении экрана или при другой наводке окуляра этот кружок будет больше. Не нужно думать, однако, что при такой наводке окуляра мы увидим самое отчетливое изображение, какое может дать объектив; наиболее отчетливое изображение, конечно, получится при наведении на фокус F_0 , но оно будет окружено ореолом, производимым лучами, пересекающими ось между объективом и главным фокусом и «портящим» изображение.

Из сказанного ясно, что изображения, даваемые зеркальным или линзовым объективом, будет тем отчетливее, чем меньше относительное отверстие объектива.

На практике исправление сферической aberrации линз достигается в значительной степени вместе с исправлением хроматической aberrации. В самом деле, если собирающая линза обладает более коротким фокусным расстоянием для крайних лучей, чем для центральных, то рассеивающая линза производит то же действие, но, как говорят, с обратным знаком. На техническом

языке мы скажем, что сферические aberrации собирающей и рассеивающей линз противоположны по знаку (рис. 14). В ахроматической комбинации из двух линз (одной собирающей и другой — рассеивающей) противоположные сферические aberrации могут, следовательно, в известной мере, а часто и полностью компенсировать

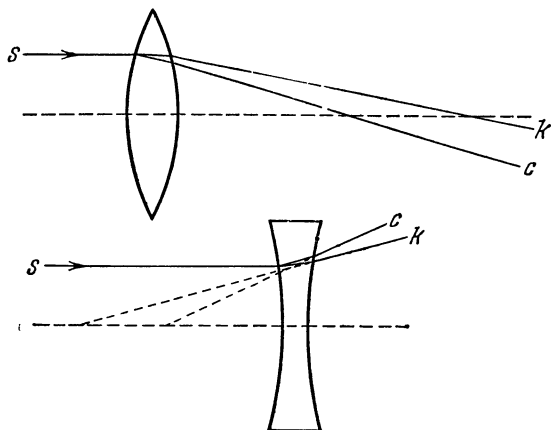


Рис. 14. Сферическая aberrация собирающей и рассеивающей линз противоположна по знаку.

друг друга. Для того чтобы ослабить сферическую aberrацию объектива насколько возможно, необходимо для поверхностей обеих линз подобрать соответствующую форму. Расчет линзового объектива непременно должен одновременно решить обе задачи: исправление хроматизма и устранение сферической aberrации. Отсюда — трудность расчета всякого нового объектива.

Теория устранения сферической aberrации зеркального объектива, в отличие от линзового, гораздо проще. Не обладая хроматической aberrацией, вогнутое сферическое зеркало страдает теми же недостатками, что и собирающая линза, а именно — фокус краевых лучей лежит ближе к объективу, чем фокус центральных. Чтобы все параллельные лучи, падающие на зеркало, собирались в одной точке F (главном фокусе), оно должно иметь поверхность не сферическую, а параболическую (рис. 15, 50, 51). Придание поверхности зеркала вогнутой параболической (правильнее, параболоидальной) формы — самое простое средство избежать сфери-

ческой аберрации. Поэтому для зеркальных телескопов чаще всего употребляются параболические зеркала. Из указанных рисунков видно, что кривизна поверхности параболического зеркала уменьшается от центра к краям, вследствие чего все параллельные лучи после отражения собираются в одной точке F — в главном фокусе параболического зеркала. Дальше мы встретимся с этим на практике, когда будем описывать процесс изготовления параболического зеркала (гл. III).

Без исправления сферической аберрации объектив пригоден к работе только при определенном условии (стр. 176).

в) Кóма. До сих пор мы предполагали, что лучи падают на объектив параллельно его оптической оси, т. е. что наблюдаемый объект виден в самом центре поля зрения телескопа. Теперь рассмотрим случай, при котором лучи падают на объектив наклонно от звезды, лежащей вне оптической оси и видимой, следовательно, не в центре поля зрения.

Если внимательно рассмотреть изображения звезд, видимых в разных частях поля зрения, то мы заметим, что они наиболее отчетливы в центре и становятся все более и более размытыми по мере приближения к краям поля зрения. Кроме того, изображения звезд не в центре поля зрения будут не круглыми, а вытянутыми по радиусу поля: с одного конца — более широкие и тусклые, с другого — более узкие и яркие. Как бы мы ни старались сфокусировать изображения, асимметрия не исчезнет, и на краю поля зрения звезды будут похожи на маленькие кометы. Этот недостаток объективов называется

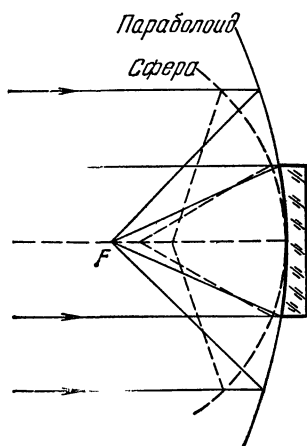


Рис. 15. Уничтожение сферической аберрации вогнутого зеркала путем придания его поверхности формы параболоида. Правая кривая — профиль поверхности параболоида, левая — сферической поверхности. Вследствие уменьшения кривизны (т. е. увеличения фокусного расстояния) поверхности параболоида по мере удаления от вершины (где обе кривые касаются) по направлению к краю все параллельные лучи, независимо от места своего падения, отражаются в одну точку главного фокуса F , в то время как при отражении от сферического зеркала (радиус кривизны которого везде одинаков) наружные лучи пересекаются ближе, чем внутреннее.

кóмой (рис. 16). Кóма, за небольшими исключениями, свойственна в той или иной мере любому объективу, в особенности одиночному зеркалу телескопа. Вред от нее тем сильнее, чем больше поле зрения и чем больше относительное отверстие объектива. Исправление кóмы также является серьезной задачей конструктора-



Рис. 16 Изображение звезды на краю поля зрения испорчено комой.

вычислителя. Без исправления этого недостатка приходится ограничивать размеры поля зрения. Простейший телескоп-рефлектор (системы Ньютона), даже и при небольшом относительном отверстии, с которым мы будем в основном иметь дело в этой книге, как мы увидим, имеет очень небольшое полезное поле зрения (порядка долей градуса); это ограничение вызывается именно тем, что кóма в данном случае не исправлена. Существуют системы,

обладающие полезным полем зрения в несколько десятков градусов; у них кóма устраняется при соответственном усовершенствовании и усложнении оптической конструкции.

г) Астигматизм и кривизна поля. Следующим недостатком объективов, сказывающимся так же, как и кóма, на изображениях объектов, лежащих в стороне от центра поля зрения, является *астигматизм*. Он выражается в том, что изображение точки растягивается в черточку; при отодвигании окуляра от точной наводки на фокус изображение расплывается в эллипс (вместо кружка), большая ось которого принимает одно из двух взаимно перпендикулярных направлений в зависимости от наводки окуляра. Астигматизм пропорционален относительному отверстию.

Изображения точек, находящихся на некотором угловом расстоянии от оптической оси, располагаются не на плоскости («фокальная плоскость»), как мы до сих пор допускали для простоты, а на некоторой кривой поверхности. Это явление называется *кривизной поля*. Так, фокальная поверхность в двухлинзовом ахромате обращена к объективу своей вогнутостью. Если окуляр отфокусирован по изображению звезды, находящейся в центре поля зрения, то вследствие кривизны поля изображение звезды, видимой у его края, оказывается не в фокусе,

д) Дисторсия. Менее существенным недостатком объективов является *дисторсия*, или искажение подобия. Она состоит в том, что увеличение, даваемое объективом (или, иначе, масштаб изображения), меняется по мере удаления от оптической оси. Вследствие дисторсии правильная геометрическая фигура, например, прямолинейная сетка, изображается объективом в искаженном виде, например, растягивается к периферии поля зрения, а прямые линии искривляются. Вполне понятно, что в силу дисторсии расстояния между звездами будут казаться больше или меньше в зависимости от их положения в поле зрения, расположение деталей на поверхности планеты будет искажено и т. д.

Следует иметь в виду, что все разобранные нами недостатки объективов могут сложнейшим образом сочетаться и переплетаться друг с другом, отчего и общее качество изображения ухудшается.

Нам остается упомянуть еще о двух существенных недостатках объективов: 1) *о потерях света* вследствие поглощения и отражения и 2) *об искажениях изображений* вследствие деформации объектива.

Как бы ни было чисто стекло, из которого изготовлена линза, оно все-таки не полностью пропускает световые лучи; часть световой энергии поглощается линзой. Это поглощение различно для разных сортов стекла и для лучей разных длин волн. Обычные стекла поглощают главным образом ультрафиолетовые и фиолетовые лучи.

Зеркальный объектив также не использует целиком все падающие на него лучи; часть из них поглощается, а часть рассеивается. Так, например, серебряный слой зеркала поглощает значительную часть ультрафиолетовых лучей вместо того, чтобы отражать их. Алюминированное зеркало, наоборот, достаточно хорошо отражает ультрафиолетовые лучи.

Значительная часть световой энергии рассеивается линзой при отражении света от ее поверхностей. Полированная поверхность стекла отражает 4—6% падающего на нее света (при перпендикулярном падении и в зависимости от показателя преломления стекла). В обычном двухлинзовом объективе с четырьмя поверхностями линз потери света на отражение составляют, таким образом, около 20%.

В настоящее время широко распространены так называемые «просветленные» оптические изделия, отличающиеся сильно ослабленной отражательной способностью, чем достигается уменьшение потерь света. Снижение отражательной способности получается в результате покрытия поверхностей особым слоем определенной толщины из вещества, обладающего низким показателем преломления.

Для больших рефракторов поглощение света наиболее существенно, так как оно зависит от толщины линзы, которая возрастает с увеличением диаметра. В крупных объективах поглощение света достигает значительной величины.

Наконец, скажем несколько слов о деформации объективов вследствие их изгиба и перемен температуры. Линза или зеркало сколько-нибудь значительных размеров изменяют свою форму под действием собственной тяжести настолько, что это сказывается на качестве даваемых ими изображений. Кроме того, расширяясь и сжимаясь при колебаниях температуры, объективы также изменяют свою форму, что, очевидно, приводит к сходным последствиям.

Обычно совершенно не представляют себе ни порядка величин вредных деформаций, ни степени сопротивления гнатию, оказываемого стеклом.

Можно считать, что изображение в фокусе объектива практически неотлично от идеального, если волновые aberrации не превышают $1/4$ длины световой волны.

Поясним сказанное. От бесконечно удаленной звезды на объектив падает плоский фронт световых волн. После преломления или отражения в объективе плоская волна преобразуется в сферическую с центром кривизны в фокусе объектива (идеальный случай). Aberrации объективов или неточность их изготовления приводят к тому, что на сферическом фронте появляются впадины или возвышения. Эти отступления фронта от сферической формы и называются *волновыми aberrациями*.

Мы так долго задерживаемся на этих вопросах потому, что многие не представляют себе, какое большое влияние на качество работы телескопа оказывает даже такой незначительный на первый взгляд фактор внешней среды, как, например, легкое похолодание. Но тот, кто уже имел дело с изготовлением зеркала, знает, как

велики искажения его поверхности, вызываемые колебаниями температуры даже внутри комнаты.

Если же в холодную погоду вынести зеркало из дому, то можно ясно увидеть, что до тех пор, пока вся масса зеркала не примет окружающей температуры, изображения, даваемые зеркалом, будут сильно испорчены. К этим вопросам мы будем возвращаться еще не раз.

2. Типы телескопов

Телескоп как астрономический инструмент возник в 1609 г., когда Галилей, по всей вероятности, уже знавший принцип устройства зрительной трубы, сам составил комбинацию из собирательного очкового стекла и сильно рассеивающей линзы. Этот простейший телескоп получил название «зрительной трубы Галилея». Он давал всего лишь трехкратное увеличение и, конечно, не мог служить для сколько-нибудь серьезных наблюдений. Но уже в конце того же года Галилей построил более сильный инструмент, который имел длину около полуметра и давал почти восьмикратное увеличение. С этого времени Галилей начал собственноручно шлифовать линзы и сумел построить инструмент с 32-кратным увеличением; длина телескопа была около метра, а диаметр объектива был равен 4,5 см. Эта зрительная труба, сделанная из картона (ныне хранится в музее Галилея во Флоренции), обладала всеми недостатками, о которых говорилось в начале данной главы. Тем не менее этот первый настоящий астрономический телескоп был тем орудием, с помощью которого Галилей сделал ряд важнейших открытий и фактически основал наблюдательную астрофизику.

Оптическая система Галилея состоит из двояковыпуклой линзы — объектива и рассеивающего двояковогнутого стекла; при этом двояковогнутый окуляр располагается между объективом и главным фокусом последнего. Назначение окуляра — превратить пучок сходящихся лучей в пучок лучей параллельных, которые затем входят в зрачок глаза наблюдателя. Таким образом, выходной зрачок всей системы находится внутри трубы, на большом расстоянии от глаза, что приводит к уменьшению угловых размеров поля зрения. Достаточно сказать, что телескоп Галилея, имевший 32-кратное увеличение, имел угловое поле зрения в 7 минут

дуги, что примерно в 10 раз меньше, чем у современного телескопа, обладающего таким же увеличением. Кроме того, оптическая система Галилея не дает возможности создать вне трубы, за окуляром, действительное изображение наблюдаемого предмета.

В этом состоят причины того, что телескоп Галилея вскоре перестал применяться как астрономический инструмент.

Через несколько лет Кеплер предложил другую систему телескопа, которая широко используется и в наше время. Он применил в качестве окуляра собирающую линзу (положительный окуляр), совместив его передний главный фокус с задним главным фокусом объектива. Выходной зрачок системы расположен вне трубы, на некотором расстоянии от окуляра, что способствует созданию большего углового поля зрения.

Кроме того, выдвигая окуляр, можно создать увеличенное изображение наблюдаемого объекта, например, Солнца, отбросив это изображение на экран.

Конечно, при практическом использовании кеплеровой оптической системы вскрылся ряд недостатков, из которых главным была хроматическая аберрация. Именно здесь началась описанная нами история «растягивания» телескопа в длину, так как уже было подмечено, что хроматическая и сферическая аберрации зависят от относительного отверстия объектива.

В 1672 г. Ньютон построил первый крохотный рефлектор (с зеркалом диаметром в 37 мм) той системы, которая получила его имя. Казалось бы, что после этого внимание телескопостроителей должно было обратиться к постройке гораздо более компактных рефлекторов вместо создания чудовищно длинных рефракторов. Однако прошло еще полвека, прежде чем появился настоящий работоспособный рефлектор, открывший новую эру в практике астрономии. Теперь очень трудно за давностью лет судить о причинах столь позднего внедрения рефлектора в астрономическую практику. По-видимому, большую роль играло то обстоятельство, что изготовленный Ньютоном рефлектор давал плохие изображения, в силу чего он не мог конкурировать с тогдашним рефрактором Гевелия. Ньютон не придавал значения тому обстоятельству, что сферическая форма поверхности зеркала при большом относительном отверстии производила сильную сферическую аберрацию и что выгода от

ахроматизма существенно снижалась. Между тем длиннофокусные рефракторы того времени, да еще в руках выдающихся наблюдателей (каковым сам Ньютон не был), давали несравненно лучшие результаты, так как были практически свободны от сферической аберрации, а вместе с тем сравнительно мало страдали от хроматизма. Неудивительно, что конструкция Ньютона тогда не имела особенного успеха.

Первое прямое столкновение между рефлектором и рефрактором произошло в 1722 г., когда появился зеркальный телескоп Гадлея. Это столкновение было роковым для тогдашнего рефрактора. Гадлей не может считаться самостоятельным творцом рефлектора. Он, конечно, знал о работах Ньютона, Диггса, Грегори. Идея рефлектора, таким образом, была уже не новой, но суть была не столько в идее, сколько в практическом осуществлении, которое впервые удалось Гадлею. Он ввел зеркало параболоидальной формы. Впрочем, не следует придавать этому обстоятельству какого-то абсолютного значения. Параболоид очень незначительно отличается от касательной к нему сферы при небольших значениях относительного отверстия. Как мы узнаем далее, при уменьшении относительного отверстия очень скоро отклонение параболического зеркала от касательной сферы становится меньше допуска, разрешаемого без практического ущерба для качества изображения. Собственно говоря, сравнение с касательной сферой слишком строго. В оптике принимается в качестве поверхности сравнения так называемая «ближайшая сфера», минимально отстоящая от параболоида.

Первый параболический рефлектор Гадлея имел $f = 1550$ мм при свободном отверстии в 150 мм, т. е. относительный фокус, равный 10. При таком относительном фокусе рефлектор Гадлея не нуждался в параболической поверхности, так как у него отклонение поверхности от сферы в данном случае было даже меньше допустимого. В ту эпоху не было еще удобного способа испытания поверхностей; оптики-конструкторы в значительной мере вслепую создавали зеркала для телескопов.

В течение немногих лет рефлектор завоевал всеобщее признание и рефракторы были временно почти забыты. Зеркальные телескопы стали производиться в промышленном масштабе в различных модификациях, о которых мы будем говорить несколько дальше.

Чрезвычайно интересно, что вскоре после первого триумфа рефлектора, уже в 1733 г., появилась первая идея ахроматического рефрактора. Возможно, что возторженное увлечение рефлектором, а также некоторый понятный скептицизм (который основывался на авторитете Ньютона) в отношении возможности ахроматизации рефрактора сыграли здесь свою роль; но предложение такого инструмента, в известном отношении представлявшего бóльшую новинку, чем рефлектор, не привлекло внимания. Только в 1758 г. ахроматические рефракторы появились в продаже. Однако ими пользовались главным образом люди, желавшие получить удобную в обращении зрительную трубу. Астрономов же они удовлетворить не могли из-за своего ничтожно малого размера: максимальный диаметр объектива тогдашнего ахроматического рефрактора едва достигал восьми сантиметров. Бóльших объективов нельзя было изготовить ввиду отсутствия хорошего оптического стекла. Вместо кронгласа приходилось в то время пользоваться обыкновенным зеркальным стеклом, а вместо флинтгласа — поделочным хрусталем. И стекло, и хрусталь, особенно последний, были плохого качества, а оптического стекловарения тогда не существовало. Неудивительно, что дальнейшее развитие шло в направлении усовершенствования зеркального телескопа.

Это усовершенствование рефлектора достигло высокой ступени в работах Вильяма Гершеля, великого английского астронома-любителя. После сотен безуспешных опытов он овладел искусством отливки (зеркала делались из особого металлического сплава) и шлифовки, хранившимся тогда в секрете. В 1775 г. он уже сам построил превосходный рефлектор с зеркалом диаметром около 150 мм и относительным фокусом, равным приблизительно 14. Вначале он, по-видимому, работал вслепую, так как точной оптической теории тогда еще не существовало, чем и объясняется то, что относительный фокус его телескопа был так велик. Именно с этим инструментом Гершель открыл планету Уран.

Вскоре Гершель сумел осуществить постройку более сильных инструментов. Через год после открытия Урана (в 1781 г.) он построил телескоп невиданных до того времени размеров: диаметр его зеркала был 300 мм при фокусном расстоянии около 6 м, т. е. с относительным фокусом, равным 20, далеко превосходившим допустимое

значение для сферического зеркала такого диаметра. Возможно, что Гершель овладел искусством изготовления параболической поверхности в 1788 г., когда изготовил 450-мм зеркало с фокусным расстоянием в 6 м, т. е. с относительным отверстием, уже близким к требующему параболизации поверхности. Его крупнейшим произведением был гигантский инструмент, построенный в 1789 г. и имевший зеркало диаметром 1,25 м и фокусное расстояние 12 м, т. е. с относительным фокусом менее 10. Весило это зеркало около 1,25 т. Весь инструмент был колоссальным сооружением, крайне несовершенным по современным понятиям, но в ту эпоху, конечно, представлявшим очень большое достижение. Громадная труба покоилась нижним концом на шарнире, а за верхний была подвешена на системе канатов и блоков. Наблюдатель помещался в особой клетке, приделанной к жерлу трубы. Все крышеобразное сооружение из бревен, служившее основой установки, вращалось вокруг своей оси на роликах. Труба передвигалась по команде наблюдателя специальным рабочим, в распоряжении которого были для этого вóроты.

Первое время Гершель строил телескопы главным образом по системе Ньютона, т. е. с малым диагональным зеркалом, отражавшим изображение вбок, где оно рассматривалось через окуляр. Позднее он отказался от этого вспомогательного зеркала из-за больших потерь света, вызываемых им, а может быть, и из-за вносимой им аберрации. Дело в том, что вспомогательное плоское зеркало ньютоновского рефлектора должно быть чрезвычайно точным, иначе сколь угодно высокие качества зеркального объектива будут сведены на нет. Во времена Гершеля не существовало хорошего способа контроля плоских поверхностей, и неудивительно, что его плоские зеркала сильно портили изображения. Поэтому Гершель использовал другую систему (рис. 17). Главное зеркало слегка наклонено по отношению к оси трубы, и изображение рассматривается через окуляр наблюдателем, заглядывающим в трубу.

Эта идея была на десять лет раньше осуществлена великим русским ученым М. В. Ломоносовым, который построил такой рефлектор и 13 мая 1762 г. продемонстрировал его Петербургской Академии наук. Такую систему теперь называют «телескопом переднего зрения». При такой системе, конечно, усиливалось вредное влияние

кóмы и астигматизма, так как наблюдаемый объект оказывался далеко от оптической оси. Система имела и другие недостатки: часть света заслонялась головой наблюдателя; струи теплого воздуха, поднимающиеся перед отверстием трубы от тела наблюдателя, также ухудшали качество изображения. Но, очевидно, вред от диагонального зеркала был столь велик, что перечисленные помехи казались в те времена сравнительно мало-важными.

Очень большим недостатком металлических зеркал того времени была их неустойчивость против коррозии.

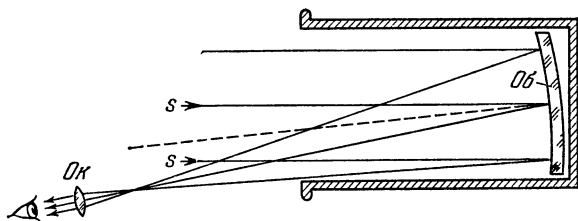


Рис. 17. Схема телескопа-рефлектора «переднего зрения».

Полированная поверхность металла очень быстро тускнела, а чтобы отполировать ее заново, требовалось выполнить почти такую же работу, как и при изготовлении нового зеркала.

Ряд других особенностей рефлектора делал его неудобным или даже непригодным для многих работ, в первую очередь для астрометрии, интерес к которой особенно возрос. Естественно поэтому, что рефракторы снова привлекли внимание телескопостроителей. Главным затруднением для создания крупных ахроматических объективов было отсутствие оптического стекла. Но в 1805 г. было налажено оптическое стекловарение, а несколько позже — разработана до сих пор применяемая система определения светорассеивающей силы и показателя преломления стекол, что было совершенно необходимой предпосылкой для настоящего научного расчета объектива.

В первой половине XIX в. Фраунгофером был наконец построен ахроматический рефрактор в той форме, которую он сохранил в основном до наших дней.

Первая половина и середина XIX в. по справедливости могут считаться эпохой рефрактора, получившего

после ряда усовершенствований широкое распространение. Конец XIX в. ознаменовался постройкой, вероятно, наибольшего возможного рефрактора: диаметр его объектива был равен одному метру. Отливка высококачественных заготовок для оптических линз диаметром свыше 1 м представляет такие колоссальные трудности, что рефрактор больших размеров до сих пор не построен. Для рефлекторов же метровый поперечник давно перестал считаться большим (как известно, уже много лет существует инструмент с пятиметровым зеркалом).

После всех усовершенствований рефрактор временно оттеснил рефлектор на задний план. Положение, однако, снова изменилось в 1858 г., когда металлическое зеркало было заменено стеклянным, покрытым тонким слоем металлического серебра.

Громадную роль для техники изготовления зеркал сыграл *теневого метода испытания*, изобретенный выдающимся французским физиком Фуко. Этот способ, подвергшийся в тех пор ряду усовершенствований, получил широчайшее распространение. Рефлектор опять появился на сцене как могущественное средство астрономического исследования и к концу XIX века получил большее распространение, чем рефрактор.

После этих немногих исторических замечаний обратимся к оптическому устройству современных телескопов. Рис. 1 (стр. 16) изображает современный рефрактор в разрезе. Очень простое в принципе устройство рефрактора требует на практике соблюдения многих условий, недостижимых без очень большой точности выполнения и сложной конструкции. Лишь самые малые инструменты с объективом диаметром до 50—60 мм допускают упрощенную конструкцию. Но уже 75—100-мм рефрактор не терпит неточности выполнения. Прочная труба *T* (тубус) цилиндрической формы, изготовленная из латуни, алюминия (из стали в крупных инструментах), несет на одном конце оправу, заключающую объектив *Об*, на которую может надеваться плотная крышка, а на другом более узкий окулярный тубус *Ок*, могущий передвигаться вдоль оси для фокусировки. Снаружи труба бывает обычно покрыта эмалью, как правило, белой, защищающей ее от вредных внешних влияний, в том числе и от нагревания лучами Солнца при дневных наблюдениях. Внутри труба вычернена матовым лаком для поглощения паразитного света, попадающего в объектив. Так как

одного чернения недостаточно ввиду того, что любой лак блестит и отражает наклонно падающие на него лучи, то в трубу часто вставляют диафрагмы, центрированные по отношению к объективу и окуляру; диаметр этих диафрагм должен быть согласован с величиной поля зрения при наименьшем увеличении.

Оправа объектива прикрепляется к тубусу не наглухо, а таким образом, чтобы можно было ее несколько наклонять для регулировки; объектив устанавливается так, чтобы его оптическая ось проходила через центр окуляра. Обычно для регулировки в объективном конце тубуса имеются особые винты. В окулярном конце тубуса помещается переходная муфта, в отверстие которой плотно входит окулярный тубус, зубчатой рейкой сцепленный с шестерней, насаженный на ось; ось выходит наружу и заканчивается головкой Г. При вращении головки окулярный тубус плавно движется. В просвете между муфтой и подвижным тубусом обычно помещается слой бархата для плотности соединения и плавности движения. Особое значение имеют хорошее качество и точность изготовления рейки и зубчатки, составляющих так называемую кремальеру; лучше, если они имеют не прямые, а косые зубья, обеспечивающие большую плавность передвижения. В подвижный тубус обычно вставляется еще один тубус, более узкий, несущий на конце окуляр. Своей передней частью он входит в кремальерный тубус, снабженный переходной муфтой, оклеенной бархатом; задняя его часть имеет распилы, вследствие чего немного пружинит и хорошо удерживает вставленный в нее окуляр. Подвижные части трубы не должны, конечно, болтаться, иначе точная центровка (т. е. положение окуляра на оптической оси объектива) не будет сохраняться и изображения испортятся вследствие появления аберраций. По той же причине труба не должна заметно гнуться; устранение гнущихся составляет, между прочим, очень серьезную проблему при постройке больших инструментов, предназначенных для точных измерений.

Наиболее точно должна изготавливаться оправа для объектива, одна из форм которой изображена на рис. 18. На конец тубуса насажен фланец Φ , на котором с помощью трех пар винтов, расположенных по окружности на расстоянии 120° друг от друга, держится другой фланец, Φ' . В каждой паре один винт притяжной, другой—

отжимной. Оправа O привинчена винтами к верхнему фланцу Φ' . Объектив лежит на ее закраине и удерживается с противоположной стороны кольцом O' . Линзы объектива отделены друг от друга тремя маленькими пластинками из станиоля, проложенными по краям, либо тонким металлическим кольцом стремя выступами через 120° . Внутренний диаметр оправы рассчитывается таким образом, чтобы объектив входил в нее с небольшим зазором («температурный зазор»), иначе в холодную ночь

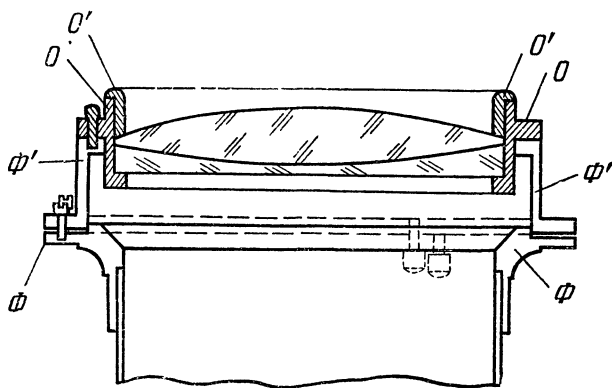


Рис. 18. Объектив рефрактора в оправе (разрез).

металлическая оправка, сжимающаяся сильнее стекла, сдавит линзы, вследствие чего нарушится правильность их формы. Точно так же кольцо O' не должно сильно нажимать на поверхность объектива.

Описанное устройство с небольшими изменениями применяется во всех рефракторах.

Рефлекторов существует несколько систем. На рис. 1 изображен разрез рефлектора системы Ньютона. Его труба с одного конца A открыта, а на другом конце в оправе находится зеркальный объектив $Об$. Оправа обязательно должна иметь приспособление для центрировки. Близ открытого конца трубы помещается окулярный тубус $Ок$, расположенный, в отличие от окулярного тубуса рефрактора, под прямым углом к оси трубы. Он также снабжен кремальерой для фокусировки. Точно против отверстия окулярного тубуса помещается надлежащим образом установленное плоское (диагональное) зеркало эллиптической формы $З$, поверхность которого образует угол в 45° с оптической осью. Диагональное

зеркало 3 должно быть установлено так, чтобы его можно было двигать в следующих направлениях: 1) вдоль оси трубы, 2) вдоль диаметра трубы, 3) вращать вокруг оси трубы и 4) наклонять во все стороны.

Одним из достоинств ньютоновского рефлектора является то, что большая часть косо падающего на стенки трубы света после отражения от зеркала не попадает в тубус окуляра, стоящий перпендикулярно к главной оптической оси. Понятно, что внутренние стенки трубы должны быть матово вычернены. Со всеми вопросами конструирования рефлектора мы познакомимся дальше.

Как мы видим, устройство ньютоновского рефлектора в некоторых отношениях сложнее устройства рефрактора. Особенно это относится к его центрировке, которая к тому же в любительских условиях не может быть настолько удовлетворительной, как центрировка рефрактора. Поэтому рефлектор приходится постоянно выверять, тогда как рефрактор разлаживается лишь в исключительных случаях. По образному выражению одного из основателей астрономического приборостроения в нашей стране А. А. Чикина, рефрактор можно сравнить с роялем, всегда готовым к игре, а рефлектор — со скрипкой, которую перед игрой необходимо каждый раз настраивать.

Некоторая сложность ньютоновской установки отпугивает от нее наблюдателей, особенно любителей, предпочитающих всегда готовый к работе рефрактор. Но это, несомненно, мнение ошибочное.

Современная техника позволяет использовать диагональные зеркала без значительных дополнительных светопотерь или порчи изображения. Мало того, иногда применяется фотографирование непосредственно в главном фокусе. В этих случаях вторичное зеркало заменяется перпендикулярной к оптической оси кассетой с фотопленкой. В наиболее же крупных рефлекторах вместо вторичного зеркала сооружается непосредственно вблизи главного фокуса кабина, где помещается наблюдатель. Таким образом достигается возможность наблюдения без диагонального зеркала на главной оптической оси, т. е. при минимальных aberrациях и к тому же при наименьших светопотерях.

Оставляя в стороне другие системы рефлекторов с плоским вспомогательным зеркалом, обратимся к тем видоизменениям, в которых вторичное зеркало устанавливается перпендикулярно к оси главного зеркала и

имеет не плоскую, а кривую поверхность. Из них наиболее важны системы Грегори и Кассегрена. Обе они ровесницы ньютоновской системы (первая даже старше на десяток лет), хотя практически были осуществлены позднее ее.

Рефлектор Грегори был в большом ходу в Англии во времена Гершеля и довольно долго пользовался успехом по причинам, которые сейчас станут нам понятны. Принцип его действия показан на рис. 19. Вместо диагонального плоского зеркала внутри трубы за фокусом главного

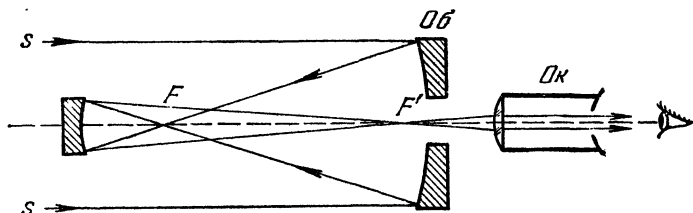


Рис. 19. Схема телескопа-рефлектора системы Грегори.

зеркала помещается вогнутое зеркало, которое отображает изображение, образованное главным зеркалом Об, в отверстие, имеющееся в центре последнего. Позади этого окна находится окуляр. Вогнутая поверхность малого зеркала имеет эллипсоидальную форму. Как известно, лучи от светящейся точки, помещенной в одном из фокусов эллипсоида, собираются после отражения от его поверхности без aberrаций в другом фокусе. Поэтому лучи, падающие от главного зеркала на эллипсоидальную поверхность вторичного зеркала (расположенного так, что его ближний фокус F совпадает с главным фокусом главного зеркала), после отражения соберутся в точке другого фокуса — F' — эллипсоидального зеркала, образовав там изображение, свободное от aberrаций. Это изображение будет обратным по отношению к первоначальному и увеличенным во столько раз, во сколько расстояние от вершины эллипсоидального зеркала до ближайшего фокуса меньше расстояния до дальнего фокуса. Фокусировка производится передвижением малого зеркала параллельно оптической оси при помощи длинного стержня с резьбой, вращаемого за головку, находящуюся близ окулярного конца инструмента. Таким образом, рефлектор Грегори отличается от ньютоновского, во-первых, прямыми изобра-

жениями, вследствие чего он удобен в качестве земной трубы, во-вторых, тем, что масштаб изображения, даваемого им, в несколько раз больше, чем в ньютоновском рефлекторе (в зависимости от кривизны малого зеркала), при одинаковом фокусном расстоянии главного зеркала. Кроме того, пользуясь телескопом этой системы, наблюдатель смотрит на предмет прямо, а не под углом в 90° к нему. Все эти качества содействовали популярности рефлектора Грегори в XVIII в., пока он не был вытеснен ахроматическим рефрактором.

Недостатков у рефлектора системы Грегори немало. Первой помехой являются «паразитные» лучи, проникающие в окуляр непосредственно от предметов, не заслоненных малым зеркалом. Для того, чтобы эти лучи не попадали в глаз, между окуляром и малым зеркалом помещается бленда — диафрагма в виде трубки, вставленной в отверстие главного зеркала; длина этой трубки и ее диаметр рассчитываются так, чтобы к окуляру не пропускались никакие лучи, кроме отраженных от малого зеркала. Все это, конечно, несколько усложняет систему.

Система Кассегрена (рис. 20) отличается тем, что малое зеркало выпуклое и помещается не позади фокуса F главного зеркала, а впереди него. Форма поверхности выпуклого вторичного зеркала должна быть здесь

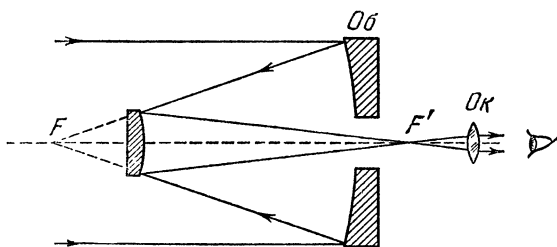


Рис. 20. Схема телескопа-рефлектора системы Кассегрена.

гиперболической. Пучок лучей от главного зеркала (объектива Об), отразившись от выпуклой гиперболической поверхности вторичного зеркала, дает обратное увеличенное изображение позади отверстия в главном зеркале, где расположен окуляр. Как мы видим, система Кассегрена во многом сходна с системой Грегори, но отличается от нее меньшей длиной трубы. Система Кассегрена очень широко применяется в больших рефлекторах для астрофизических исследований.

Крупные инструменты обычно снабжаются несколькими сменными вторичными зеркалами, например, плоским для ньютоновской комбинации и двумя-тремя выпуклыми гиперболическими (различной кривизны) для кассегреновской комбинации, дающими возможность получать различные эквивалентные фокусные расстояния.

Кроме рассмотренных нами классических типов рефлекторов, существует ряд систем, назначение которых состоит в устранении аберраций; это очень важно, поскольку рефлектор, как мы уже отмечали, обладает всеми аберрациями, свойственными линзовым инструментам, исключая одну лишь хроматическую. Мысль исследователей неустанно искала способы устранения недостатков, свойственных рефлектору, для создания более совершенного типа инструмента. К таким системам относятся двухзеркальные комбинации Шварцшильда, Ричи — Кретьена, Максutowa, в которых главное зеркало имеет не параболическую форму поверхности (гиперболическую, эллипсоидальную) при соответственно подобранной форме вторичного зеркала (вогнутого или выпуклого). В этих системах исправлена не только сферическая аберрация, но и кома, почему они и называются *апланатическими*.

Новое и оригинальное решение задачи нашел выдающийся советский оптик Д. Д. Максutow. Созданная им система принадлежит к числу *катадиоптрических*, т. е. таких, в которых используется одновременно и отражение, и преломление света (т. е. в конструкции применяются как зеркала, так и линзы). Значительный интерес для астрономов представляет и несколько ранее изобретенная система Шмидта; впрочем, последняя предназначается главным образом для фотографических наблюдений и весьма трудна в изготовлении из-за асферической формы ее коррекционной пластины (линзы), сквозь которую проходит свет на пути к главному сферическому зеркалу.

Д. Д. Максutow очень удачно использовал открытые им ценные свойства *мениска* — линзы, ограниченной с одной стороны выпуклой сферической поверхностью, с другой — тоже сферической, но вогнутой. Среди многих возможных типов менисков существует такой, который при почти одинаковых радиусах кривизны обеих поверхностей (выпуклой и вогнутой) и, следовательно, при очень малой оптической силе обладает ничтожно малой

хроматической аберрацией. Д. Д. Максутов открыл, что такой мениск, названный им *ахроматическим*, обладает значительной положительной сферической аберрацией, так что, будучи поставлен перед сферическим вогнутым зеркалом, он может при правильном подборе кривизны



Дмитрий Дмитриевич Максутов (1896—1964).

всех поверхностей и расстояний между ними уничтожить отрицательную сферическую аберрацию зеркала. Мало того, инструмент, состоящий из зеркала и мениска, может обладать ничтожно малыми *кóмой* и астигматизмом. Далее оказалось, что менисковые инструменты могут быть сделаны чрезвычайно короткими. Так как их трубы закрыты на своем переднем конце мениском, то отпадает один из главных недостатков рефлектора — воздушные токи в трубе инструмента и, как следствие этого, порча изображений. Таким образом, открытие Д. Д. Максутова позволяет в принципе избежать недостатков и рефракторов, и рефлекторов, сочетая в себе достоинства тех и других. В некоторых отношениях телескопы системы Максутова обладают рядом ценных свойств, которых нет ни у рефракторов, ни у рефлекторов.

Основные достоинства менисковых инструментов:

1) высокое качество изображения (не хуже, чем у наилучших рефракторов или рефлекторов) при почти полном ахроматизме;

2) меньшая длина, а следовательно, и легкость конструкции;

3) нетребовательность к сорту стекла для мениска.

Принцип менисковой системы, как указывает сам Д. Д. Максutow, элементарно прост. Следует, однако, заметить, что если бы принцип менисковых систем стал известен гораздо раньше, то развитие оптики пошло бы по иному пути: ненужность ахроматизации задержала бы развитие оптического стекловарения, ряд методов изучения и изготовления поверхностей не был бы открыт и т. д. Как отмечал Д. Д. Максutow, менисковые системы не были своевременно открыты к несчастью для прежней науки и к счастью для современной, которая приобрела благодаря этому множество ценных сведений как теоретического, так и практического характера.

За короткое время разработано очень много схем для применения менисков. Все основные типы рефлекторов преобразованы Д. Д. Максutowым в менисковые. Дополнительным достоинством менисковых телескопов является то обстоятельство, что вторичное зеркало может быть укреплено прямо на мениске при помощи стержня, проходящего сквозь просверленное в нем отверстие. Этим устраняется вредное влияние опор, несущих вторичное зеркало и производящих дифракцию света. Кроме того, менисковая система может быть рассчитана таким образом, что центральный участок поверхности мениска (алюминированный или посеребренный) явится непосредственно вторичным зеркалом (по системе Грегори или Кассегрена). Первый экземпляр менискового телескопа, изготовленный в 1941 г. по расчету и чертежам Д. Д. Максutowа в Государственном оптическом институте, представлял собой преобразованный рефлектор системы Грегори; вторичным (вогнутым) зеркалом служил центральный участок поверхности мениска. Рис. 21, 22 изображают схематически основные типы рефлектора, преобразованные Максutowым в менисковые телескопы.

Была изготовлена серия небольших менисковых инструментов (так называемых школьных телескопов),

разработанных Д. Д. Максутовым для массового употребления; такие телескопы имеются во многих школах.

Массовое распространение получили менисковые фотографические телеобъективы «МТО-1000», которые можно приобрести в магазинах. Если к такому объективу приспособить окулярную часть, то он превращается в

удобный телескоп с фокусным расстоянием 1000 мм.

При всех достоинствах менискового телескопа,

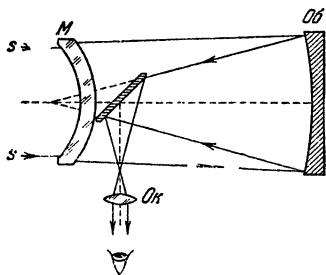


Рис. 21. Схема менискового телескопа Д. Д. Максутова (система Ньютона).

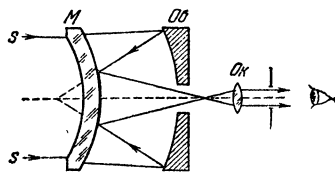


Рис. 22. Схема менискового телескопа Д. Д. Максутова (система Кассегрена).

Максутова у него есть один недостаток — для изготовления мениска, что является не столь простой для любителя задачей, необходимо иметь большой достаточно толстый диск оптически однородного стекла.

Поиски иных решений привели П. П. Аргунова к разработке других оптических систем, у которых коррекционные линзы имеют гораздо меньшие размеры и устанавливаются между главным зеркалом и его фокусом. Такие системы катадиоптрических изохроматических телескопов в настоящее время созданы и исследуются. Аргуновские телескопы обладают рядом достоинств.

Конечно, было бы хорошо, если бы любители телескопостроения освоили процесс изготовления телескопов Д. Д. Максутова и П. П. Аргунова, но эта задача более трудная. Это важно и для понимания тех путей, которыми пойдет конструктор телескопов будущего для удовлетворения требований развивающейся науки.

3. Рефрактор или рефлектор?

Вопрос об относительных достоинствах и недостатках рефракторов и рефлекторов всегда был предметом горячих споров. Можно сказать, что астрономы разделились на два лагеря; к одному примкнули сторонники

рефракторов, к другому — сторонники рефлекторов. Надо сказать, что в этом споре сторонникам рефлектора почему-то приходилось быть в положении защитников права на существование зеркального инструмента, тогда как рефрактор считался почти неуязвимым для критики. Это парадоксальное положение трудно объяснить. Весьма возможно, что здесь, с одной стороны, сыграло роль предубеждение наблюдателей, технически беспомощных и боящихся прикасаться к «жизненным центрам» инструмента, а с другой, — привычное преклонение перед профессиональными оптиками, которые целиком держали в своих руках производство рефракторов, тогда как рефлекторы изготовлялись кустарным способом, часто людьми, не причастными к науке. Разумеется, говоря об относительных достоинствах рефракторов и рефлекторов, мы не имеем в виду тех случаев, когда преимущество того или другого типа инструмента очевидно, как, например, очевидно преимущество рефрактора для измерительных работ или большого рефлектора для астрофизических исследований. Мы сравниваем основные свойства этих инструментов, вытекающие из того, что рефрактор снабжен линзовым объективом, а рефлектор — зеркальным. Кроме того, думая в первую очередь об интересах астронома-любителя, мы, конечно, должны иметь в виду инструмент малого и среднего размера.

Основные достоинства рефрактора таковы. Объектив рефрактора всегда готов к работе и практически не изменяется со временем, тогда как зеркало постепенно тускнеет и по истечении известного срока должно быть заново покрыто металлическим слоем. Правда, все шире применяющийся теперь алюминиевый слой очень устойчив, но и он, конечно, в конце концов портится. Центрировка рефрактора значительно устойчивее, чем рефлектора. Деформации объектива рефрактора от собственной тяжести не очень опасны, так как изменение формы одной поверхности компенсируется противоположным изменением формы другой. У рефлектора же, где одна отражающая рабочая поверхность объектива, прогибы зеркала и его температурные искажения могут существенно снизить качество изображения. Далее, у рефрактора, как правило, нет никаких промежуточных вспомогательных поверхностей между объективом и окуляром, какими являются вторичные зеркала у рефлектора, неизбежно вызывающие потери света. Кроме

~~того~~, отсутствие таких промежуточных частей, стоящих на пути лучей, падающих на объектив, избавляет рефрактор от дополнительных дифракционных явлений, производимых оправами вторичных зеркал рефлектора и ухудшающих изображение. Рефрактор плотно закрыт; это представляет громадное преимущество не только потому, что его внутренние части защищены от пыли, но еще и потому (а это самое главное), что в нем не так легко образоваться токам воздуха различной плотности, портящим качество изображения. Рефрактор имеет еще и то достоинство, что небольшие нарушения регулировки (например, при прогибе трубы) меньше смещают изображение, что важно для астрометрических работ.

Укажем на недостатки рефрактора. Прежде всего, конечно, рефрактор всегда и в значительной степени страдает от хроматической аберрации. Уменьшение вторичного спектра возможно лишь путем применения особых стекол и ценою больших жертв, так как влечет за собой уменьшение относительного отверстия, понижение долговечности объектива (из-за необходимости применения особых, легко выветривающихся сортов стекла) и рост кривизны и толщин линз. Даже небольшие недостатки стекла (оптическая неоднородность и др.) сильно сказываются на качестве изображения, даваемого объективом. Стекло объектива поглощает значительную часть света, особенно в фиолетовой и ультрафиолетовой частях спектра, что особенно досадно; это поглощение усиливается при увеличении размеров объектива вследствие возрастания толщины линз. Кроме того, свет теряется при отражении от поверхностей линз. Относительное отверстие рефрактора не может без ущерба для качества изображения быть больше 1:15 — 1:18 и часто бывает еще меньшим, что недостаточно для многих работ. Кроме того, при этом труба рефрактора должна быть очень длинной.

Достоинства рефлектора прежде всего определяются его полной ахроматичностью. Поэтому для достижения идеального изображения требуется лишь придание поверхностям его зеркал требуемой точной формы. Вследствие полного ахроматизма рефлектор может обладать большим относительным отверстием (до 1:3), совершенно недостижимым для рефрактора. Особые типы рефлекторов могут быть еще светосильнее. Большое относительное отверстие очень важно для многих исследований. При

большом относительном отверстии инструмент может быть относительно коротким, что облегчает механическую часть устройства, позволяет уменьшить здание, вмещающее инструмент. Удобное расположение окуляра (у системы Ньютона) позволяет производить наблюдения не запрокидывая головы. Качество материала для зеркала должно отвечать только механическим требованиям; самые же большие затруднения (например, оптическая однородность стекла), которые играют такую важную, подчас роковую роль при изготовлении линз рефрактора, здесь совершенно отпадают. Увеличение диаметра зеркального объектива не приводит к увеличению потерь света. При подборе соответственно отражающего слоя рефлектор может отражать лучи любой длины волны, включая и ультрафиолетовые, в чем состоит преимущество рефлектора при астрофизических наблюдениях. Изготовление рефлектора обходится гораздо дешевле изготовления рефрактора того же размера.

Недостатки рефлектора отчасти уже отмечались ранее попутно с перечислением достоинств рефрактора. К числу недостатков относятся: неудобство для точных астрометрических работ, большая требовательность к правильности поверхности зеркал, чувствительность к прогибам зеркала и деформациям зеркала от изменений температуры. Большим недостатком рефлектора является то, что его труба открыта, отчего в трубе возникают токи воздуха разной плотности, портящие изображение. Отражающие поверхности зеркал очень нежны и нуждаются в периодическом восстановлении. Вторичное зеркало рефлектора вызывает потерю света и несколько ухудшает изображение. Наконец, рефлектор системы Ньютона обладает меньшим полезным полем зрения по сравнению с рефрактором. Впрочем, при визуальных наблюдениях этот недостаток несуществен, так как используются сравнительно малые поля.

Это сравнительно краткое перечисление достоинств и недостатков рефлекторов и рефракторов дает достаточно ясную характеристику обоих типов инструментов.

Теперь постараемся разобраться в жизненно важном для астронома-любителя вопросе: каковы относительные достоинства и недостатки небольших рефракторов и рефлектора.

Первый вопрос, на который мы должны ответить, следующий: каковы относительные потери света в реф-

ракторе и рефлекторе? Исследования, проведенные над различными инструментами, показали, что если зеркала рефлектора свежесеребрены, то потери света в рефлекторе и рефлекторе становятся одинаковыми, начиная примерно со свободного отверстия диаметром в 250 мм. Таким образом, любителю надо считаться с тем, что в пределах доступных для него размеров рефлектор, если его зеркало не алюминировано, а посеребрено, теряет больше света, чем рефрактор; это тем более верно, что зеркало рефлектора, конечно, не всегда свежесеребрено. При отверстии диаметром в 150 мм эта разница (не в пользу рефлектора) может достичь заметной величины. Практически, хороший рефрактор дает возможность видеть звезды, почти на $1/2$ звездной величины более слабые, чем те, которые видны в рефлектор с зеркалом такого же диаметра. Правда, покрытие алюминием, все больше входящее за последнее время в обиход, очень сильно уменьшает потери света, вызываемые потускнением зеркала от времени.

Второй вопрос, встающий перед любителем, касается величины поля зрения и также решается не в пользу рефлектора.

Третье, в чем рефлектор уступает рефрактору: он легче разлагается при переноске.

Достоинства небольшого рефлектора по сравнению с рефрактором состоят в том, что он дает более яркие и чистые изображения, особенно протяженных объектов (планеты!). Кто хотя бы раз наблюдал светила в рефлектор и рефрактор, тот никогда не забудет ясности, чистоты цвета и яркости изображения, свободного в рефлекторе от всякого следа цветного ореола, так неприятно действующего в рефракторе.

Немаловажным (уже вскользь упомянутым нами) преимуществом рефлектора является то, что при одинаковой силе он имеет гораздо меньшие размеры, чем рефрактор. Так, 150-мм рефлектор системы Ньютона будет иметь трубу длиной около 1,25 м, а высота основания установки составит около 1 м. Рефрактор же с объективом такого диаметра должен быть по крайней мере вдвое длиннее. Поэтому, не говоря уже о трудностях изготовления такого большого инструмента, работа с ним несравненно сложнее. Кроме того, инструмент с трубой длиной в 2,5 м, монтируемый на колонне такой же высоты, потребует большого помещения, тогда как для

рефлектора можно обойтись небольшой будкой (см. гл. X). Как мы увидим, создание рефлектора с зеркалом диаметром в 250 мм еще вполне по силам любителю, а рефрактор с таким же диаметром объектива — настоящий гигант, для которого требуется павильон почти с двухэтажный дом.

4. Краткая история любительского телескопостроения

Производство оптических инструментов и, в частности, телескопов в нашей стране находится на высоком уровне. Эти успехи стали возможны, как и в других областях науки, лишь после Великой Октябрьской социалистической революции благодаря соответственным мероприятиям советской власти, создавшей уже в 1918 г. Государственный оптический институт (ГОИ), являющийся крупнейшим научным учреждением в этой области. Но нужно особо отметить, что первыми своими успехами наше отечественное телескопостроение обязано тем, кто накопил ценнейший опыт своим самоотверженным трудом, побеждавшим холодное равнодушие и даже прямое противодействие со стороны царских чиновников.

Среди этих новаторов, которыми мы по справедливости гордимся, преобладали не специалисты-профессионалы, а любители-энтузиасты, безвозмездно отдававшие любимому делу, движимые лишь высоким патриотическим чувством и научным интересом. Советская власть открыла широчайшие возможности для народной инициативы; вполне естественно, что передовой отряд наших выдающихся телескопостроителей, создавший и продолжающий создавать замечательные инструменты, в значительной своей части составил именно из бывших любителей, которым Октябрьская революция создала все условия для роста и расцвета их творческих сил. Хотя, разумеется, история телескопостроения и не входит в задачу этой книги, следует бросить хотя бы беглый взгляд на прошлое телескопостроения в нашей стране.

Первые значительные работы по созданию отечественных телескопов принадлежат, несомненно, основателю науки в нашей стране — великому Ломоносову. Но начинки астрономической оптики возникли у нас еще задолго до него. Можно считать установленным, что зри-

тельная труба попала в Россию уже через несколько лет после ее изобретения, т. е. в начале XVII в. В течение последовавших нескольких десятилетий «трубки зрительные» распространились настолько, что их свободно можно было покупать на рынках. Однако все они, конечно, привозились из-за границы. Во второй половине XVII в. во многих богатых домах уже имелись зрительные трубы, хотя в подавляющем большинстве случаев они служили лишь для развлечения. Это были по большей части трубы галилеевского типа, т. е. с окуляром из рассеивающей линзы. По-видимому, первый зеркальный телескоп-рефлектор системы Грегори (эта система была в большой моде, так как дает прямые изображения и поэтому удобна для наблюдения земных предметов) появился в России в первой четверти XVIII в.

Согласно данным, обнаруженным В. Л. Ченакалом, первые опыты изготовления зеркальных телескопов в России были произведены известным сподвижником Петра I Я. В. Брюсом. Как известно, Петр I был очень заинтересован в развитии в стране астрономии и много делал для этого. Я. В. Брюс был военным и имел обширные познания в различных науках, в частности, в астрономии. Получив поручение организовать в Москве «Навигацкую школу», он устроил при ней астрономическую обсерваторию (она помещалась на Сухаревой башне). Впоследствии, уже выйдя в отставку, Я. В. Брюс устроил себе частную обсерваторию (в своем подмосковном имении), где впервые занялся изготовлением зеркальных телескопов с металлическими и стеклянными зеркалами. В Государственном Эрмитаже в Ленинграде хранится вогнутое металлическое зеркало для телескопа, изготовленное Я. В. Брюсом в 1733 г. Как документально установлено В. Л. Ченакалом, в домашней обсерватории Я. В. Брюса имелось среди многих других инструментов несколько телескопов-рефлекторов и ряд зеркал, изготовленных им самим. Несомненно также, что Я. В. Брюсом была проделана весьма значительная работа по усовершенствованию техники шлифовки и полировки, по отысканию наилучших сплавов для зеркал и пр.

Таким образом, первым выдающимся телескопостроителем в нашей стране был Я. В. Брюс, который достиг крупных успехов, на несколько десятилетий опередив в этой области знаменитого английского астронома Вильяма Гершеля.

Большое значение имела оптико-астрономическая деятельность основателя русской науки М. В. Ломоносова. Великий русский ученый уделял большое внимание вопросу об изготовлении зеркальных телескопов, и ему принадлежит совершенно самостоятельная идея их усовершенствования; как мы уже видели, Ломоносов предложил чрезвычайно простую и остроумную систему, в которой можно обойтись вовсе без вспомогательного плоского зеркала, наклонив главное. Хорошо известны обширные опыты по отысканию наилучшего состава зеркального металлического сплава, которые производил Ломоносов.

Однако, несмотря на то, что, как мы сейчас видели, в России уже в XVIII в. имелись научные и технические предпосылки для развития телескопостроения, дело не только не развилось, но, наоборот, заглохло, и, вместо того, чтобы поддержать блистательные начинания Ломоносова, Российская Академия наук (находившаяся в значительной степени под влиянием иностранцев) избрала линию наименьшего сопротивления и не шла дальше закупки инструментов за границей; так, для академической обсерватории был куплен старый гершелевский 20-футовый рефлектор.

Наступивший XIX век, ознаменовавшийся созданием Пулковской обсерватории, которая вскоре стала по праву называться «астрономической столицей мира», в то же время удивительным образом характеризовался полным застоем в области телескопостроения. Знаменитый пулковский рефрактор был заказан американскому оптику Кларку. Будущие историки, вероятно, обнаружат немало данных о новаторах-одиночках, все усилия которых разбивались о бездушные различные учреждения царского режима. Но так или иначе, богатый опыт, накопленный лучшими деятелями науки и техники лежал втуне, и даже самые их произведения не только забывались, но и бесследно исчезали. О степени равнодушия и непонимания, царивших в старой Академии наук, можно судить по тому, что выдающийся русский механик И. П. Кулибин, приглашенный на работу в Академию наук вскоре после смерти Ломоносова, фактически оказался вынужденным прекратить свою деятельность, которая до того была столь плодотворна в провинции (Нижний Новгород). И. П. Кулибин подобно своим

великим предшественникам также достиг больших успехов в сооружении телескопов-рефлекторов.

Громадным пробелом являлось полное отсутствие какой-либо отечественной литературы по телескопостроению и вообще по оптике. Первым значительным явлением в этой области был выход в 1903 г. книги С. Е. Троцевича под заглавием: «Изготовление объективов для телескопов, микроскопов и фотографии. Микроскоп и телескоп. Оптическая техника».

С. Е. Троцевич был преподавателем физики и математики в 4-й Варшавской мужской гимназии. Как он указывает в предисловии к книге, написать ее его побудило полное отсутствие на русском языке какой-либо литературы по теории и по производству оптических приборов, в первую очередь телескопов. Книга, изданная С. Е. Троцевичем на собственные средства, чрезвычайно понятно, но в то же время строго научно излагает основы теории главных типов оптических приборов и прежде всего телескопа. В книге содержатся обширные сведения по расчету объективов и окуляров, а также имеются основные указания по самой технике изготовления объективов.

С. Е. Троцевич собственноручно изготовлял объективы для телескопов-рефракторов и построил себе рефрактор, с помощью которого вел астрономические наблюдения. Однако его вклад в дело развития телескопостроения в нашей стране при всей своей важности был главным образом теоретический: он открыл каждому интересующемуся дорогу для изучения оптических приборов и их изготовления; до появления книги С. Е. Троцевича эта область была недоступна, так как для того, чтобы проникнуть в нее, надо было познакомиться со многими томами чрезвычайно трудных немецких и английских сочинений.

Имя С. Е. Троцевича как одного из пионеров любительского телескопостроения в нашей стране никогда не будет забыто. Однако его труду не суждено было вызвать широкого отклика. Это можно объяснить тем, что С. Е. Троцевич посвятил свою книгу линзовому объективу для телескопа-рефрактора, тогда еще ставившегося большинством гораздо выше телескопа-рефлектора. Но, как мы видели, изготовление своими силами объектива для рефрактора — очень трудная задача уже хотя бы потому, что для него требуется высококачест-

венное оптическое стекло, обладающее совершенно определенными свойствами, не говоря уже о том, что для изготовления точных линз необходим целый ряд инструментов. Насколько было велико в то время это техническое препятствие, можно понять, если принять во внимание, что первый успешный опыт варки оптического стекла был произведен в России лишь через десять лет после появления книги Троцевича. Большое значение имело и то, что главное внимание автор обращал на теоретическую сторону дела и на расчеты объективов, а саму технику изготовления объективов, которая больше всего интересна и ценна для любителя, он изложил очень сжато. Наконец, значительным затруднением являлось отсутствие какой-либо общественной организации; такая организация появилась значительно позже в виде Русского общества любителей мироведения, в котором исключительно деятельную роль играл Александр Андреевич Чикин (1865—1924), являющийся поистине отцом любительского телескопостроения. Он оставил после себя замечательную книгу, ряд ценнейших статей и много первоклассных зеркал и телескопов. Именно его непосредственные ученики и последователи сыграли решающую роль в мощном развитии нашего отечественного телескопостроения, за короткий срок сделавшего такие громадные успехи.



Александр Андреевич Чикин (1865—1924).

А. А. Чикин занимался телескопостроением с 1898 г. и до конца жизни. Добывая средства к существованию работой в качестве художника-иллюстратора, он отдавал

все свое свободное время изучению теории телескопа и оптической техники, особенно по зеркальным телескопам. В отличие от С. Е. Троцевича, он сразу сосредоточил все свое внимание на зеркальных телескопах. Этот выбор имел огромное значение для всей его последующей деятельности, направленной на развитие любительского телескопостроения.

А. А. Чикину была ясна необходимость общественной организации его любимого дела. Поэтому он в качестве члена-учредителя принял участие в организации Русского общества любителей мирозведения, возникшего в Петербурге в начале 1909 г. Овладев теорией вопроса и тонкостями оптической техники, А. А. Чикин неутомимо пропагандировал любительское телескопостроение и, наконец, в 1911 г. выступил в Обществе любителей мирозведения с докладом, в котором он превосходно изложил всю технику шлифовки и полировки и продемонстрировал первое изготовленное им параболическое зеркало. Этим докладом он заложил прочную основу любительского телескопостроения. В том же 1911 г. доклад А. А. Чикина был опубликован в «Известиях Русского астрономического общества» в виде прекрасно иллюстрированной статьи под заглавием «Изготовление зеркала для отражательного телескопа». Русское общество любителей мирозведения стало центром пропаганды любительского телескопостроения. Вокруг А. А. Чикина образовалась группа любителей-энтузиастов, состоявшая главным образом из молодежи; он лично руководил работой членов кружка по изготовлению зеркал и постройке телескопов. В постоянном тесном общении с А. А. Чикиным находился с самого начала С. В. Муратов (один из основателей Ленинградского института точной механики и оптики), много сделавший в области пропаганды любительского телескопостроения. Из ближайшего окружения А. А. Чикина вышел Н. Г. Пономарев, впоследствии крупнейший механик и оптик, создатель первого советского рефлектора с зеркалом в 13 дюймов, находящегося сейчас в Абастуманской обсерватории, и ряда оригинальных конструкций, в частности, знаменитого пулковского солнечного телескопа. Влияние деятельности А. А. Чикина распространилось на всю страну; среди его многочисленных заочных учеников и последователей сразу выделился в Одессе 15-летний Д. Д. Максудов, уже в 1911 г. самостоятельно построив-

ший себе телескоп-рефлектор и еще при жизни А. А. Чикина завоевавший известность в качестве конструктора и строителя телескопов, а затем и теоретика телескопостроения.

А. А. Чикин собственноручно изготовил значительное число зеркал как для организаций (в том числе и для учебных заведений), так и для отдельных астрономов-любителей. Многие из этих зеркал сохранились и поныне и могут служить образцом оптической поверхности безупречного качества.

В 1915 г. А. А. Чикин выпустил замечательную книгу «Отражательные телескопы. Изготовление рефлекторов доступными для любителей средствами». Изданная очень ограниченным тиражом, книга вскоре стала библиографической редкостью, но она оказала громадное влияние на развитие любительского (и не только любительского!) телескопостроения в нашей стране. Для многих (в том числе и для автора этой книги) книга А. А. Чикина была настоящим откровением и знакомство с ней навсегда привязывало их к одной из интереснейших отраслей любительской техники — к созданию своими собственными руками предельно точных оптических поверхностей. В этой книге в увлекательной и вместе с тем необычайно простой форме А. А. Чикин рассказывает читателю о том, как без каких-либо точных инструментов, буквально голыми руками, на основе одного лишь знания и понимания процесса шлифовки и полировки каждый серьезный любитель может изготовить главную оптическую часть инструмента — его зеркало, не только не уступающее по своим качествам настоящим заводским, но и превосходящее многие из них.

В 1919 г. А. А. Чикин в качестве лучшего знатока изготовления оптических зеркал был приглашен на работу в только что организованный в Ленинграде Государственный оптический институт, где и проработал до самой смерти (1924). Большая заслуга А. А. Чикина заключается в том, что, сделав свой опыт и свои достижения достоянием масс, он в значительной степени рассеял царивший в широких кругах любителей (и даже среди астрономов-профессионалов) предрассудок, будто изготовление хороших зеркал возможно лишь при помощи дорогостоящих точных станков, управляемых опытными мастерами, владеющими множеством «профессиональных» секретов. Благодаря А. А. Чикину

многие смогли на практике убедиться в полной возможности постройки своими силами первоклассного инструмента. На примере деятельности А. А. Чикина особенно ярко проявилась положительная черта истинного любителя, которая в те годы выгодно отличала его от оптика-профессионала.

В то время как профессионал, достигший высокого технического уровня, не только не желал, по понятным причинам, пропагандировать свои методы работы, но, наоборот, всячески их засекречивал, истинный любитель более всего заинтересован в широком распространении своего опыта. Общение и обмен опытом с собратьями по любимому делу составляют для него потребность и доставляют ему удовлетворение, интересуют его в такой же степени, если не больше, чем само обладание готовым телескопом.

К сожалению, А. А. Чикин не дожил до полного осуществления своих чаяний. Но вряд ли он представлял себе, какие громадные успехи ожидали его учеников в наше, советское время. А ученикам его учеников открыты теперь неограниченные возможности в нашей стране, где профессиональное мастерство вырастает из широкого народного движения. И нет никакого сомнения, что из рядов наших молодых советских любителей выйдет еще не один выдающийся телескопостроитель.

5. Создание телескопа своими силами

Берясь за решение столь сложной задачи, как создание телескопа, любитель должен знать, что эта задача, хотя и вполне ему доступна, не столь проста. Ему придется изготовить не только оптические части телескопа, но и установку.

Просто решается только одна задача — изготовление небольшого менискового телескопа из готовых деталей: объектива «МТО-1000» с окуляром из обычной лупы. Но вряд ли это любителя удовлетворит.

Если любитель захочет изготовить рефрактор, то он встретит на своем пути такие трудности. Во-первых, ему понадобится точный расчет ахроматического объектива, а сам он его сделать не сможет без достаточных знаний по оптике.

Во-вторых, вряд ли ему удастся достать нужные сорта оптического, достаточно однородного стекла.

В-третьих, если бы оба предыдущих условия были выполнены, ему пришлось бы изготовить две линзы с четырьмя строго центрированными поверхностями, тщательно выдерживая все размеры, что очень трудно. И, наконец, в-четвертых, ему пришлось бы контролировать выпуклые поверхности, что само по себе является очень трудной задачей.

При изготовлении рефлектора любителю надо изготовить только две поверхности: главного и вторичного зеркал, что является гораздо более легкой задачей, вполне ему посильной.

Как это сделать, подробно рассказано в III и IV главах книги.

Необходимо заранее подчеркнуть, что от оптической поверхности требуется такая высокая точность, что даже погрешности, которые невозможно обнаружить с помощью наиболее точных механических приборов, для оптика уже недопустимо велики. Чтобы получить представление о порядке этих величин, достаточно сказать, что при отклонении поверхности вогнутого сферического зеркала от идеальной геометрической сферы на 0,2 длины волн света (около 0,0001 мм для зеленых лучей) его оптическое действие будет уже настолько нарушено, что с точки зрения теории его надо забраковать. Вполне понятно, что величину в 0,1 микрона немисливо измерить механически. Из этого уже ясно, что первым условием при изготовлении оптических поверхностей является возможность измерения ничтожных отклонений изготавливаемой поверхности от требуемой — идеальной, т. е., говоря на техническом языке, необходим достаточно точный метод контроля обрабатываемых поверхностей. Что же касается самой обработки, при помощи которой возможно получение точной оптической поверхности, то она в принципе несложна.

В самом деле, достаточно некоторое время шлифовать один стеклянный диск на другом (таких же размеров), двигая его по всем направлениям, чтобы поверхность обоих дисков приняла сферическую форму: у нижнего диска — выпуклую, у верхнего — вогнутую. Шлифующий материал, положенный между дисками, будет сдирать наибольшее количество стекла с центральной части верхнего и с периферической части нижнего диска, и обе поверхности при достаточно длительном шлифовании примут сферическую форму.

Этот процесс шлифовки необычайно прост и общедоступен; он не только может, но в ряде случаев должен производиться вручную без всяких станков. Совершеннейшие произведения оптики (например, объектив пулковского рефрактора) изготовлены именно вручную.

Первоначальная грубая обработка (так называемая обдирка) поверхности постепенно становится все более тонкой путем шлифовки все более и более тонким мелкозернистым наждаком (тонкая шлифовка). По окончании тонкой шлифовки матовая поверхность полируется. Именно при полировке, снимающей ничтожное количество стекла, и достигается та высокая степень точности обработки, о которой мы говорили.

Во время процесса полировки оптик постоянно исследует изготовленную поверхность, изменяя способ полировки соответственно тем недостаткам, которые он обнаруживает при контроле. Для этого, конечно, необходимо знать методы исследования поверхности, о которых также подробно рассказано в главах III и IV.

Изготовлению хорошего зеркала способствует и то обстоятельство, что оптические качества материала, из которого оно сделано, не играют никакой роли. Важно лишь, чтобы зеркало насколько возможно лучше противостояло различным деформациям и сохраняло свою форму. Обычное стекло вполне удовлетворяет этим механическим требованиям, если оно хорошо отождено, т. е. медленно охлаждено после плавки. При быстром охлаждении могут возникать механические натяжения, «коробящие» зеркало как при обработке, так и после изготовления, при колебаниях температуры. Отжиг стекла производится только на заводе, где для этого имеются специальные печи. Разумеется, совершенно бесцельно пытаться отжечь стекло в кустарных условиях. Заводы, как правило, выпускают стекло вполне доброкачественно отожденное.

При достаточной настойчивости любитель может добиться блестящих результатов и изготовить прекрасное зеркало, притом столь значительных размеров, что оно сможет послужить для постройки мощного инструмента, сравнимого с теми, с которыми работают специалисты-астрономы.

После изготовления зеркал их надо покрыть блестящим металлическим слоем, иначе они отражают только около 4% падающих на них лучей. Правда, такие отпо-

лированные, но не покрытые металлом зеркала весьма удобны для наблюдений Солнца, и телескоп можно исследовать по этим наблюдениям.

Для придания зеркалам высокой отражательной способности на них распыляют в вакууме чистый алюминий. Однако любителю этот способ недоступен, и ему приходится зеркало серебрить. О том, как это сделать, рассказывается в главе VI.

Остается последнее — создать трубу и установку телескопа.

Примитивную трубу и азимутальную установку простейшего типа изготовить нетрудно; эти способы описаны в главе VII.

Если же мы захотим (а мы это обязательно захотим) сделать надежную параллактическую установку, то нам придется прибегнуть к услугам механической мастерской. Однако в наше время это не представит особых затруднений, особенно если воспользоваться оборудованием Детской технической станции. Установки телескопов описаны в главе IX.

Автор, обладающий собственным опытом в изготовлении различных зеркал, руководил кружком молодежи, стремившейся овладеть техникой любительского телескопостроения; из этой работы выросло убеждение, что самостоятельно изготовить зеркало для рефлектора может каждый, кто запаса терпением и аккуратно работает. Но дело не только в доступности самодельного рефлектора. Создание инструмента своими силами является источником громадного, ценнейшего для наблюдателя опыта в обращении с инструментом и школой практического изучения принципов конструкции и действия телескопа.

Перед тем как приступить к описанию изготовления телескопа, мы еще раз советуем читателю не бояться трудностей, которые нередко представляются на первых порах в преувеличенном виде. Как читатель убедится на собственном опыте, многое кажется со стороны и при описании сложнее и труднее, чем на самом деле. Мы предлагаем будущим телескопостроителям вспомнить прекрасную русскую пословицу: «Глаза страшат, а руки делают».

Г Л А В А III

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОГНУТОГО ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ РЕФЛЕКТОРА

1. Вводные замечания

Работа складывается из шлифовки и полировки. С помощью *шлифовки* поверхности стекла сначала придается приблизительная форма; начальная часть этой операции называется *грубой шлифовкой* или *обдиркой*. Для нее применяются самые грубые, крупнозернистые шлифующие материалы (*абразивы*): карборунд, наждак или даже кварцевый песок. После получения приблизительно нужной формы поверхности, путем применения все более и более мелкозернистых абразивов, вплоть до самых тонких, представляющих собой мельчайшую пыль, производят *тонкую шлифовку*, по окончании которой форма поверхности приближается к желаемой, но зеркало остается еще матовым. Назначение следующей части работы — *полировки* — состоит в том, чтобы уничтожить матовость, оставшуюся от шлифовки, сделав поверхность стекла блестящей, полированной. Полировка обычно производится крокусом (мельчайшим порошком окиси железа) с помощью полировальника, сделанного из особой смолы.

Не менее важная роль полировки состоит в придании поверхности зеркала окончательной, оптически точной формы. Удаление, споллировывание ничтожных количеств стекла для придания форме поверхности желаемой точности довольно часто называется *фигуризацией* (форма поверхности на техническом языке назы-

вается «фигурой»), или *ретушью*. Этот важный технический прием стал теперь чаще называться «ретушью», хотя некоторые вкладывают в оба термина несколько разное содержание. Так, ретушь понимается как строго местное, вызываемое специальной потребностью изменение поверхности, а под фигуризацией — более общие и обширные изменения, делаемые для приближения к «идеалу», т. е. геометрически точной заданной форме. Само собой разумеется, что разница между обоими понятиями не всегда отчетлива, а иногда может даже исчезать вовсе; тогда, очевидно, различие терминов излишне.

В нашей книге мы отдаем предпочтение термину «фигуризация» (см. § 6), отчасти следуя пионеру русского телескопостроения А. А. Чикину, отчасти потому, что этот термин успел уже в известной степени приобрести силу традиции.

Ход полировки все время контролируется путем испытания зеркала. Задача мастера состоит в том, чтобы на основании данных этого *испытания*, должным образом направляя ход полировки, придать поверхности в точности требующуюся форму.

Окончательный результат, как и при всякой работе, зависит от многих привходящих обстоятельств, начиная с качества материалов и кончая условиями, существующими в рабочем помещении. Каждое из этих обстоятельств, на первый взгляд кажущееся маловажным, может, однако, сыграть решающую роль. Поэтому нам придется при описании изготовления зеркала входить в подробности, могущие показаться читателю на первых порах скучными или утомительными; однако он увидит на деле, что здесь нет такой «мелочи», которая оказалась бы излишней.

2. Материалы и приспособления

а) Стекло для изготовления зеркала должно прежде всего удовлетворять двум основным условиям: оно должно иметь достаточную толщину и быть хорошо отожжено.

Часто встречается указание, что толщина стеклянного диска, из которого предполагается изготовить зеркало, должна составлять не менее $\frac{1}{8}$ его диаметра; например, если диаметр диска составляет 150 мм, он

должен иметь толщину не менее 19 мм. Такое утверждение правильно, однако лишь применительно к указанному диаметру (150 мм). На деле оказывается, что у более крупных зеркал отношение толщины к диаметру должно быть больше, т. е. они должны быть относительно толще, чем зеркала меньшего диаметра, точнее, толщина должна расти пропорционально квадрату диаметра. Д. Д. Максutow приводит следующие допустимые наименьшие толщины, соответствующие различным диаметрам зеркала (если зеркало опирается тремя равноудаленными точками своей задней поверхности):

Т а б л и ц а 2

Диаметр зеркала (мм)	100	140	200	250
Минимальная толщина (мм)	8	16	32	50
Отношение (толщина : диаметр)	1 : 12,5	1 : 8,8	1 : 6,3	1 : 5,0

Если толщина зеркала недостаточна, то, опираясь на три точки, оно будет изгибаться даже от собственного веса, так что его поверхность подвергнется различным искажениям в зависимости от положения зеркала. В еще большей мере скажется недостаточная толщина при обработке (тонкой шлифовке и полировке); слишком тонкое стекло будет гнуться от применяемых к нему усилий, и это помешает придать поверхности зеркала точную форму (особенно часто возникает при этом астигматизм поверхности).

К сожалению, достать стеклянные диски толщиной свыше 20 мм (т. е. достаточной для диаметра более 150 мм) пока довольно трудно. Поэтому, если мы удовлетворимся диаметром зеркала в 150 мм, нам придется попытаться изготовить более крупное зеркало из диска толщиной 20 мм, приняв особые предосторожности против гнущия стекла при обработке, а также и при окончательной установке зеркала в телескопе. Сделать это можно, увеличив число опор, на которых лежит зеркало, до 6 или даже до 9 (как говорится, разгрузить зеркало на 6 или 9 точек), разместив их так, чтобы стекло между ними не прогибалось сильнее допустимого. Разумеется, опоры, на которых лежит в своей оправе гото-

вое зеркало (см. ниже, стр. 273—275), должны быть расположены так же, как и при его изготовлении.

Для того чтобы выполнить свое назначение, опоры должны быть не только расположены наиболее выгодно в смысле предотвращения прогибов зеркала; нужно еще, чтобы они все выполняли свое действие, т. е. поддерживали зеркало, плотно прилегая к нему. А для этого опоры должны быть устроены так, чтобы допускать некоторое передвижение относительно задней поверхности зеркала, которая должна будет лежать на них; без этого, разумеется, только три из них окажутся с ней в контакте. Делается это различными способами, с которыми интересующийся читатель сможет познакомиться по книге Д. Д. Максудова «Изготовление и исследование астрономической оптики», Гостехиздат, 1948. По Д. Д. Максудову, подробно исследовавшему этот вопрос, разгрузка на увеличенное число точек дает громадные преимущества, позволяя без всяких опасений изготавливать и использовать в телескопах зеркала гораздо меньшей относительной толщины, чем при разгрузке на три точки. Из табл. 2 (стр. 90) мы знаем, что 250-мм стеклянный диск для предотвращения прогибов, могущих сказаться на качестве зеркала, должен иметь толщину не менее 50 мм при разгрузке на три точки; при разгрузке же на шесть точек оказывается достаточной вдвое меньшая толщина (16,5 мм). Таким образом, при 20-мм толщине, как у обычного корабельного стекла (иллюминатора), остается еще хороший

Таблица 3

Диаметр (мм)		100	140	200	250
Минимальная толщина (мм)		2,64	5,2	10,6	16,5
Отношение диаметра	(толщина :	2 : 38	1 : 27	1 : 19	1 : 15

«запас жесткости». Приводимая здесь табл. 3, заимствованная у Д. Д. Максудова, без каких-либо дальнейших объяснений показывает преимущества разгрузки на увеличенное число точек.

При тех размерах зеркал, с которыми имеет дело любитель, было бы совершенно достаточно разгружать

зеркала на шесть точек. Однако технически осуществить это не очень просто, и потому, пожалуй, надо предпочесть вариант разгрузки на девять точек, который состоит в следующем (рис. 23). На массивном круге (деревянном или металлическом) в сделанных на нем через 120° трех углублениях лежат стальные шарiki, служащие опорами для могущих качаться на них трех равнобедренных металлических треугольников; эти треуголь-

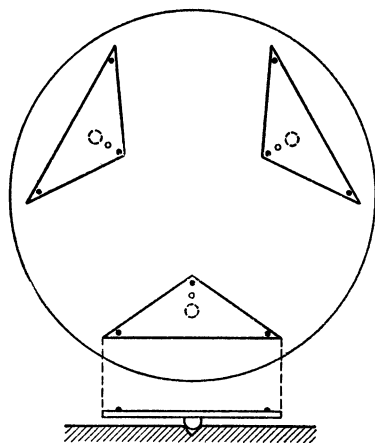


Рис. 23. Схема устройства для разгрузки зеркала на 9 точек.

ники несут близ вершин небольшие выступы (лучше всего напайки из олова), на которые и будет опираться наложенное сверху зеркало. Положение трех опорных шариков и размеры треугольников должны быть таковы, чтобы шесть внешних опор близ вершин треугольников, прилегающих к их основаниям, расположились как можно ближе к краю зеркала; очевидно, что длина оснований треугольников должна быть для этого немного меньше радиуса зеркала. Три остальные опоры

расположатся при этом где-нибудь на полпути между краем зеркала и его центром; они обеспечат устойчивость треугольников, когда на них ляжет зеркало. Чтобы опорные треугольники не могли поворачиваться на шариках, на которых лежат, нужно близ обращенной к центру зеркала вершине каждого треугольника сделать сквозные отверстия, которые могли бы свободно надеваться на шпильки, укрепленные в основной пластине. Треугольники можно сделать из любого листового металла (хорош жесткий алюминий) достаточной толщины (2—3 мм); если загнуть углы, жесткость повысится и станет достаточной даже при небольшой толщине. Опишем вокруг каждого треугольника окружность и найдем ее центр; в этой точке просверлим отверстие, в которое неполностью войдет опорный шарик, лежащий на опорной доске. Такая разгрузка должна быть исполь-

зована и при изготовлении зеркала, но в этом случае придется изготовить специальную «ручку».

Отжиг стекла отчасти сходен с «отпуском» закаленного металла; при быстром остывании расплавленного стекла последнее, наподобие быстро охлажденной стали, приобретает «закалку», вследствие которой в стекле возникают внутренние натяжения, неодинаковые в различных слоях. При сошлифовывании некоторой части закаленного стекла или при перемене температуры нарушается равновесие между силами внутреннего натяжения и стекло коробится, часто самым неправильным образом. Для уничтожения закалки стекло подвергается на заводе отжигу, состоящему в медленном охлаждении, при котором внутренние натяжения выравниваются и практически исчезают. Хорошо отожженное стекло не коробится при обработке, а при медленных изменениях температуры расширяется и сжимается равномерно во всех своих частях, не изменяя, следовательно, своей формы. Плохо отожженное стекло, наоборот, может принимать различные формы, даже при медленном изменении температуры. Возникающие в неотожженном стекле местные натяжения могут быть настолько сильны, что стекло растрескивается; именно вследствие этого так часто лопаются от кипятка толстостенные стаканы.

Третьим желательным свойством стекла, предназначенного для изготовления зеркала, является по возможности малый коэффициент теплового расширения. Вообще говоря, чем меньше изменяется объем стекла при колебаниях температуры, тем легче достичь нужной правильной формы поверхности, тем меньше будут мешать потом при наблюдениях в телескоп изменения температуры воздуха. Коэффициент теплового расширения наиболее высок у обычного стекла; специальное стекло «пирекс», из которого изготовляется, между прочим, химическая и «жароупорная» бытовая посуда («жароупорное стекло»), имеет в 2—2,5 раза меньший температурный коэффициент. Пирекс содержит очень высокий процент кварца; плавленный же кварц приблизительно в 30 раз менее чувствителен к изменению температуры, чем обычное стекло. К сожалению, достать стекло «пирекс» нелегко, не говоря уже о плавном кварце, который к тому же очень дорог. Не следует, впрочем, думать, что из простого стекла

нельзя изготовить хорошее зеркало: у многих крупнейших рефлекторов (например, у метрового симензского рефлектора, варварски уничтоженного немецко-фашистскими захватчиками, или у 100-дюймового телескопа обсерватории Маунт Вилсон) зеркала из обыкновенного стекла.

Самым доступным материалом для небольших зеркал является так называемое *иллюминаторное* стекло, представляющее собой толстое зеркальное стекло (толщиной от 15 до 40 мм), из которого делаются круглые окна — иллюминаторы — судов. Если не удастся достать готовые иллюминаторные стекла, то в зеркальной мастерской иногда можно заказать диски из иллюминаторного стекла.

Приобретение стекла для изготовления зеркала — первая трудность, с которой сталкивается любитель, приступающий к постройке рефлектора. Однако при известной настойчивости можно найти диск из иллюминаторного стекла (хотя и не всегда удовлетворительного качества), изготовляемого фабриками зеркал, мастерскими или заводами автомобильного стекла.

Наличие в стекле пузырьков, камешков или оптических неоднородностей (свилей) не имеет значения, так как свет не проходит сквозь стекло зеркала, а лишь отражается от его поверхности, которая покрывается слоем серебра или алюминия. Стекло является здесь лишь прочной опорой для металлического покрытия зеркала, которое настолько тонко, что само по себе без такой опоры не смогло бы существовать.

Для изготовления одного зеркала удобнее иметь два стеклянных диска одинакового размера. Заметим, что один из них, который послужит шлифовальником (т. е. инструментом для обработки), может быть и худшего качества.

б) *Абразивы*. Если не считать песка (кварцевого), которым, на худой конец, можно воспользоваться для первоначальной грубой шлифовки (обдирки), широко применяемыми абразивами являются *карборунд* (углеродистый кремний или карбид кремния), *электрокорунд*, *корунд* и др. Засоренный примесями корунд называется *наждаком*. Карборунд имеет то преимущество перед корундом и наждаком, что он шлифует значительно быстрее благодаря своей большей твердости. Однако его гораздо труднее достать. Твердость абра-

жива, впрочем, не имеет особого значения для любителя, она влияет только на продолжительность обработки. Зато очень важно, чтобы абразив был однородным в отношении размера зерен (крупности). Если однородность еще не столь важна в случае наиболее крупнозернистых абразивов для обдирки, то она приобретает чрезвычайно важное значение для мелкозернистых сортов, применяемых при тонкой шлифовке. Вред от неоднородности абразива состоит в том, что более крупные зерна, примешанные к более мелким, делают на стекле при шлифовке царапины и ямки настолько глубокие, что они уже остаются в дальнейшем после окончания тонкой шлифовки и портят поверхность готового зеркала (если не в оптическом, то во всяком случае в эстетическом отношении).

Для шлифовки нужны абразивы различной крупности, от самого крупнозернистого (для обдирки) и до наиболее мелкозернистого (для последней тонкой шлифовки перед полировкой). Различной крупности абразивы обозначаются номерами: по так называемой «английской» системе обозначения номер абразива соответствует числу петель (отверстий) на погонном дюйме (25 мм) сита, через которое проходят зерна абразива. Для наших целей удобнее всего иметь карборунд или наждак № 40, 60, 100 и 200 (размер зерен этих номеров равен примерно 0,40, 0,25, 0,15 и 0,06 мм). Конечно, не обязательно иметь именно эти номера; нужен лишь ряд абразивов убывающей крупности, причем размер зерен от ступени к ступени (от номера к номеру) должен уменьшаться в 1,5—2 раза. Само собой разумеется, что указанные здесь размеры представляют средние величины; практически это значит, что большинство зерен данного номера приближается к определенному размеру, например, к 0,4 мм у № 40. Но наряду с ними всегда имеется известное количество более мелких и более крупных; однако эти отклонения от среднего размера не должны достигать разности размеров зерен соседних номеров, иначе один сорт будет засорен другим.

Приводимая здесь и далее нумерация абразивов различной крупности в настоящее время у нас не применяется и заменена другой; но мы в нашей книге продолжаем пользоваться ею, так как любителю зачастую приходится прибегать к случайным источникам

снабжения абразивами и рассчитывать прежде всего на остатки запасов абразивов, хранящиеся под старыми обозначениями. По современной системе нашего ГОСТа номер абразива прямо указывает диаметр зерен в сотых долях миллиметра в случае крупнозернистых сортов (назначенных для грубой шлифовки) и в тысячных долях миллиметра (микронах) в случае мелкозернистых сортов (для тонкой шлифовки). Самая крупнозернистая группа обозначается номерами от 200 до 16, т. е. имеет зерна диаметром от 2 до 0,16 мм; средняя группа обозначается номерами от 16 до 3 и имеет, следовательно, зерна от 0,16 до 0,03 мм в диаметре. Самая мелкозернистая группа имеет зерна диаметром от 0,028 до 0,005 мм и обозначается номерами от М28 до М5. Таким образом, № 40 по английской нумерации соответствует примерно № 40 по ГОСТу, № 60 — № 25, № 100 — № 15. Выбранные нами для шлифовки абразивы убывающей крупности, обозначенные по английской нумерации № 40, 60, 100 и 200, будут примерно соответствовать № 40, 25, 15 и 6 по ГОСТу. Для тонкой шлифовки любителю приходится, как мы сейчас увидим, по большей части рассчитывать на мелкозернистые абразивы (минутники) собственного производства, получаемые с помощью отмучивания из отходов от грубой шлифовки.

В случае невозможности достать карборунд, корунд или наждак в зернах, можно, на худой конец, растолочь абразивный круг или брусок (которые чаще бывают в продаже) и после просеивания через сито приготовить хотя и не очень хорошие, но все же пригодные для работы абразивы. За неимением других абразивов некоторые любители обходились даже песком, разумеется, также после пропускания его через сита различной крупности. Недостаток песка состоит в округлости и сравнительной мягкости его зерен; в силу этих свойств песка шлифовка идет медленно. Напомним, однако, что большинство зеркальных мастерских, где производится шлифовка края зеркал (так называемой фаски или «фацета»), не употребляет никаких иных абразивов, кроме песка. Пользоваться следует светлым песком (кварцевым).

Если подозревают засорение абразива одной крупности другим, то нужно просеять его через сито соответствующей крупности. Для этого придется достать

специальные латунные или железные сита; так называемый «газ для мукомольных сит» (шелковое сито), изготовляющийся самых различных номеров, тоже годится, хотя быстро изнашивается.

Более крупнозернистые сорта абразивов применяются, как сказано, для первых стадий шлифовки. После них идет уже тонкая шлифовка, для которой употребляются более мелкозернистые абразивы, называемые на техническом языке «*минутными*». Это несколько странное название возникло в связи с процессом их приготовления, состоящим в *отмучивании*. Смесь абразивов различных крупностей взмучивают в воде и оставляют оседать. Наиболее крупные частицы опускаются на дно первыми, самые мелкие остаются во взвешенном состоянии дольше всех. Число минут, протекшее до осаждения, определяет крупность фракции. Наиболее крупнозернистые сорта 1—3—5-минутные, средние 10—15—30-минутные, наиболее мелкие 60—120- и даже 240-минутные. Самые мелкие минутники, употребляющиеся для последних стадий тонкой шлифовки, уже напоминают ил и во влажном состоянии скользки на ощупь; размер их частиц составляет лишь тысячные доли миллиметра.

Минутники нелегко найти в продаже, но зато их нетрудно приготовить самому, отмучивая отработанный, растертый при грубой шлифовке карборунд или наждак. Но здесь нужно предостеречь читателя: ни в коем случае нельзя смешивать наждак с карборундом, так как удельный вес наждака больше, чем у карборунда, а потому скорость оседания частиц в смеси не будет соответствовать их крупности. Кроме того, и форма зерен наждака и карборунда различна, что опять-таки вызывает различие в скорости оседания частиц того и другого. Поэтому одна и та же фракция, скажем, 30-минутная, будет неоднородна по крупности зерен — в нее попадут более мелкие зерна наждака и более крупные зерна карборунда, т. е. абразив окажется неполноценным.

Отмучивание производится так. В объемистую банку (по возможности высокую, 35—40 см) накладывают отработанный абразив (лучше, разумеется, протертый через самое мелкое сито для отделения более крупных зерен), наливают до полна водой и тщательно размешивают палочкой. Следует наблюдать, чтобы на стенках

(а особенно на дне!) нигде не оставалось неразмешанного абразива; лучше также не употреблять холодной воды прямо из-под крана, так как, согреваясь, она выделяет пузырьки воздуха, которые могут унести на поверхность комочки неразмешанного абразива. По истечении 5 минут спокойного стояния воду с неосевшей частью абразива сливают в другую высокую банку большего размера; во избежание заноса более крупных зерен со дна нельзя, конечно, сливать до конца; по той же причине лучше не сливать, а сцеживать при помощи сифона. На остаток в первой банке наливают опять воды доверху и повторяют ту же операцию отмучивания с 5-минутным отстаиванием для более полного извлечения мелких фракций; вторую порцию сливают, так же как и первую, после 5-минутного стояния во вторую банку. Размешав теперь тщательно содержимое второй банки, дают стоять в ней жидкости на этот раз уже 15 минут и сливают (лучше всегда сцеживать сифоном!) в третью банку; повторяют операцию, как и в первом случае. Во второй банке останется теперь 5-минутная фракция. Отстояв смесь в третьей банке в течение 30 минут, сливают жидкость прежним порядком в четвертую банку. В третьей банке на дне останется 15-минутная фракция. После 60 минут отстаивания воду из четвертой банки сливают в пятую. Таким путем получают в четвертой банке 30-минутную фракцию. После отстаивания в пятой банке в течение двух часов содержимое ее сливают, получая в ней 60-минутную фракцию. В большинстве случаев этим можно ограничиться, но неплохо приготовить еще одну — самую мелкую — 120-минутную фракцию, дав в течение 4—5 часов осесть всему, что слито из пятой банки после двухчасового отстаивания.

Приготовленные минутники после полного их отстаивания надо перенести с небольшим количеством воды в хорошо закрывающиеся баночки; высушивать минутники не следует, особенно самые мелкие, так как, высыхая, зерна спекаются в твердые комочки. Очень важно, конечно, оберегать минутники от всякого засорения, безразлично, абразивом ли другой крупности или простой пылью, в которой всегда есть твердые и потому опасные крупинки.

Больше всего получится 5-минутного абразива, меньше всего самой мелкой фракции — 60- или 120-ми-

нутной. Как мы увидим, они будут и расходоваться в соответственных их крупности количествах: больше всего самой крупной, меньше всего — самой мелкой.

Для изготовления одного зеркала диаметром 150 мм начинающему мастеру желательно запастись 1—2 кг карборунда (или несколько большее количество наждака) № 40—60. Этого количества хватит и для приготовления всех остальных номеров из отработанных при грубой шлифовке порций путем просеивания через номерные сита и для приготовления минутников путем отмучивания. Лучше, конечно, достать готовые абразивы № 40—60, 120 и 200; их понадобится: № 40—60 — около 600 г, остальных — граммов по 100—200. Впрочем, экономить особенно не имеет смысла, так как стоимость абразивов вообще невысока.

в) Материалы для полировки. Полирующим веществом является особым образом прокаленный тонкий порошок окиси железа. Худшие сорта порошка окиси железа называются железным суриком или мумией и служат красной краской (чаще всего для крыш). В крайнем случае можно воспользоваться для полировки и мумией, предварительно отделив путем отмучивания самую мелкую фракцию. Но гораздо лучше — специально приготовленная окись железа, называемая крокусом. В продаже крокус может встретиться лишь случайно: зато без особого труда мы приготовим его своими силами путем обжига желтого щавелевокислого железа, которое легче приобрести. Проще всего поступать при приготовлении крокуса следующим образом. На чистый железный лист (или противень) ровным, нетолстым слоем насыпают щавелевокислое железо и ставят в только что вытопленную печь или в духовку газовой плиты, где желтый порошок темнеет и скоро начинает тлеть. Как только тление закончится, лист с порошком вынимают и остуживают. Готовый продукт имеет вид очень мелкого красновато-коричневого порошка, который при растирании (особенно с водой) приобретает более яркий вишневый цвет.

Крокус можно приготовить также прокаливанием железного купороса.

Крокуса для изготовления зеркала нужно совсем немного, граммов 10—20, но поскольку могут оказаться

необходимыми очистка, отмучивание и пр., надо иметь некоторый запас (граммов 50—100).

В настоящее время все больше входит в практику быстроработающий полирующий материал «полирит».

Другой, необходимый для полировки материал — это смола, служащая для изготовления полировальника; способ изготовления полировальника описан в § 4.

В крупном оптическом производстве применяются различные сорта смол, различающиеся по ряду свойств, прежде всего по своей твердости. Любителю трудно рассчитывать на то, чтобы достать смолу определенной «марки»; ему, конечно, придется воспользоваться тем, что есть под руками — от гудрона, или каменноугольной смолы, употребляющейся для покрытия дорог и тротуаров, и различных смоляных смесей вплоть до сапожного вара (которые упоминал еще пионер русского телескопостроения А. А. Чикин).

Хотя окись железа, по существу, тоже абразив, как и наждак, но гораздо более мелкозернистый, в комбинации со смолой она не шлифует, а полирует, т. е. сглаживает мельчайшие царапины и ямки, произведенные шлифовкой.

В нашу задачу не входит разбор теории процесса полировки, но необходимо коснуться некоторых вопросов, связанных с ролью смолы. Без этого многое останется читателю непонятным. Главная особенность смолы состоит в том, что она, будучи на первый взгляд «твердым» телом, в то же время вязка и текуча. Поэтому какой-либо предмет, положенный на поверхность смолы, которая кажется на ощупь совершенно твердой, под влиянием продолжительного давления (и даже от одной своей тяжести) мало-помалу погружается в смолу, а сама смола медленно изменяет свою форму под давлением и даже от собственного веса. Вследствие своей вязкости смола удерживает микроскопически малые зерна крокуса (частично погружающиеся в нее, «тонущие» в ней, мешая им кататься, как при шлифовке. С другой стороны, смола под давлением полируемого на ней зеркала «приспособляется» к его форме, хотя, как мы увидим, и несколько своеобразным способом. Степень текучести смолы очень различна в зависимости от ее состава и температуры; она играет решающую роль при конечных стадиях полировки. Поэтому правильный подбор смолы нужного качества

очень важен для успеха дела. На практике смоле придают нужные свойства, добавляя к ней канифоли, если она слишком текуча (т. е. мягка), или скипидара, если смола слишком тверда. В § 4 мы будем говорить об этом подробнее.

Из различных видов смол лучше всего древесный пек, но вполне годится и гудрон или каменноугольная смола. В конечном счете решит, конечно, опыт. Надо сказать, что важно иметь не столько какой-либо определенный сорт смолы, сколько один и тот же (хотя бы и не наилучший) сорт для всей работы. Работающий после нескольких проб непременно добьется успеха, при переходе же к другому сорту ему придется начинать все сначала.

Для изготовления небольшого зеркала (150 мм диаметром) совершенно достаточно около 1 кг смолы, 500 г канифоли и немного скипидара.

г) Приспособления. Первое, о чем надо позаботиться, — это рабочий стол. Главное — его устойчивость. Он должен быть не слишком велик, чтобы можно было легко доставать руками до его середины, где будет помещаться обрабатываемое зеркало. Самое удобное, если стол круглый, но годится, конечно, и четырехугольный. Высота стола может быть несколько больше обычной (80—85 см).

Принимая во внимание, что сделать специальный стол сможет далеко не всякий, приходится довольствоваться тем, что есть. Автору, например, очень хорошо служил небольшой, почти квадратный обеденный стол, не перестававший в положенные часы выполнять свое прямое назначение. Многие пользуются небольшой бочкой, нагруженной для устойчивости кирпичом или песком. Можно, наконец, приспособить крепкий ящик подходящего размера.

Мы не будем особо говорить о требованиях к помещению, потому что вряд ли кто-либо из наших читателей сможет выделить специальное место для работы над зеркалом. Однако, где бы он ни пристроился, необходимо иметь в виду следующее. Прежде всего помещение требуется достаточно чистое, во всяком случае там не должно быть пыли, могущей попадать на рабочее место. Далее, оно должно затемняться, потому что важнейшая операция — испытание зеркала, может производиться только в темноте. Наконец, желательна как можно

более постоянная температура и отсутствие токов нагретого или холодного воздуха; поэтому работать надо как можно дальше от печи (или отопительной батареи), а также от окна. Этих вопросов мы, впрочем, будем еще касаться неоднократно по ходу изложения.

Другая совершенно необходимая вещь — это приспособление для испытания зеркала в процессе его изготовления. Главная его часть представляет собой маленькую электролампочку (автомобильного типа) и соответственный трансформатор, если пользуются током от осветительной сети; если работа производится вдали от электросети, то можно, конечно, воспользоваться батареями. Хуже керосиновая лампа, хотя и с ней можно получить вполне удовлетворительные результаты. Все устройство мы подробно опишем в параграфах, посвященных полировке и испытанию зеркала (§ 4 и 5).

Далее, необходимо иметь еще следующие более мелкие, но существенные вещи.

Ручка, приклеиваемая смолой к задней поверхности зеркала для удобства обращения с ним, представляет собой деревянный кружок толщиной 25—30 мм и диаметром около $\frac{2}{3}$ диаметра зеркала. Посредине должен быть сделан столбик диаметром около 30 мм и высотой около 50 мм; можно сделать всю ручку точеной из одного куска (рис. 24), но можно и врезать этот столбик, укрепив его с противоположной стороны шурупом.

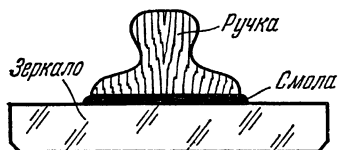


Рис. 24 Ручка, приклеенная смолой к стеклянному диску, из которого будет изготовляться зеркало (по Д. Д. Максутову; 1948).

Края ручки должны быть закруглены, и вся она должна быть сделана гладкой, чтобы не натирала при работе рук. Во избежание набухания и коробления от воды ручку надо хорошо проолифить или проварить в парафине.

Фасетник, полезный для изготовления смоляного полировальника (см. § 4), представляет собой деревянный брусочек толщиной 20—25 мм, на 50 мм длиннее диаметра будущего зеркала. С двух противоположных длинных сторон к нему привинчиваются тонкие (около 5 мм) планочки в 30—35 мм шириной, заподлицо с одной стороны, так, чтобы они выдавались с другой сто-

роны примерно на 10 мм. Фасетник имеет, следовательно, вид желобка (рис. 25); его выдающиеся бортики служат для выдавливания канавок в теплой, еще мягкой смоле. Впрочем, можно обойтись и без фасетника, выдавливая канавки в смоле просто линейкой. Мы познакомимся с подробностями в § 4 этой главы.

Подставка для зеркала необходима во время его испытания, когда зеркало надо ставить на ребро, с возможностью небольших наклонов. Подставку можно

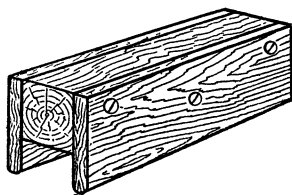


Рис. 25. Фасетник.

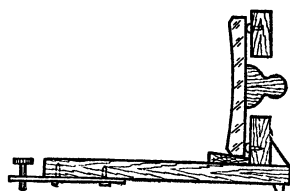


Рис. 26. Подставка для исследования зеркала.

устроить по-разному, например, как показано на рис. 26. Можно обойтись и вовсе без нее, подвешивая зеркало на стене, если позволяет помещение. Проще всего воспользоваться крепкой широкой тесьмой, сшитой в виде кольца на 10 см шире будущего зеркала; крепкий гвоздь или, лучше, шуруп отлично удержит на стене небольшое зеркало. Небольшие наклоны в вертикальной плоскости можно придавать зеркалу, подкладывая между его задней стороной и стеной картонные прокладки.

Для испытания зеркала нужно изготовить специальное приспособление, которое будет описано в § 4.

Кроме перечисленных предметов, надо еще запастись кастрюлей или котелком для плавки смолы, ведром для воды, кистями трех размеров: большой и жесткой для нанесения крупнозернистых абразивов при грубой шлифовке, поменьше для минутников и среднего размера акварельной кисточкой для крокуса.

Наконец, нужны толстая квадратная доска со стороной на 50—60 мм больше диаметра зеркала, несколько шурупов длиной в 30—40 мм, кусок толстостенной резиновой трубки диаметром с карандаш, несколько корковых или резиновых пробок.

Перечисленным ограничивается список материалов и приспособлений, необходимых для изготовления глав-

ного зеркала телескопа. Кое-какие дополнительные мелочи, могущие еще понадобится, будут указаны ниже.

Переходим теперь к описанию процесса изготовления зеркала.

3. Кругление и шлифовка

а) Кругление. Стекланный диск (особенно, если он представляет собой литую заготовку) должен быть подвергнут предварительной обработке, имеющей назначением придание ему достаточно точного кругового очертания (так называемое «кругление»). Если диск изготовлен из зеркального стекла, то обе его поверхности плоски и параллельны одна другой; у литых же дисков всегда бывают неровности, а часто диски оказываются с одного бока толще, чем с другого. Поэтому следует произвести шлифовку обеих поверхностей диска, стараясь добиться их параллельности (уничтожить «клин»). Такая обработка имеет еще и то значение, что посредством нее удаляется поверхностный слой стекла, который обычно оказывает вредное действие из-за имеющихся в нем натяжений.

Кругление обычно представляет для любителя известные трудности; поэтому лучше всего, если удастся достать уже круглый диск (иллюминаторные стекла всегда точно круглые, так как изготавливаются путем вырезания посредством большого трубчатого сверла или круглятся на станке). Литую же заготовку придется круглить самому. Если в распоряжении имеется горизонтальный шпиндель (или токарный станок с достаточной высотой центров над станиной), то кругление осуществляется довольно просто. Диск приклеивается (с помощью смолы или, лучше, сплава из канифоли с воском к торцу прочного деревянного цилиндра (годится скалка для теста). Зажав последний в патрон станка, выверяем диск (пока смола еще не затвердела) и затем шлифуем край его наждаком или карборундом с помощью полосы из толстой жести, охватывающей диск почти полным кольцом (рис. 27). Кашица из наждака или карборунда при этом подкладывается в щель между железной полосой и диском; нажим регулируется посредством сжатия отогнутых концов кольцевой полосы. Этот способ кругления нетруден, но требует токарного станка.

Можно, впрочем, обойтись и без станка. К диску с обеих сторон приклеиваются смолой точеные деревянные цилиндры такого диаметра, чтобы подлежащий сошлифовыванию край выступал (рис. 28). Шлифуя вручную на куске толстого стекла (лучше на чугунной плите), постоянно поворачивая цилиндр вокруг оси,

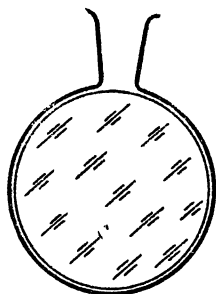


Рис. 27. Кольцевая железная полоса для шлифовки края диска (кругления) на станке.

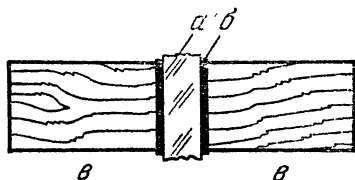


Рис. 28. Стеклянный диск (а), вклеенный смолой (б) между деревянными болванками (в) для кругления вручную.

можно достигнуть хорошего результата, хотя и с большой потерей времени.

Что касается предварительной обработки плоскостей диска (если она необходима), то ее нетрудно произвести, пришлифовывая два одинаковых диска друг к другу с помощью карборунда или наждака, крупность которого мы выберем в зависимости от размера имеющихся неровностей. Заднюю сторону будущего зеркала лучше довести до тонкой шлифовки. Если плоскости диска не параллельны (толщина с одного бока заметно больше, чем с другого), то, как сказано, лучше постараться сделать их параллельными, производя шлифовку так, чтобы с более толстой стороны стекло сошлифовывалось сильнее. Незначительную разницу в толщине можно сгладить посредством более сильного нажима при шлифовании на тот край, который толще. Если же неправильность очень велика (например, если диск с одной стороны на 2—3 мм толще, чем с другой), то придется подклеить с более тонкой стороны полоску жести и шлифовать затем до тех пор, пока «клин» не исчезнет. При шлифовке надо менять диски местами, т. е. то один из них помещать внизу, то другой, иначе поверхность одного получится вогнутой, а другого — выпуклой (см. гл. IV, § 4).

б) Шлифовка. В оптических мастерских поверхности стекла придается нужная форма посредством шлифовки на металлическом (латунном, чугунном) шлифовальнике, обточенном до нужной формы на станке. Так как металл сошлифовывается раз в двадцать медленнее стекла, то шлифовальник практически почти не меняет при шлифовке своей формы, а стекло, наоборот, быстро приобретает такую же кривизну, как у шлифовальника, но понятно, противоположного знака: если шлифовальник вогнутый («чашка» на языке оптиков), то стекло получается выпуклое, если шлифовальник выпуклый («гриб»), то стекло становится вогнутым. Хотя металлический шлифовальник и представляет преимущества, любитель редко им пользуется; шлифовальником ему служит такой же стеклянный диск, как и тот, который предназначен для зеркала. Он не должен быть, однако, обязательно из столь же хорошего стекла, лишь бы его толщина была достаточна, а поперечник был равен поперечнику будущего зеркала. Поэтому если для изготовления зеркала удастся достать ценный диск из стекла «пирекс», то для шлифовальника можно взять простое иллюминационное стекло.

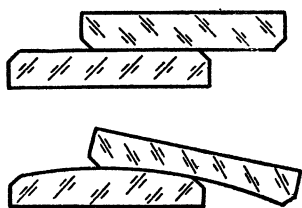


Рис. 29. Объяснение возникновения кривизны поверхностей двух шлифуемых друг о друга первоначально плоских стеклянных дисков (по Д. Д. Максutow; 1948).

Принцип шлифовки вогнутого зеркала удивительно прост. Если укрепленный на столе плоский стеклянный диск тереть другим таким же диском, предварительно положив между ними немного смоченного водой абразива, то сошлифовывающиеся поверхности обоих дисков начнут приобретать кривизну: нижний диск

будет постепенно становиться все более и более выпуклым, верхний — вогнутым. Причина этого ясна (рис. 29). Когда мы сдвигаем верхний диск с нижнего, то давление (от веса самого диска и давления руки) сосредоточивается на все меньшей площади и притом распределяется неравномерно: на нижнем диске оно будет возрастать по направлению к краю, на верхнем, наоборот, давление будет сильнее всего в центре. Давление усиливается от нажима рук работающего, и в результате происходит довольно быстрое срабатывание, сошли-

фовывание стекла. Ясно, что верхний диск будет сошлифовываться тем сильнее, чем ближе к центру, т. е. станет вогнутым; нижний же, наоборот, будет сильнее сошлифовываться с краев, становясь выпуклым. Верхний диск — это наше будущее зеркало; нижний является шлифовальником.

Как ни прост самый принцип шлифовки, на практике с самого начала встречаются некоторые осложнения. Дело в том, что форма углубления, вышлифовываемого в будущем зеркале, зависит от характера движений верхнего диска по нижнему. Эти движения, называемые на техническом языке штрихами, должны поэтому определенным образом регулироваться, иначе получение правильного сферического углубления невозможно.

Первым условием является поворачивание одного диска относительно другого, иначе вообще не может получиться фигуры вращения; ясно, что если бы мы стали тереть верхним стеклом по нижнему взад и вперед, то первое получило бы цилиндрическое углубление в виде корыта, а второе приняло бы соответственно цилиндрическую выпуклую форму.

Второе условие состоит в определенной длине штриха, т. е. в степени сдвига верхнего диска с нижнего. Практика показала, что правильное сферическое углубление получается лишь в том случае, если длина штриха составляет от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$ диаметра диска; это значит, что верхний диск должен при шлифовке сдвигаться с нижнего в каждую сторону на $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ своего радиуса (рис. 30). При удлинении штриха, т. е. при более значительном сдвиге (больше $\frac{1}{3}$ радиуса в каждую сторону), центральная часть зеркала сошлифовывается слишком сильно и кривизна его центральных частей становится больше, чем кривизна краев. При слишком коротком штрихе получается обратный результат: кривизна центральных частей зеркала становится меньше, чем кривизна краевых. В обоих случаях зеркало приобретает несферическую форму поверхности; сферическая же поверхность обладает, в отличие от всех прочих, во всех своих частях одинаковой кривизной.

Само собой разумеется, нет необходимости, чтобы все штрихи были в точности равны заданной величине, например, $\frac{1}{3}$ диаметра. Речь идет, конечно, о некоторой средней длине штриха. Строго говоря, при полной одинаковости штрихов невозможно получение плавной

поверхности, а неизбежны местные неправильности; поэтому легкие различия между длинами и направлениями штрихов, получающиеся сами собой, независимо от воли мастера, необходимы, так как сглаживают постоянно возникающие мелкие неправильности.

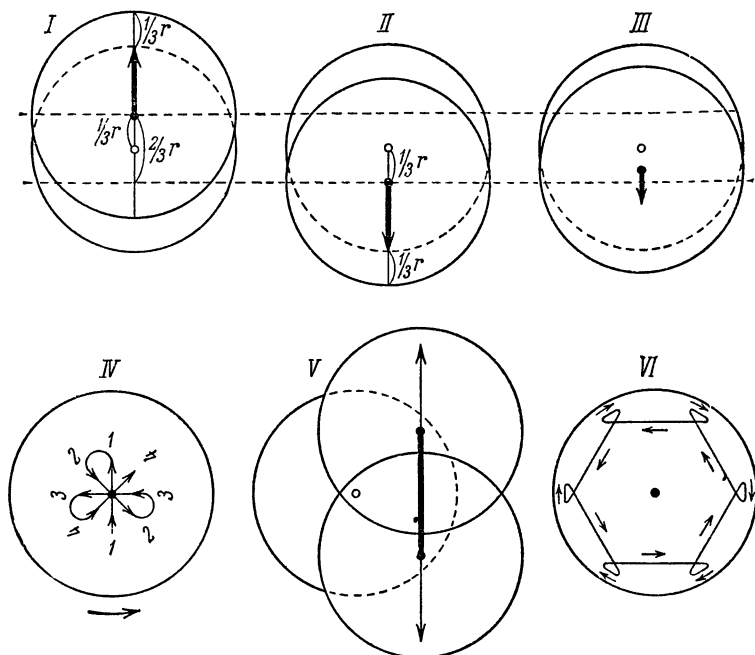


Рис. 30. Схема движений при шлифовке различными штрихами: I—верхний диск сдвинут вперед на $\frac{1}{3}$ радиуса по отношению к нижнему; II—противоположное крайнее положение—сдвиг назад на $\frac{1}{3}$ радиуса; III—одно из промежуточных положений; IV—путь, проходимый центром верхнего диска при ряде последовательных штрихов 1, 2, 3, 4 в силу проворачивания верхнего диска относительно нижнего и обхода мастера вокруг стола (направление показано внизу стрелкой); V—штрих по хорде; VI—путь, проходимый центром верхнего диска по нижнему, при шлифовке по хорде.

Третьим условием является направление штриха. Верхний диск можно двигать по нижнему так, чтобы его центр всегда шел по диаметру нижнего диска; при этом всегда будет такой момент, когда оба диска совмещаются, совпадая своими центрами и краями. Но возможно и любое иное направление штриха, например, по хорде, т. е. в стороне от диаметра; при таком боковом штрихе диски никогда не совмещаются. Заметим тут же, что боковой штрих ведет к тому же, к чему

ведет удлинение штриха, т. е. к возрастанию кривизны центральных частей зеркала.

Наконец, форма штриха может быть различной: вместо прямолинейного движения, которое мы имели в виду до сих пор, верхний диск может совершать движения по любой кривой, описывая каждой своей точкой круги, эллипсы, восьмерки или любые неправильные кривые. Мы на первых порах не будем пользоваться никакими криволинейными штрихами, а ограничимся прямым штрихом, так как с его помощью легче всего управлять процессом шлифовки поверхности. В дальнейшем такие штрихи окажутся очень полезными для сглаживания местных неправильностей поверхности зеркала.

Теперь мы можем уже обратиться непосредственно к практике шлифовки.

Прежде всего нужно укрепить один из стеклянных дисков — наш шлифовальник — на столе. Для этого проще всего воспользоваться тремя шурупами, пропущенными сквозь обыкновенные корковые пробки (как советовал еще А. А. Чикин); еще лучше надеть на шурупы кусочки резиновой трубки. Они будут хорошо удерживать стеклянный диск за края, позволяя в то же время свободно вынимать его, когда нужно. Само собой разумеется, шурупы не должны возвышаться над поверхностью шлифовальника, но быть настолько ниже ее (рис. 31), чтобы зеркало при сдвигании его в стороны не могло задеть за их головки. Для верности лучше «утопить» головки шурупов в пробках или в резиновых трубках. Чтобы шурупы крепче держали, полезно придать им небольшой наклон (конечно, в сторону шлифовальника). Надежность крепления — дело важное; как мы увидим дальше, сцепление между зеркалом и шлифовальником, особенно же между зеркалом и полировальником, бывает настолько велико, что слабое крепление может и не выдержать необходимого усилия. Лучше закреплять описанным образом шлифовальник не прямо на столе, а на квадратном куске толстой доски, который в свою очередь будет удерживаться на столе четырьмя привинченными к нему планочками. Это удобно уже потому, что обычный стол слишком низок. Шлифовальник должен лежать не на самой доске, а на трех резиновых или пробковых прокладках, которые обеспечат ему устойчивое положение, а главное,

уменьшат вредность гнутия. Можно также сделать специальный станок (см. стр. 220 и рис. 64).

Для удобства обращения с будущим зеркалом приделывают к нему ручку, о которой мы уже говорили выше. Помимо того, что за ручку удобно брать руками, она предохраняет стекло от нагревания теплотой рук; как мы увидим дальше, это представляет немало-важное обстоятельство при тонкой шлифовке и особенно при полировке. Ручка приклеивается смолой.

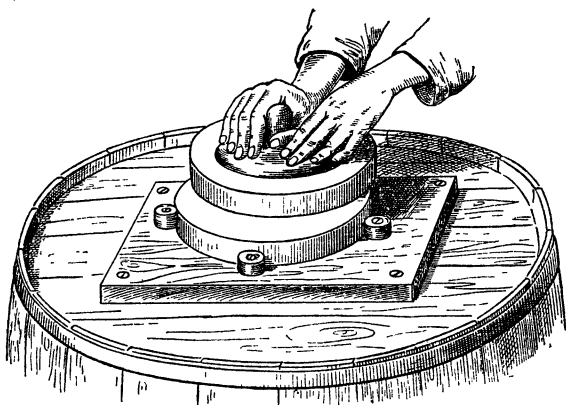


Рис. 31. Шлифовка зеркала; шлифовальный диск укреплен на бочке с помощью четырех шурупов, пропущенных сквозь пробки (по А. А. Чикину; 1915).

Лучше, если задняя сторона зеркала отшлифована и, следовательно, матирована; слегка протерев скипидаром центральную часть стекла, на ручку наливают расплавленную смолу и ручку прижимают к стеклу. Чтобы ручка заняла центральное положение, лучше предварительно наметить ее контур на стекле. Если понадобится, ручку можно легко снять, резко ударив по ней сбоку.

Наклеивание ручки с помощью смолы имеет и свои недостатки. Во-первых, горячая наклейка изгибает стекло вследствие одностороннего расширения; после снятия ручки освобожденное стекло «выпрямляется», вследствие чего приданная ему форма изменяется. Эта опасность, впрочем, не столь велика, так как смола, которой приклеена ручка, обладает, как мы знаем, текучестью и за время грубой шлифовки она позволит стеклу освободиться от напряжений и выпрямиться.

Другое вредное свойство ручки — это способность коробиться от воды и, следовательно, опять-таки изгибать стекло. Во избежание этого мы и советовали проолифить или пропарафинировать ручку. Деревянная ручка меньше коробится, если она сделана не из доски, а выточена «в торец». Разумеется, еще лучше сделать ручку из эбонита или пластмассы.

Можно совершенно избежать этих опасностей, вовсе отказавшись от ручки, что многие и делают. Тогда придется защитить стекло от тепла рук, производя тонкую шлифовку и полировку в перчатках. Это, правда, таит в себе другие опасности — занос вредной пыли или даже абразивов, застревающих в ткани перчаток; кроме того, в перчатках не так удобно работать. Поэтому правильнее, пожалуй, не отказываться от ручки, постаравшись лишь уменьшить возможный вред от нее.

Важная подготовительная операция состоит еще в снабжении обоих наших стеклянных дисков *фасками*. Фаской обычно называется скошенный край, хотя иногда фаски бывают и прямые в виде плоского ободка, окружающего углубление зеркала (рис. 32). Назначение фасок состоит в том, чтобы край зеркала (и шлифовальника) не становился слишком острым при шлифовке. Острый край при обработке легко выкрашивается, давая осколки, которые могут поцарапать обрабатываемую поверхность. Сделать фаску очень легко с помощью не слишком крупнозернистого абразива (№ 200) и куска листовой латуни, цинка или железа; годится и наждачный брусок или оселок. Надо стараться, чтобы фаска получилась везде одинаковой ширины (1—3 мм) и имела наклон около 45°. Удобнее делать фаску на зеркале, пока еще не приклеена ручка, уложив его на место шлифовальника. Держа в руке кусок листового металла, с помощью абразива, разведенного водой в жидкую кашу (если применяют наждачный брусок, то, конечно, достаточно одной воды), без сильного нажима стирают наискось край диска, обходя при этом вокруг стола; чтобы сделать фаску,

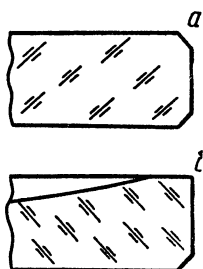


Рис. 32. Фаски на краю диска: а — обычная косая фаска; б — плоская фаска, удобная лишь при большой кривизне поверхности.

достаточно 5—10 минут. Надо остерегаться применять при этом резкие движения, чтобы не наделать выколок, особенно с лицевой стороны.

Этими приготовлениями мы ограничимся и можем приступить к первой части работы — к грубой шлифовке.

Абразив насыпают в мисочку и с избытком заливают водой. Уложив диск-шлифовальник на место между удерживающими его шурупами с надетыми резиновыми трубками или пробками, кладем на него небольшую порцию самого крупного абразива (№ 40—60), смоченного водой. Удобнее всего брать абразив жесткой щетинной кистью, захватывающей его с достаточным количеством воды. Небольшая кисть захватывает его примерно столько, сколько нужно на одну «порцию» для шлифовки зеркала диаметром 150 мм. Встряхнув кисть над шлифовальником, мы довольно равномерно покрываем его достаточным количеством смоченного абразива. Можно, конечно, посыпать шлифовальник абразивом и потом смачивать водой; для посыпания может служить баночка с продырявленной крышкой или солонка (перечница) с сетчатой крышкой.

Накладываем теперь сверху наше будущее зеркало, крепко захватываем обеими руками ручку и начинаем делать «штрихи», т. е. попросту двигать зеркало взад и вперед, достаточно сильно нажимая на него (см. рис. 31). При этом раздается сильный хруст от растирания крупных зерен наждака или карборунда и от начавшегося выкрашивания стекла. Это совершается процесс, называемый грубой шлифовкой или обдиркой.

Теперь самое время вспомнить о том, что мы говорили в предварительной форме о характере штриха. Двигать будущее зеркало по шлифовальнику надо так, чтобы соблюсти установленное нами условие, т. е. чтобы зеркало поворачивалось относительно шлифовальника, а штрихи были прямолинейны и должной длины. Предпочтительнее такой порядок работы. Сдвинув зеркало со шлифовальника на некоторую часть его радиуса по направлению к себе, нужно сделать небольшой шаг вокруг стола (направо или налево, как покажется удобнее), не отпуская ручки зеркала; при этом зеркало обязательно немного повернется относительно шлифовальника в направлении движения мастера вокруг стола. Тогда делается движение зеркалом от себя,

причем оно сдвигается настолько же, как и в первый раз, но в противоположную сторону. Затем опять нужно сделать шажок вокруг стола, разумеется в ту же сторону, но на этот раз отпустить ручку зеркала, чтобы оно не поворачивалось относительно шлифовальника. Тогда мастер делает штрих к себе, после которого снова шаг вокруг стола, не отпуская ручки. Таким образом, работа пойдет при чередовании штрихов с поворачиванием зеркала относительно шлифовальника и без поворачивания, но зато с изменением положения мастера относительно обрабатываемого стекла, так как он делает боковой шаг вокруг стола. После недолгой практики ритм работы становится автоматическим, и совершенно не приходится думать о том, что должны делать руки и ноги. Разумеется, предлагаемая схема работы не единственная возможная, и автор вовсе не считает ее обязательной. Можно, например, вместо того, чтобы поворачивать зеркало, делая шаг вокруг стола, поворачивать его рукой в промежутке между штрихами; А. А. Чикин советует поворачивать его в сторону, противоположную направлению обхода вокруг стола.

Как бы то ни было, работа должна быть налажена так, чтобы зеркало понемногу поворачивалось относительно шлифовальника, а мастер обходил вокруг стола. При этом мы добьемся главной цели: как зеркало, так и шлифовальник будут равномерно сошлифовываться по всем радиусам.

Скорость движения по причинам, о которых мы еще будем говорить в дальнейшем, не должна быть велика. Целесообразно, если работающий будет обходить вокруг стола примерно один раз за минуту, сделав за это время около 30 полных штрихов, т. е. движений к себе и от себя. Удобнее пользоваться для шлифовки станочком типа, изображенного на рис. 64.

По мере измельчения зерен абразива хруст будет затихать. После нескольких оборотов вокруг стола мы почувствуем, что энергичная «обдирка» стекла прекратилась. Тогда, сдвинув вбок зеркало, снимем его со шлифовальника и сполоснем с него кашицу, состоящую из растертого абразива и сошлифованного стекла; со шлифовальника также снимаем отработанный абразив с помощью мокрой тряпочки или губки. Затем наносим свежую порцию абразива и продолжаем работу до новой смены.

Сменив несколько порций, интересно отмыть и вытереть насухо зеркало и шлифовальник. Тогда воочию можно увидеть ход шлифовки: мы заметим, что у нашего будущего зеркала центральная часть стала матовой, а края его еще блестят (конечно, если поверхность диска не была матовой от предварительной шлифовки). На шлифовальнике же мы обнаружим обратное: матовые крайние части и блестящую слабо затронутую среднюю часть.

Продолжая шлифовку самым крупным абразивом, мы постепенно увеличиваем кривизну поверхностей: углубление на зеркале увеличивается, а шлифовальник становится все более выпуклым. Через некоторое время эта кривизна станет уже хорошо заметна, если к зеркалу или к шлифовальнику приложить ребром линейку.

Задача грубой шлифовки состоит в том, чтобы вышлифовать в зеркале шарообразное углубление нужной кривизны. Для этого надо следить за ходом шлифовки посредством измерения кривизны поверхности. В оптических мастерских для более точного измерения кривизны имеются специальные приборы — *сферометры*, а иногда шаблоны. Для наших целей особой точности

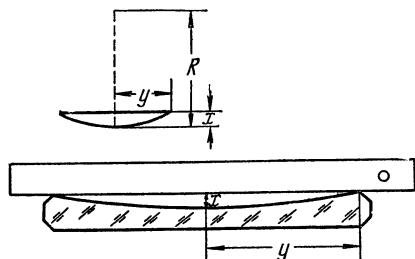


Рис. 33. Определение стрелки кривизны (x) вогнутого зеркала.

не требуется и можно обойтись без специальных приспособлений. Впрочем, при желании можно воспользоваться имеющимися в продаже сравнительно недорогими учебными сферометрами, вполне пригодными для работы.

Для определения кривизны поверхности непосредственно измеряется *стрелка кривизны* (рис. 33), а по ней вычисляется *радиус кривизны*, являющийся главной характеристикой поверхности. Из геометрии известно, что радиус кривизны R связан следующей зависимостью с хордой ($2y$) и со стрелкой кривизны (x):

$$R = \frac{y^2 + x^2}{2x}.$$

При незначительной кривизне, когда стрелка кривизны мала, можно пренебречь в этой формуле величиной x^2 , т. е. принять

$$R \approx \frac{y^2}{2x}.$$

Таким образом, радиус кривизны найдется как частное от деления квадрата полудиаметра нашего зеркала на удвоенную стрелку кривизны.

Из сказанного ясно, что, приступая к работе, надо сначала задаться определенным радиусом кривизны и рассчитать по нему стрелку кривизны. Каков же должен быть этот радиус? Здесь нам придется сделать небольшое отступление.

Длина радиуса кривизны вогнутого сферического зеркала равна его двойному *фокусному расстоянию*. Таким образом, нужный радиус кривизны мы найдем, решив сначала, каково должно быть фокусное расстояние нашего зеркала. Мы уже указывали, что трудность изготовления зеркала повышается вместе с уменьшением его относительного фокуса $V = \frac{f}{D}$, где f — фокусное расстояние, а D — диаметр зеркала. Трудность возникает в связи с тем, что, начиная с известной предельной величины V , для получения хороших изображений светил необходимо придать поверхности зеркала форму параболоида; если же величина V выше этого предела, можно обойтись сферической поверхностью, которую гораздо легче изготовить. Поэтому начинающему практичнее остановиться на таком отношении V , которое еще не требует параболической поверхности. Овладев на первом опыте техникой изготовления зеркала, любитель сможет потом перейти к более сложной задаче — изготовлению более короткофокусного параболического зеркала. Вполне естественно поэтому начать с описания изготовления сферического зеркала и лишь потом обратиться к параболическому.

Оставляя в стороне теорию вопроса, примем вслед за Д. Д. Максutowым, что наименьшее значение относительного фокуса определится из уравнения

$$V \geq 1,52 \sqrt[3]{D}.$$

Таким образом, взяв зеркало диаметром 150 мм, мы можем без вреда для качества изображения придать ему

относительный фокус $V = 1,52 \sqrt[3]{150} \approx 8,1$, не прибегая к параболической поверхности, т. е. придав ему простейшую сферическую форму. Поэтому мы смело можем принять, например, $V = 8,5$, т. е. делать наше сферическое зеркало с фокусным расстоянием $150 \cdot 8,5 = 1275$ мм; его радиус кривизны будет, следовательно, равен $1275 \cdot 2 = 2550$ мм.

Теперь остается лишь рассчитать величину нужной нам в таком случае стрелки кривизны. Из приближенного равенства $R \approx \frac{y^2}{2x}$ находим $x = \frac{y^2}{2R}$ мм. В нашем случае $y^2 = 75^2 = 5625$, а $2R = 5100$. Таким образом, искомая величина стрелки составит $\frac{5625}{5100} \approx 1,10$ мм. Такой именно глубины нам придется вышлифовать сферическое углубление в нашем зеркале.

Какова требующаяся точность при определении стрелки зеркала? Спешим сразу же успокоить читателя: нужная точность невелика и потому легко доступна. В самом деле, пусть мы сделали стрелку на 0,1 мм больше, т. е. 1,2 мм. Тогда фокусное расстояние нашего зеркала вместо 1275 мм будет: $\frac{5625}{1,2 \cdot 4} = 1172$ мм, что даст величину относительного фокуса около 7,8, следовательно, лишь немного ниже установленного нами предела *). Как мы сейчас увидим, не составит труда достигнуть и более высокой точности, не прибегая ни к каким специальным инструментам.

Для измерения стрелки нам потребуется хорошая линейка, пачка гладкой бумаги или ненужная книжка и миллиметровая линейка. Сначала измерим миллиметровой линейкой плотно сложенную стопку бумаги, скажем, толщиной в 20—30 мм (чем толще пачка, тем точнее результат). Сосчитав затем число листов в пачке, простым делением получим толщину одного листа (обычная бумага имеет толщину около 0,05 мм). Узкие полоски, нарезанные из бумаги, послужат нам для измерения углубления в центре зеркала, т. е. стрелки. Будем накладывать полоски бумаги стопкой в центре зеркала до тех пор, пока линейка, положенная ребром, не станет плотно на стопочку бумажных полосок в центре и на края

*) Иначе говоря, допустив ошибку при измерении стрелки, скажем, на 10%, мы сделаем такую же ошибку в определении фокусного расстояния.

зеркала (см. рис. 33). Сначала надо положить несколько лишних бумажек, отчего слишком толстая стопочка подпрет линейку, которая будет заметно покачиваться на ней, постукивая о края зеркала. Удаляя бумажки одну за другой, найдем такое положение, при котором линейка еще достаточно плотно лежит на стопочке бумажек, касаясь в то же время краев зеркала. Сосчитав тогда число бумажек, находим толщину всей пачки (т. е. величину стрелки) простым умножением на известную нам толщину одного листа бумаги *).

Вернемся теперь к шлифовке, поскольку у нас есть верный способ следить за ее ходом по величине стрелки. Хотя, как мы видели, начальные стадии работы и не требуют особой точности, следует все же с самого начала соблюдать известные правила, без которых может пострадать и качество работы и понапрасну будет потрачено много времени.

Как мы помним, идеалом для нас является сферическая поверхность, достижение которой зависит прежде всего от правильной длины штриха, именно от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$ диаметра зеркала. В случае нашего 150-мм зеркала мы, следовательно, должны сдвигать его при шлифовке на 20—25 мм в каждую сторону, к себе и от себя. Если штрих будет длиннее, то центральная область зеркала получит большую кривизну, чем периферическая зона; при слишком коротком штрихе получится обратный результат — кривизна в центральных частях будет меньше, чем на периферии (см. рис. 30).

На практике, однако, оказывается невыгодным пользоваться для обдирки штрихами «законной» длины, и вот почему. Во-первых, работа берет тогда очень много времени; во-вторых, сошлифовывание стекла начинается почти одновременно по всей его поверхности, причем вместе с вышлифовыванием углубления в зеркале сильно сошлифовываются и его периферические части, отчего зеркало становится тоньше, что нежелательно. Поэтому выгоднее применять при грубой шлифовке более длинные штрихи, быстрее приводящие к цели, хотя и таящие в себе скрытую опасность: помимо неравномерности кривизны (чрезмерное углубление центральных частей) зеркало приобретает еще и завал на краю (рис. 34),

*) Однако существуют и другие, более точные способы определения стрелки зеркала.

представляющий собой очень вредный недостаток, с которым мы будем иметь случай сталкиваться еще не раз.

Заметим здесь, что самый характер движения при шлифовке, независимо от длины штриха, также имеет значение. Ни в коем случае не следует двигать зеркало быстро, рывком; наоборот, движения должны быть насколько возможно неторопливы и плавны. От резкого движения идущая вперед сторона зеркала нажимается сильнее, а идущая позади, наоборот, стремится приподняться. В результате этого «эффекта опрокидывания»

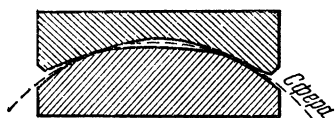


Рис. 34. Неправильность формы поверхности зеркала, очень часто возникающая при неумелой шлифовке, — «завал» на краю и чрезмерное углубление в центральной части зеркала (по Д. Д. Максутову; 1948).

сошлифовывание происходит неравномерно и может получиться завал на краю и другие неправильности поверхности.

Вредность эффекта опрокидывания не только не уменьшается на дальнейших этапах работы (т. е. при тонкой шлифовке и полировке), но, пожалуй, еще усиливается.

Устранить завал трудно. Надо всячески стремиться избегать всего, что может породить эффект опрокидывания. Легко понять, что, кроме неправильного способа приложения силы к зеркалу (т. е. резких движений, рывков), важнейшее значение имеет положение точки приложения силы по отношению к зеркалу: чем выше расположена эта точка, тем больше опрокидывающая составляющая, и наоборот. Можно, как это советуют некоторые, пользоваться кольцеобразной ручкой, лежащей своим внутренним ободком на периферическую часть зеркала; внешней (периферической) части ручки придается такая форма, при которой оказывается на уровне поверхности зеркала; такая специальная форма оправы позволяет применить описанную выше разгрузку зеркала на несколько точек.

Наиболее экономичный, хотя и требующий осторожности и внимания способ обдирки состоит в следующем. Вместо центральных штрихов применяют боковые (по хорде), притом с большим выносом в стороны (см. рис. 30, V). При шлифовке прямыми штрихами по хорде далеко от центра шлифовальника углубление в зеркале получается чрезвычайно быстро, но оно возникает сначала в самой центральной части зеркала, вся же периферия

ферия остается совершенно нетронутой. Постепенно расширяясь, углубление захватывает периферию, доходя наконец до краев зеркала. При этом, как ясно из рис. 35, шлифуется минимальное количество стекла, а следовательно, и труд экономится, и толщина зеркала сохраняется. Опасность этого способа шлифовки состоит



Рис. 35. Преимущество шлифовки по хорде: слева — ряд этапов образования углубления при шлифовке по хорде; справа — то же при обычной шлифовке по диаметру. Сплошной линией показан уровень готовой поверхности.

в том, что центральные части зеркала приобретают слишком большую кривизну еще до того, как углубление распространится на все зеркало. Во избежание этого надо следить за кривизной углубления, пока оно еще не достигло краев зеркала. Если нет сферометра, то определение с помощью бумажек и линейки будет очень неудобно и неточно. Здесь применяется очень простой и остроумный оптический способ, позволяющий прямо найти длину радиуса кривизны с точностью большей, чем с помощью линейки и бумажных полосок.

Если обильно смочить водой матовую поверхность бу- дущего зеркала, то она в течение некоторого времени (пока блестящая и гладкая пленка воды еще не сбегала) может довольно хорошо отражать свет. Поставив зеркало на ребро (в тарелку, чтобы не разливать воду), быстро обольем его водой и сейчас же поместимся перед ним, держа у виска горящую свечу или карманный электрический фонарик. Двигаясь в стороны, найдем такое положение, при котором в зеркале отразится свет. Стараясь не терять из виду отражение лампочки или свечи, будем удаляться и приближаться к зеркалу (конечно, вместе с лампочкой или свечой), пока не найдем такого положения, при котором всё зеркало (или всё углубление зеркала, если краевые части еще не тронуты) заполнится светом. Это будет значить, что наш глаз и источник света находятся около центра кривизны зеркала, т. е. в центре сферы, частью которой является углубление зеркала (рис. 36).

Найдя это положение, мы, разумеется, легко определим радиус кривизны зеркала, измерив расстояние от

нашего глаза до зеркала. Более точно мы сделаем это так. Приблизимся немного к зеркалу (конечно, по-прежнему держа лампочку или свечу сбоку у глаза) и, слегка подвигаясь в стороны, заметим, что отражение (имеющее вид расплывчатого светлого пятна) движется в ту же сторону, что и наша голова (рис. 36, а). Удалившись

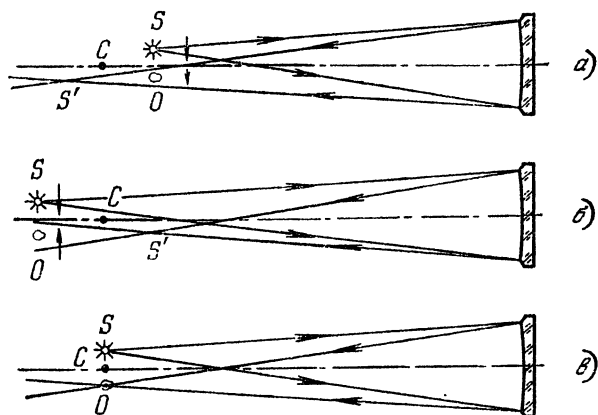


Рис. 36. Определение кривизны поверхности зеркала «мокрым способом»: а — источник света S и глаз наблюдателя O находятся впереди центра кривизны C ; б — то же позади центра кривизны; в — то же на уровне центра кривизны. Изображение источника света образуется в точке S' .

на 20—30 см от зеркала, мы увидим, подвигаясь в стороны, что отражение движется в обратном направлении (если мы налево — оно направо, если мы вправо — оно влево). Причина этого ясна: в первом случае наш глаз вместе с лампочкой находился впереди центра кривизны (между ним и зеркалом), т. е. до пересечения лучей, отражающихся от зеркала, во втором же случае — позади центра кривизны, после пересечения лучей (рис. 36, б). До пересечения лучи, отражающиеся от правой стороны зеркала, остаются справа, а отражающиеся от левой стороны — слева; после пересечения, понятно, лучи от правой стороны зеркала оказываются слева, а лучи от левой стороны — справа. Осторожно подвигаясь взад и вперед, мы найдем такое положение, где отражение не сдвигается в стороны при покачивании головы вправо и влево, заполняя всю отшлифованную часть зеркала: это значит, что наш глаз вместе с источником света находится близ центра кривизны (рис. 36, в).

Отметив это положение (например, с помощью отвеса), мы легко можем измерить расстояние до зеркала, т. е. радиус кривизны, с точностью, большей чем по стрелке, найденной с помощью бумажек. Применяя описанный «мокрый» способ измерения радиуса кривизны, особенно на более поздних стадиях шлифовки, когда поверхность зеркала становится глаже и после смачивания блестит как полированная, автор без труда определял радиус кривизны с точностью до 1—2 см; читатель может легко убедиться в том, что такая точность совершенно недостижима при грубом измерении стрелки, не превосходящем по точности 0,025 мм (половина толщины одной бумажки).

Само собой разумеется, что в течение всей процедуры измерения радиуса кривизны придется несколько раз заново обливать зеркало водой. Удобнее пользоваться не чистой водой, а с добавкой глицерина; глицерин не испаряется, как вода, и медленнее сбегает благодаря своей вязкости, поэтому поверхность зеркала будет дольше сохранять зеркальный блеск.

Как только кривизна поверхности приближается к желаемой, т. е. когда радиуса кривизны в нашем случае станет близка к 2,5 м, надо перейти с боковых (по хорде) штрихов на центральные штрихи нормальной длины (до $\frac{1}{3}$ диаметра), отчего углубление начнет быстро распространяться, почти не меняя своей кривизны. Время от времени контролируя описанным «мокрым» способом ход шлифовки и возвращаясь, по мере надобности, к боковым штрихам, мы закончим первый этап работы. При шлифовке исключительно центральными штрихами на первоначальную обдирку потребуется несколько часов (особенно, если пользоваться наждаком, который шлифует медленнее). Применение же боковых длинных штрихов позволит справиться с работой не более чем за 2 часа; при этом мы почти не потеряем первоначальной толщины дисков, а это очень важно.

Теперь переходим к шлифовке более мелкими сортами абразива. Сначала надо тщательно вымыть зеркало, шлифовальный, и, насколько возможно, вычистить рабочий стол во избежание попадания более крупных зерен абразива. Соблюдение этой предосторожности совершенно необходимо; особенную чистоту следует соблюдать на последних стадиях тонкой шлифовки. Пожалуй, разумнее всего застелить рабочий стол газетами, которые

надо менять при каждом переходе к новому сорту абразива. Не менее важна чистота рук; при смене номеров абразива надо тщательно мыть руки, особенно под ногтями. Величайшая чистота и аккуратность — необходимое условие. Надо запомнить раз и навсегда, что одно-единственное зернышко абразива, притаившееся где-нибудь и попавшее потом между зеркалом и шлифовальником, может наделать таких царапин, которые заставят переделывать всю работу. Поэтому не надо жалеть времени и старания для поддержания чистоты.

Первая особенность более тонкой шлифовки состоит в том, что при ней уже не применяется никакого нажима. Совершенно достаточно давления, производимого лишь собственной тяжестью стекла. Сильное давление, особенно при последних стадиях работы самыми мелкими минутниками, не только не нужно, но даже опасно, так как может произвести неизгладимые царапины. При обработке очень больших зеркал (которые по необходимости очень толсты) приходится даже принимать особые меры для уменьшения давления, производимого зеркалом (или шлифовальником, если им шлифуют зеркало сверху). К счастью, любителю нечего бояться этих трудностей, так как он будет иметь дело со сравнительно небольшими зеркалами.

Большую опасность, как уже говорилось, представляет попадание более крупных зерен абразива. Поскольку возможность их заноса всегда имеется, лучше принимать еще такую меру предосторожности: положив свежую порцию абразива, не начинать сразу шлифовку нормальными штрихами, а сначала чуть-чуть подвигать зеркало взад и вперед, без всякого нажима. При этом попавшее более крупное зерно абразива раздавится, не успев причинить вреда. Но если бы мы сразу сделали длинный штрих, могла бы возникнуть большая царапина, сошлифовывание которой потребовало бы много времени.

Шлифовка более мелкими номерами абразива не преследует цели увеличения углубления; ее задача — сгладить неровности, оставшиеся от более крупных зерен абразива, и придать поверхности плавную и строго сферическую форму. Основными условиями успеха теперь являются: правильная длина штриха — от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$ диаметра зеркала — и не слишком большие порции абразива.

Сколько нужно сразу класть абразива? На этот вопрос, часто затрудняющий начинающих, можно дать следующий ответ. Так как шлифующее действие производится только теми зернами абразива, которые одновременно соприкасаются с обеими шлифовальными стеклянными поверхностями, то, казалось бы, абразива нужно накладывать ровно столько, чтобы его зерна легли в один слой. Стоит подсчитать, какое его количество для этого потребуется. Площадь нашего шлифовальника диаметром 150 мм составляет около 18 000 мм². Один слой зерен карборунда № 40 при диаметре частиц около 0,4 мм будет иметь объем $18\,000 \times 0,4 = 7200 \text{ мм}^3$ или 7 см³, т. е. примерно составит одну чайную ложку. Понятно, что чем мельче зерна абразива, тем меньший объем будет иметь один их слой; поэтому при переходе к более мелким сортам абразива мы должны будем уменьшать порции пропорционально размеру зерен. Мы увидим дальше, что самые мелкие минутники при последних стадиях тонкой шлифовки наносятся уже в ничтожных количествах с помощью кисточки; они, как говорят оптики, «подмазываются».

Такой расчет количества абразива, необходимого на одну порцию, верен, однако, лишь в том случае, если обе поверхности, шлифовальника и зеркала, достаточно близки к сфере. При обычных же неправильностях поверхности, о которых мы уже говорили, выгоднее класть некоторый избыток абразива, который будет содействовать более быстрому устранению этих местных неправильностей. Более углубленные части поверхностей будут служить как бы резервуаром абразива, откуда свежие зерна будут постепенно выноситься на части поверхности, подлежащие сошлифовыванию, и, таким образом, шлифование будет ускоряться.

Чем мельче зерна абразива, тем, понятно, плотнее соприкасаются друг с другом зеркало и шлифовальник, тем сильнее они прижимаются друг к другу, когда разделяющая их прослойка состоит из кашицы растертого абразива. Поэтому если при шлифовке самыми крупными сортами можно без особого усилия оторвать зеркало от шлифовальника, то, шлифуя более мелкими сортами абразива, зеркало можно снять со шлифовальника, только сдвинув его вбок. Вполне понятно, что чем мельче зерна абразива, тем — при правильной шлифовке — меньше становятся и неправильности поверхности,

существовавшие вначале. Это в первую очередь относится к неправильностям, типичным для первых стадий шлифовки вроде изображенной на рис. 34. Если в центре зеркала кривизна больше, чем на периферии, мы сейчас же заметим, что оно движется по шлифовальнику неодинаково легко в различных частях штриха. Именно, зеркало «заедает», как бы цепляясь за шлифовальник, в положении, близком к совмещению (центр на центре), и, наоборот, скользит легко, когда сдвинуто в крайнее положение. Очень нагляден следующий опыт. Вымыв и вытерев насухо зеркало и шлифовальник, проведем на том и другом мягким карандашом черту по диаметру и, наложив зеркало на шлифовальник, сделаем несколько штрихов, как при шлифовке (но, разумеется, без абразива и воды). Сняв зеркало, увидим тогда, что карандаш стерся в тех местах, где зеркало плотнее соприкасалось со шлифовальником; разумеется, делать это надо очень осторожно, чтобы не вызывать глубоких царапин.

О наличии слишком большой кривизны (углубления) в центральной части зеркала можно также судить и по тому, что при шлифовке там упорно держится пузырь воздуха, который, конечно, можно наблюдать, если ручка-держатель удалена. Коль скоро же зеркало приобретает сферическую поверхность, пузырь исчезает.

Легко понять, что единственная форма поверхности зеркала и шлифовальника, при которой они могут одинаково плотно скользить друг по другу при любом относительном положении, — это сфера, так как она обладает везде одинаковой кривизной. Поэтому чем ближе поверхность к сфере, тем «глаже» ходит зеркало по шлифовальнику при шлифовке, тем меньше оно цепляется или заедает. Равномерность хода зеркала при тонкой шлифовке — самый верный признак правильности формы поверхности зеркала, и наоборот, если зеркало заедает, цепляется, — шлифовка идет не так, как нужно, и форма поверхности далека поэтому от сферической. Это заедание, безопасное на ранних стадиях шлифовки (хотя, как мы теперь знаем, оно указывает на существование слишком большой кривизны в центральной области зеркала), может при тонкой шлифовке повлечь за собой опасные последствия. Поэтому надо предупредить об этой опасности, часто подстерегающей новичка. Мелкость зерен минутника позволяет зеркалу столь плотно соприкоснуться со шлифовальником, что при самом малом откло-

нении формы поверхности от сферы тонкий слой кашицы абразива, образующий как бы смазку, совершенно выдавливается в местах наиболее плотного соприкосновения зеркала и шлифовальника и зеркало может заесть «намертво». Силой оторвать заевшее зеркало от шлифовальника, не разбив его, практически невозможно, так как для этого нужно преодолеть не только атмосферное давление, составляющее в случае 150 мм зеркала около 180 кг, но и молекулярное сцепление (склеивание), если слой абразивной кашицы успел высохнуть. Попытка, например, вогнать клин между зеркалом и шлифовальником скорее всего привела бы только к тому, что отломился бы кусок зеркала или шлифовальника. Если уже случилась такая беда, что зеркало заело, надо попытаться освободить его, положив в теплую мыльную воду или в керосин на несколько часов; если это средство окажется недейственным, то надо попробовать более сильное нагревание в горячей воде и даже над огнем, что помогает почти всегда. Нагревание зеркала вызывает его выгибание и разъединение присосавшихся участков. Однако при этом всегда есть опасность погубить всю работу, так как стекло легко может треснуть от неравномерного расширения.

Итак, переходя от более крупного абразива к более мелкому, надо следить за движением зеркала, добиваясь, чтобы это движение было как можно более равномерным. Важно при этом знать, что движение, плавное и равномерное при грубозернистом абразиве, часто становится неравномерным при переходе к более мелкозернистому сорту — явление, вполне понятное из сказанного. Поэтому не следует переходить к более мелкому номеру абразива, не добившись сначала совершенно плавного движения зеркала по шлифовальнику. Иначе мы рискуем вместо быстрого выправления существовавших неправильностей поверхности наделать царапин в местах наиболее тесного контакта между зеркалом и шлифовальником, а то и испортить зеркало вследствие «заедания».

Небезынтересно проделать такой опыт. Закончив обдирку номером 40—60, попробуем сразу перейти к мелкозернистому абразиву, например, 5-минутному; при этом почти всегда обнаружится, что зеркало сильнейшим образом «заедает», как бы цепляется за шлифовальник, настолько значительны еще отклонения от

сферической формы, оставшиеся после шлифовки грубо-зернистым абразивом.

Сколько времени надо шлифовать абразивом одной крупности, прежде чем переходить к следующему, более мелкозернистому сорту? Чтобы ответить на этот вопрос, надо прежде всего иметь в виду, что более мелкозернистый абразив должен не только сгладить ямки, оставшиеся от его предшественника, и сошлифовать общие крупные неправильности поверхности, но также сошлифовать еще некоторое количество стекла, испорченное трещинками, проникающими иногда довольно глубоко под ямками, выколотыми зернами абразива. Если довольно крупные ямки заметны сравнительно легко, то эти тонкие трещинки увидеть практически совершенно невозможно. Поэтому приходится судить в значительной мере наугад, продолжая шлифовку несколько долее, чем это кажется нужным на глаз.

Осмотр поверхности (обмытой и вытертой насухо) лучше всего производить в проходящем свете (к сожалению, этому мешает ручка, приклеенная к зеркалу). Источником света может служить далекая лампочка или, еще лучше, прямой солнечный свет. Более крупные и глубокие ямки на равномерно матовой поверхности стекла при рассматривании в лупу резко выделяются в проходящем свете, блестя как звездочки. Почти всегда при первых осмотрах обнаруживается, что наибольшее количество еще несошлифованных следов от крупных зерен сосредоточено в краевых частях зеркала, где контакт со шлифовальником наименее плотен и наименее продолжителен и поэтому дольше сохраняются нерастертые зерна абразива. Главное внимание надо, следовательно, обращать на края зеркала: если они отшлифовались хорошо, то центральная часть и подавно готова. Вот, между прочим, почему наклеенная ручка не столь уж серьезная помеха для исследования зеркала в проходящем свете.

Обратную картину мы, конечно, увидим на шлифовальнике, т. е. там ямок окажется больше в центральных частях.

Грубая шлифовка заканчивается последним «номером» сеяного абразива. Начав с абразива № 40 или 60, мы переходим к № 100—120 и заканчиваем на № 200. Надо заметить, что при шлифовке этими более мелкими сортами кривизна поверхности обычно немного увеличи-

вается, т. е. фокусное расстояние будущего зеркала уменьшается. Поэтому полезно время от времени контролировать ход шлифовки, лучше всего описанным «мокрым» способом. Поверхность зеркала, отшлифованная абразивом № 200, уже настолько гладка, что, будучи облита водой, долго удерживает зеркальный блеск, и зеркало так хорошо отражает свет, что способно образовывать настоящее отчетливое изображение пламени свечи или раскаленной спирали электролампочки. Испытание зеркала на этой стадии работы доставит нам уже некоторое удовлетворение.

Если бы оказалось, что фокусное расстояние зеркала слишком мало (что, впрочем, бывает не часто, так как укорочение радиуса кривизны при шлифовке более мелкими абразивами очень незначительно), то нет ничего легче как удлинить его насколько нужно. Для этого достаточно лишь поменять местами зеркало и шлифовальный, производя некоторое время шлифовку шлифовальником поверх зеркала. Такая перекладка может быть полезна и потому, что способствует более быстрому и равномерному сошлифовыванию следов от крупных зерен абразива. Само собой разумеется, что ручка, приклеенная к зеркалу, не позволит положить его на место шлифовальника, если в столе не предусмотрено специальное отверстие для ручки. Чтобы сделать обмен местами возможным, надо или снять ручку, или устроить специальную подкладку в виде толстого кольца, в просвет которого входила бы ручка, когда зеркало кладется на стол на место шлифовальника. Шлифовальник для данной операции можно и не снабжать ручкой.

Понятно, что менять местами зеркало и шлифовальник удобно только в том случае, если они имеют одинаковые диаметры. Поскольку возможны небольшие различия в диаметре (что не желательно), эластичность пробок или резиновых трубок, удерживающих обрабатываемое стекло, окажет нам большую услугу.

Надо, однако, пользоваться перекалыванием зеркала и шлифовальника с большой осторожностью, так как иначе возможно появление сильного завала на краю зеркала.

Если бы мы начали менять местами зеркало и шлифовальник с самого начала, притом через одинаковые промежутки времени, то вовсе не получили бы ни углубления в зеркале, ни выпуклости шлифовальника, — оба

стекла остались бы плоскими. Таким именно образом и поступают при изготовлении оптических плоскостей, с чем мы познакомимся, когда будем говорить об изготовлении плоского вспомогательного зеркала для телескопа.

Прежде чем перейти к тонкой шлифовке, нам надо отметить еще одно обстоятельство. Если штрихи слишком коротки, то возникает отклонение поверхности от сферы, противоположное тому, с которым мы сталкивались до сих пор, именно, центральные части зеркала получают меньшую кривизну (более длинное фокусное расстояние), чем периферические. Этот недостаток легко узнается по характеру хода зеркала при шлифовке: если чрезмерное углубление средних частей зеркала ведет, как мы видели, к заеданию, то меньшая кривизна в этой части, наоборот, позволяет зеркалу почти без трения скользить по шлифовальнику, иногда настолько легко, что оно вырывается из рук и соскальзывает со шлифовальника, а может и свалиться на стол. Поэтому, если зеркало «забегало» по шлифовальнику слишком легко,— это верный знак, что центральные его части приобрели меньшую кривизну, чем периферия. Для исправления недостатка надо немного удлинить штрих, или, если шлифовальник наверху, поменять его местами с зеркалом и продолжать шлифовку в обычном положении, зеркалом сверху по шлифовальнику.

Теперь мы достаточно ясно представляем себе ход шлифовки и можем поэтому вполне сознательно направлять его в нужную сторону.

Тонкая шлифовка начинается с особенно тщательного мытья зеркала, шлифовальника, рук и чистки всего рабочего места. Занос более крупных зерен здесь особенно вреден, так как производимые ими царапины могут потом не изгладиться вовсе — слишком уж тонкий слой стекла снимается минутниками. Если случится такая неприятность, то обычно приходится возвращаться к шлифовке более крупными абразивами, что вызывает крайне досадную потерю времени. Бывает и так, что первые же порции минутника, сглаживающие поверхность зеркала, открывают крупные ямки, оставшиеся от грубой шлифовки, не замеченные неопытным мастером. В таком случае также лучше вернуться к последней стадии грубой шлифовки, иначе продолжительная тонкая шлифовка может оказаться бесполезной, так как следы

от грубого абразива могут остаться до конца. Надо заметить здесь, что ямки на поверхности страшны не только потому, что они, оставшись на готовом зеркале, будут производить вредное рассеяние света, — в них могут застревать твердые крупинки, способные на позднейших стадиях обработки царапать поверхность. Такую же вредную роль могут сыграть и пузырьки в стекле, вскрывающиеся при шлифовке; надо следить за такими пузырьками, которые могут стать настоящими ловушками для зерен абразива, царапающих потом поверхность. Во избежание этого лучше расшлифовать их с помощью стеклянной палочки или металлического прутка 5-минутным наждаком.

Тонкую шлифовку начинаем с 5-минутного наждака, потом переходим к 10—15-минутному, 30-минутному и, наконец, 60-минутному. При работе минутниками не только не раздается громкого хруста, знакомого нам по первым стадиям грубой шлифовки и прекратившегося с переходом к более мелкозернистым сортам абразива, но слышится лишь слабый звук, напоминающий легкое посвистывание сквозь зубы. В принципе работа не отличается, однако, от грубой шлифовки, но требует лишь ряда предосторожностей, вполне понятных из того, что мы уже узнали. Прежде всего, во избежание заноса пыли, могущей поцарапать поверхность, зеркало не следует снимать со шлифовальника; свежие порции минутника намазываются на шлифовальник, с которого зеркало лишь сдвигается несколько в сторону. Сработанный абразив постепенно выжимается из-под зеркала, собираясь на краю шлифовальника. Его надо время от времени стирать кусочком мокрой ваты или тряпочкой, немного сдвигая для этого в разные стороны зеркало. При этом достигается и необходимое увлажнение. Очень важно следить за тем, чтобы абразив не высыхал, иначе возможны большие неприятности: «заедание» и царапины, производимые ссохшимися в твердые комочки частицами абразива.

При переходе к более мелкому сорту минутника нужно, конечно, тщательно вымыть зеркало, шлифовальник и руки, выполоскать кисточку (кстати, следует завести отдельные кисточки для разных минутников), на чисто обтереть, как всегда, стол или переменить на нем бумагу.

Вопрос о том, сколько времени шлифовать каждым сортом наждака, пожалуй, еще труднее решить, чем в случае грубой шлифовки. Если ямки от более грубых зерен абразива и можно различить при некотором навыке, то минутник уже не оставляет достаточно заметных ямок и приходится руководствоваться больше часами. Надо раз навсегда запомнить, что «перешлифовать» минутником нельзя, зато слишком короткая шлифовка никогда не даст хорошего результата. Правило «маслом каши не испортишь» здесь как нельзя более применимо. Недошлифованное зеркало потребует очень продолжительной полировки, а может так и не отполироваться до конца — на нем останется легкая матовость, вредная для работы телескопа. Поэтому ни в коем случае не следует экономить время на тонкой шлифовке — каждый час такой «экономии» может обойтись потом при полировке в добрых 10 часов кропотливого труда. Забегая несколько вперед, скажем здесь, что чрезмерно долгая полировка невыгодна еще по ряду причин, ибо она увеличивает прежде всего опасность нанесения царапин и затрудняет достижение правильной формы поверхности.

Можно принять такой минимальный бюджет времени для тонкой шлифовки: один час для 5-минутника, полтора часа для 10—15-минутника и по два часа для двух последних стадий шлифовки самыми мелкими минутниками.

Читатель, вероятно, уже заметил, что мы определенно говорим о наждаке, а не вообще об абразиве для тонкой шлифовки. Это не случайно. Для тонкой шлифовки наждак лучше карборунда благодаря форме своих зерен и своей меньшей твердости. Карборунд, наоборот, ценен для грубой шлифовки; его твердые и острые зерна быстрее выкалывают стекло и дольше сохраняются целыми. Разумеется, за неимением наждака можно воспользоваться и карборундовыми минутниками, но с ними труднее добиться вполне равномерной шлифовки: размер зерен карборундовых минутников неодинаков в пределах одной и той же фракции, а их твердость и острые углы ведут к образованию на стекле глубоких и трудно заравнивающихся ямок.

Поверхность зеркала в конце тонкой шлифовки 60-минутным наждаком совершенно гладка, как бы бархатиста на ощупь и полупрозрачна. Она выглядит, по мет-

кому выражению А. А. Чикина, как облитая молоком. Косо падающие лучи света прекрасно отражаются от нее, так что в тонко отшлифованном зеркале можно уже увидеть отражение предметов даже и при не слишком большом угле падения лучей.

Этой способностью тонко отшлифованной поверхности зеркала отражать свет можно и должно воспользоваться для проверки качества шлифовки. Если, держа зеркало горизонтально лицевой стороной кверху, расположиться так, чтобы свет от лампы, заслоненной не слишком плотной бумагой (чем создается большая светящаяся поверхность), падал на него косо, то при достаточно большом угле падения лучей зеркало будет блестеть, отражая лучи света.

Поднимая зеркало (т. е. приближая его к уровню глаз), мы увеличиваем угол падения (делаем лучи более наклонными), опуская — уменьшаем этот угол (лучи падают на зеркало круче). При этом мы замечаем, что отражение в зеркале тем ярче, чем более наклонно падают на него лучи; наоборот, чем круче падает на него свет, тем слабее отражает зеркало — по мере уменьшения угла падения отражение тускнеет, начинает становиться красноватым и исчезает, наконец, вовсе.

Внимательно наблюдая поверхность зеркала, мы можем заметить, что яркость отражения неодинакова на всех частях зеркала. Так, например, может оказаться, что центральная часть выглядит при данном угле падения лучей темнее периферии; при уменьшении угла падения (т. е. при опускании зеркала) она совсем перестает отражать свет, в то время как периферия будет еще продолжать блестеть. В иных случаях мы обнаружим другую картину, например, все зеркало будет равномерно «гаснуть» при уменьшении угла падения (или начинать блестеть при увеличении угла падения); лишь узкий наружный ободок будет оставаться темным, когда уже все остальное зеркало блесит.

Нередко случается, что поверхность зеркала обнаруживает две и более концентрические зоны, различающиеся по своей способности отражать косые лучи. Это — следствие неправильностей поверхности, влияющих на неоднородность шлифовки. Более углубленные места, где скопился абразив и где его частицы слабее растерались, подвергались менее тонкой обработке, — на них осталась грубая матовость. Наоборот, лучше отражающие

места — это относительно «возвышенные» части. Там зеркало плотнее соприкасалось со шлифовальником и, следовательно, абразив растирался сильнее, его мельчайшие зерна придали поверхности большую гладкость.

Если неправильности поверхности, открываемые таким наглядным способом, невелики, то они не опасны; если же неоднородности отражающей способности зеркала резки, то они указывают на значительные неправильности поверхности. В таком случае полировка может оказаться не в состоянии устранить их, или на их местах останутся следы матовости, представляющие собой незаглаженные ямки от более крупных зерен абразива. Однако определить на глаз степень неправильностей без особого опыта невозможно, поэтому надо стараться довести тонкую шлифовку до такого состояния, чтобы вся поверхность зеркала отражала свет равномерно при некотором предельно малом угле падения лучей (т. е. при предельно крутом их направлении).

Тут большую помощь может оказать изменение длины и формы штриха. Исходя из уже известного нам влияния длины штриха, легко сообразить, как действовать: если центр зеркала блестит слабее в косом свете (т. е. углубление в центре сильнее), надо укоротить штрих. Если углублена промежуточная зона (между краем и центральной частью), то поможет осторожное удлинение штриха. Хуже всего, если темна крайняя зона: это завал на краю. С ним, как мы еще не раз убедимся, бороться труднее всего, а произойти он может от различных причин.

Завал особенно упорен потому, что, как легко понять из рис. 34 и 35, для его уничтожения надо сошлифовать очень много стекла, собственно говоря, понизить всю поверхность зеркала настолько, чтобы она перестала возвышаться над «заваленной» краевой зоной. Как мы уже указывали, завал часто происходит от слишком длинного штриха, от неосторожных резких движений зеркала при шлифовке, а также и от скопления избытка наждака на краю шлифовальника. Надо с самого начала стараться избегать всего, что может вызвать завал.

Вред от завала особенно велик потому, что последний, хотя на первый взгляд захватывает и не широкий ободок зеркала, в действительности занимает значительную часть площади зеркала, так как площадь кольцевой зоны пропорциональна ее радиусу. Ошибки в централь-

ной части зеркала по той же причине менее страшны (радиус мал); кроме того, самая центральная часть (составляющая менее $\frac{1}{10}$ всей поверхности зеркала) вообще не работает в телескопе, так как заслонена вспомогательным плоским зеркалом.

На этом мы заканчиваем описание шлифовки и переходим к следующему этапу работы — к полировке.

4. Полировка

До сих пор мы называли «зеркалом» наш матовый стеклянный диск, отражающий лишь косо падающие лучи. Теперь мы приближаемся к моменту, когда зеркалу предстоит оправдать свое название в полной мере.

Полировка в ряде отношений резко отличается от уже знакомой нам шлифовки. Главное отличие состоит в применении смоляного *полировальника* вместо стеклянного шлифовальника, с которым мы имели дело до сих пор.

Как мы уже указывали, смола благодаря своей вязкости удерживает на месте частицы абразива (в данном случае крокуса), не давая им кататься, как при шлифовке; этим полировальник прежде всего отличается от шлифовальника. Отполировать стекло можно поэтому почти любым абразивом, лишь бы его частицы были достаточно мелки. Отсюда ясно, что важная роль принадлежит именно смоле. Поэтому успех полировки зависит никак не в меньшей степени от качества смоляного полировальника, чем от свойств крокуса, которым мы будем пользоваться в качестве полировочного абразива.

Свойствами смолы, из которой делается полировальник, определяются и все прочие особенности процесса полировки; прежде всего, полировальник не стирается, не сошлифовывается, как шлифовальник, а изменяет форму своей поверхности исключительно в силу текучести смолы, о чем мы уже упоминали вначале. Далее, так как при трении зеркала о полировальник развивается тепло, размягчающее смолу, степень ее текучести может сильно меняться во время работы и притом неодинаково в различных местах: там, где трение сильнее (где соприкосновение между полировальником и зеркалом плотнее), развивается больше тепла, и наоборот. Наконец, ход полировки в сильной степени зависит от характера движений — чем быстрее двигать зеркало по полироваль-

нику, тем сильнее разогревание. Но скорость движения может быть неодинаковой в различных частях полировальника, например, при вращении зеркала относительно полировальника периферические части разогреваются благодаря своей большей линейной скорости сильнее, чем центральные.

Все эти особенности процесса надо не только принимать во внимание, но и уметь пользоваться ими для управления ходом полировки.

Переходим к самой практике полировки.

В качестве полировальника послужит наш, теперь уже выполнивший свое первоначальное назначение, шлифовальник, выпуклую сторону которого мы покроем слоем смолы. Выпуклая форма основы для полировальника имеет существенное значение: если бы мы воспользовались плоским диском, то слой смолы после придания ему выпуклости, соответствующей вогнутости зеркала, был бы в середине толще, чем по краям, что нежелательно.

Прежде всего надо приготовить смолу нужной твердости. Чистая смола (безразлично, древесный пек или гудрон), как и сапожный вар (под этим названием продаются различные смоляные смеси), обычно оказывается слишком мягкой, настолько, что в нее легко погружается ноготь при самом слабом нажиме. Поэтому начинаем с того, что расплавляем в кастрюльке канифоль (для нашего зеркала диаметром 150 мм достаточно 100 граммов) и добавляем туда кусочками смолу или вар. Делать это надо на самом легком огне во избежание закипания смолы, не говоря уже об опасности воспламенения; кипячение смолы еще и вредно, потому что оно придает ей хрупкость; кроме того, в смоле образуется много пузырьков, от которых потом трудно избавиться.

Тщательно размешав смолу с канифолью при помощи деревянной палочки, берем пробу из нескольких капель на кусочек стекла и даем охладиться; для ускорения застывания можно опустить стекло с накапанной смолой в воду комнатной температуры. Совершенно остывшая смола может быть тверда на ощупь, но сильное нажатие ногтя должно за некоторое время производить на ней заметную вмятину. Ориентировочно можно принять, что если ноготь большого пальца руки, всей своей тяжестью опирающейся на него, оставит на смоле заметную зарубку за полминуты, твердость смолы более или

менее подходит. Вообще же говоря, излишне твердая смола лучше, чем слишком мягкая.

К сожалению, дать более точные указания относительно определения твердости смолы мы здесь не беремся. В оптическом производстве при серийной работе, притом при очень постоянных условиях, имеются в запасе смолы различного состава, свойства которых проверены на опыте. Однако даже оптики-профессионалы иногда вынуждены пробовать смолу «на зуб» или какими-либо иными неточными способами; и далеко не всегда такие пробы позволяют предугадать поведение смолы при полировке.

Поэтому единственное, что можно посоветовать, — это испытать смолу в работе. Бояться неудачи на первых порах не надо: если нам и не удастся сразу подобрать смолу нужной твердости, то мы вскоре увидим из хода полировки, в чем состоит недостаток смолы, т. е. тверда она или мягка. Сделав новый полировальник из смолы с добавлением другого количества канифоли, мы почти наверное добьемся хороших результатов.

Так как в смоле и в канифоли бывают твердые частицы, могущие поцарапать стекло, сильно разогретую смолу надо процедить через сложенную в несколько раз марлю.

Обычный способ изготовления полировальника таков. Уложив шлифовальник горизонтально, наливают на него смолу, остуженную до густоты жидкой сметаны; лучше шлифовальник предварительно подогреть в теплой воде до 35—40° Ц, а затем насухо вытереть. Смолы должно быть столько, чтобы она покрыла шлифовальник слоем толщиной в 5—6 мм; не беда, если часть ее стечет с краев, надо лишь стараться, чтобы она распределилась равномерно. Лучше всего лить на середину, следя за равномерным растеканием; некоторая «горка» в средней части только полезна.

Не давая смоле затвердеть, на ней выдавливают описанным нами фасетником (см. рис. 25) канавки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, разбивающие поверхность на квадратики со стороной в 20—25 мм. Очень важно, чтобы сеть квадратиков была расположена а с и м м е т р и ч н о по отношению к краям; иначе, приходясь всегда на одну и ту же зону зеркала, квадратики могут при полировке произвести кольцеобразные неправильности — «зональные ошибки». Поэтому до выдавли-

вания канавок отмечают на смоляной поверхности центр (проще всего мокрой спичкой); для быстрого нахождения центра удобно воспользоваться равнобедренным деревянным треугольником, длина боковых сторон которого равна радиусу шлифовальника; два гвоздика, вбитых в углы при основании, прикладываются к краю будущего полировальника, тогда вершина треугольника укажет центр. Вместо спички центр можно отметить также

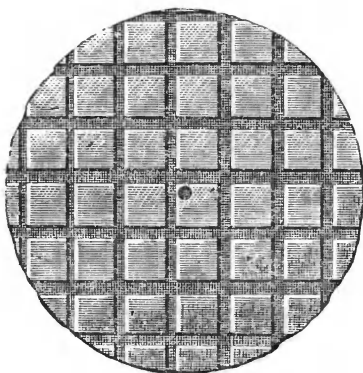


Рис. 37. Вид поверхности готового смоляного полировальника, разбитый сеткой канавок на квадратные фасетки. Центр полировальника (отмеченный точкой) приходится в углу одной из фасеток (по А. А. Чину; 1915).

гвоздиком (намочить, чтобы не прилип!), вбитым в вершину треугольника. Эта центральная метка должна прийти в углу одного из квадратиков, тогда будет выполнено условие асимметрии расположения сети квадратиков (рис. 37).

Чтобы фасетник не прилипал к смоле, его все время смачивают горячей водой. Смачивание водой вообще применяется всегда, когда желают избежать прилипания смолы; смола не липнет также и к рукам, если они смочены водой.

Выдавив канавки, мы должны придать поверхности

смолы выпуклость, соответствующую вогнутости поверхности зеркала. Для этого послужит само зеркало. Окунув зеркало в теплую воду, накладывают его на еще теплый полировальник и двигают по всем направлениям, постепенно надавливая все сильнее и сильнее. При этом смола будет мало-помалу принимать форму зеркала, приобретая выпуклость. Обычно бывает, что квадратики, на которые разбита поверхность полировальника, портятся, канавки между ними заплывают; поэтому в процессе формовки полировальника приходится подправлять канавки фасетником, подогревая полировальник в горячей воде, если смола успеет слишком затвердеть. Когда поверхность полировальника приняла выпуклую форму, соответствующую зеркалу, каждый квадратик (фасетка) оказывается в контакте с поверхностью зеркала, что легко было бы видно насквозь, если бы не ме-

шала ручка. Впрочем, сняв зеркало (разумеется, не прямо кверху, а сдвинув его вбок как при тонкой шлифовке), мы легко распознаем места, где еще нет контакта между полировальником и зеркалом. Эти места на поверхности смолы при рассмотрении несколько сбоку бросаются в глаза. Хорошо отформованный полировальник должен быть гладким до блеска, его фасетки — квадратными, а разделяющие их канавки должны быть прямыми и одинаковой глубины на всем протяжении. Хорошенько смазав зеркало крокусом, разведенным водой в жидкую кашицу (см. ниже), накладываем зеркало на полировальник, делаем несколько штрихов (чтобы выгнать пузыри воздуха, которые произвели бы в мягкой смоле ямки) и оставляем в центральном положении для остывания.

Описанный способ изготовления полировальника, кажущийся на первый взгляд простым, на деле довольно кропотлив и не всегда дается начинающему: периферические фасетки получаются от более сильного раздавливания шире центральных, поэтому при исправлении канавок последние не попадают на свои места и т. д. Можно рекомендовать другой способ, особенно пригодный для более значительных диаметров и при большей кривизне поверхности. Он состоит в следующем. На горизонтальную стеклянную пластинку несколько больших размеров, чем зеркало, покрытую мокрым пергаментом, наливается расплавленная смола слоем 5—6 мм. Затем на ней выдавливается фасетником сетка канавок, и после затвердевания смола осторожно снимается с пергамента и разламывается на квадратики. Эти квадратики раскладываются на подогретый шлифовальник, к которому они прилипают и размягчаются, а затем, как описано выше, полировальник отформовывается путем накладывания на него зеркала. Для того чтобы правильно разложить смоляные квадратики, под шлифовальник удобно положить бумажный круг, на котором начерчена сетка, притом таким образом, чтобы центр приходился в углу одного из квадратилов; пожалуй, еще удобнее наметить расположение квадратилов прямо на матовой поверхности шлифовальника простым карандашом. Чтобы смола надежнее прилипла, можно слегка смазать поверхность стекла скипидаром.

Смоляная поверхность полировальника разбивается на квадратики-фасетки для того, чтобы сделать возмож-

ным независимое изменение формы различных частей полировальника в силу текучести смолы; в то же время разделяющие фасетки канавки служат «ходами сообщения», по которым циркулирует при полировке крокус, взвешенный в воде, и в которые выходят пузыри воздуха, попадающие между зеркалом и смоляной поверхностью. Правильность канавок имеет поэтому важное значение, особенно их одинаковая глубина. Лучше, если канавки доходят до самого стекла; тогда, конечно, будет обеспечено последнее условие. Для этого надо по остывании полировальника снять зеркало и выровнять канавки при помощи лезвия для безопасной бритвы, понемногу состругивая смолу, пока канавки не дойдут до самого стекла: боковым сторонам канавки надо стараться придать наклон около 45° . Состругивать смолу надо осторожно, понемногу, иначе из-за ее хрупкости легко отломить сразу большой кусок квадратика. Всю лишнюю смолу, выходящую за края полировальника, надо осторожно состругать или обколоть ножом; при обкалывании слегка ударяют по ножу.

Готовый полировальник надо тщательно обмыть чистой водой комнатной температуры, чтобы удалить мелкие осколки смолы и могущие попасть на него твердые пылинки. Затем он устанавливается совершенно так же, как шлифовальник.

Теперь можно приступить к полировке.

Прежде всего подготовим крокус. Самое главное — удалить из него все крупные твердые частицы, могущие вызвать царапины. Царапины при полировке страшнее, чем при шлифовке, так как полировка снимает гораздо меньше стекла и, следовательно, удаление царапин требует слишком много времени, а может оказаться и вовсе невозможным. Поэтому крокус следует прежде всего подвергнуть отмучиванию. Для этого сначала тщательно разотрем его с водой в жидкую кашу, затем разведем большим количеством воды и дадим спокойно осесть; осторожно сцедив воду, оставим влажный крокус в той же посуде, чтобы для употребления брать его понемногу с самого верха. Гораздо надежнее каждую порцию крокуса еще и растирать с водой. Для этого надо сделать терочку из тонко матированного стеклянного кружка диаметром примерно 50 мм, пришлифованного к стеклу большего размера; кружок должен иметь хорошо обработанную фаску, во избежание выкрашивания стекла.

Такую терочку можно сделать за какой-нибудь час, про-шлифовав стеклянную пластинку 10—15-минутным наждаком с помощью упомянутого стеклянного кружочка. Шлифовать надо так же, как и при шлифовке зеркала, т. е. ходя вокруг и поворачивая кружочек. Если окажется, что взятое листовое стекло (лучше зеркальное) слишком неправильно (волнисто), то для ускорения дела можно начать шлифовку с № 200.

Взяв немного крокусной кашицы, разотрем ее на на-шей терке, как бы шлифуя; крокус вскоре примет ярко-вишневый цвет, а слышное вначале похрустывание скоро прекратится: это значит, что наши «враги» — твердые крупные зернышки — уничтожены.

Набрав на чистую акварельную кисточку влажного крокуса с терки, смажем им зеркало и, наложив на влажный полировальник, начнем полировать, делая совершенно такие же штрихи, как при тонкой шлифовке, и, разумеется, без всякого нажима.

Если поверхность зеркала далека от правильной сферы, то полирование на первых порах не пойдет гладко: зеркало будет то «цепляться» за полировальник, то «срываться». Конечно, при удачной шлифовке этого быть не должно, и после нескольких минут полирования зеркало начнет ходить довольно гладко, полировальник окрасится растертым и частично приставшим к нему крокусом, а канавки между фасетками наполнятся красной пеной, пузырьки которой будут бегать по ним во всех направлениях при движении зеркала. Время от времени надо добавлять немного воды или, смотря по надобности, растертого крокуса, разумеется, не снимая зеркала, а лишь сдвигая его вбок, как при тонкой шлифовке. Надо вообще заметить, что опасность от заноса твердых пылинок при полировке еще больше, чем при шлифовке; поэтому надо избегать, насколько возможно, снимать зеркало.

Через полчаса работы интересно все же снять зеркало и, обтерев чистой тряпочкой, осмотреть его поверхность; она должна уже начать блестеть, во всяком случае в центральной части. В этом состоянии уже можно было бы приступить к настоящему испытанию поверхности. Строго говоря, это даже желательно, если наперед нет уверенности в том, что полировальник сделан из смолы надлежащей твердости. Дело в том, что слишком мягкая и, следовательно, слишком текучая смола обладает

чрезвычайно неприятной особенностью споллировывать центральные части зеркала сильнее, чем периферические; кроме того, она еще производит и за вал на краю зеркала. Происходит это потому, что вследствие давления при боковом сдвиге зеркала периферические части полировальника «оседают» слишком быстро, из-за чего полировальник приобретает большую кривизну, чем зеркало, и центральные части полировальника приходят в более тесный контакт с центральными частями зеркала. Край же зеркала, идущий вперед при возвращении в центральное положение, как бы зарывается в слишком мягкую смолу, в силу чего с него споллировывается больше стекла, чем нужно. Еще раз напоминаем здесь то, что было сказано об «эффекте опрокидывания».

Если вовремя не обнаружить эти недостатки, они могут настолько усилиться, что их будет трудно устранить. Поэтому лучше начать испытание зеркала, как только его поверхность достаточно заблестит, тем более, что работающему, конечно, интересно как можно скорее увидеть плоды своего труда.

Итак, мы приступаем к исследованию зеркала по способу, описанному в следующем параграфе. Сняв зеркало для испытания (мы помним, что оно всегда для этого стягивается вбок), необходимо сейчас же накрыть полировальник опрокинутой миской или чем-либо иным для защиты от пыли; прикрывание предохраняет его также от быстрого высыхания.

Зеркало перед испытанием нет нужды мыть: вполне достаточно обтереть его ваткой или чистой тряпочкой и все время тщательно защищать от пыли.

Зеркалу нужно дать остынуть, т. е. принять температуру окружающего воздуха; оно при полировке немного нагревается от трения о полировальник. Период остывания называется «отстойкой».

Но вот испытание проведено, мы узнали, какова фигура зеркала, и надо ее исправлять продолжением полировки.

Возвращаясь к полировке, прерванной для испытания зеркала, надо смазать полировальник жидким крокусом, наложить зеркало на полировальник (предварительно тщательно обмахнув зеркало от могущей быть на нем пыли) и несколько минут не трогать, чтобы возможные соринки успели «утонуть» в смоле под давлением зеркала. Тогда можно смело приступать к продолжению

полировки, не боясь царапин. Эта предосторожность имеет еще и другое значение: полировальник, освобожденный от давления зеркала и быстро остывающий на воздухе (особенно в силу испарения воды), сильно деформируется за то время, пока мы исследуем зеркало. Если начать прямо двигать по нему зеркало, то отдельные возвышения, образовавшиеся на полировальнике, могут быстро прополировать в стекле углубления и даже поцарапать его.

Делая продолжительный перерыв, например, до следующего дня, надо обильно смазать полировальник крокусом и, сделав десяток — другой штрихов, оставить на нем зеркало в центральном положении. Во избежание высыхания полировальника следует обернуть его по краям мокрым полотенцем. На более продолжительный срок, по ряду понятных причин, зеркало оставлять на полировальнике не следует; лучше только не позволять полировальнику высыхать, защитив его, конечно, при этом от попадания пыли или иного загрязнения. Очень хорошо положить полировальник на дно таза с небольшим количеством воды, а сверху накрыть вторым опрокинутым тазом или большой тарелкой. Перед возобновлением полирования надо дать зеркалу некоторое время (не менее 15 минут) полежать на полировальнике без движения; это сгладит образовавшиеся на полировальнике мелкие неровности.

При соблюдении этих условий полировка должна идти хорошо, и после 10 часов работы поверхность зеркала может уже оказаться вполне отполированной, конечно, при условии, что тонкая шлифовка была доведена до конца. Совершенство полировки, как мы уже однажды указывали, имеет большое значение; недополированное зеркало будет давать много рассеянного света, и поэтому фон неба при наблюдении в телескоп будет светлее, чем следует, а изображение наблюдаемого объекта ослаблено.

Указанное время, потребное для доведения полировки до конца, пожалуй, минимальное. Для ускорения применяются различные приемы, позволяющие получить вполне отполированную поверхность за меньший срок. Однако следует иметь в виду, что чем скорее идет полировка, тем скорее может изменяться и форма поверхности, а, как читатель уже убедился на опыте, «наполировать» неправильности поверхности можно гораздо ско-

рее, чем устранить их потом. Поэтому, нам кажется, не стоит пытаться экономить на времени полировки, так как сэкономленный таким образом час может обойтись потом очень дорого. В конце концов вообще особенно спешить ни к чему, тем более начинающему, который многому научиться в ходе неторопливой работы.

Испытание на совершенство полировки делается очень просто. Взяв зеркало в руки, подносим его к яркой электрической лампочке и тщательно осматриваем поверхность вблизи от отражения раскаленной спирали лампочки. При этом остатки мата резко выделяются в виде светлых точек наподобие мельчайших пылинок. Еще более строгое испытание состоит в следующем: направляют при помощи короткофокусной собирающей линзы пучок яркого света от лампы на поверхность стекла; каждая пылинка и малейшие остатки мата ярко заблестят на относительно темном фоне отполированного стекла. Это испытание выдерживает далеко не каждое стекло, даже вышедшее из хорошей оптической мастерской.

Испытывать надо, конечно, всю поверхность зеркала, от центра и до самых краев; чаще матовость остается дольше всего близ края, что обычно указывает на существование завала.

Очень хорошее представление о качестве полировки получается от осмотра зеркала при прямом солнечном освещении; то же, впрочем, дает и достаточно яркая лампа, но непременно с большого расстояния. При таком осмотре обычно становятся хорошо заметны и царапины в виде ярко блестящих, как бы паутинных, иногда радужных, тончайших линий различной формы. Самые тонкие царапины, отливающие радужными цветами, не столь страшны, так как они не глубоки и потому довольно легко сполировываются, если, конечно, мы не наделаем новых царапин во время последующей полировки.

5. Испытание зеркала

Испытание поверхности зеркала основано на чрезвычайно простом принципе (рис. 38). Если поместить точечный источник света в центре кривизны S вогнутого сферического зеркала, то все лучи, падающие в данном случае перпендикулярно на отражающую поверхность,

отразятся обратно в центр кривизны, образовав там отражение источника света. Сдвинув источник света S немного в сторону от центра кривизны, например, вправо,

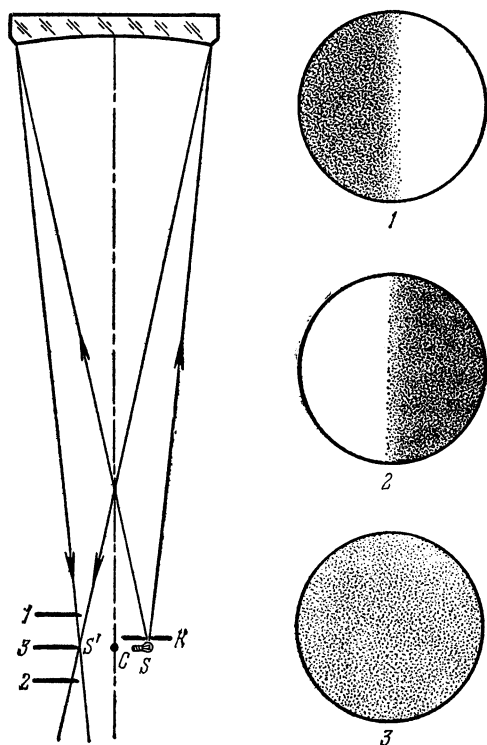


Рис. 38. Принцип теневого испытания сферического вогнутого зеркала из центра кривизны. Близ центра кривизны C помещается точечный источник света S ; все отраженные зеркалом лучи пересекаются в точке S' , образуя изображение источника света. Справа показан вид поверхности («теневая картина») зеркала при трех положениях экрана («ножа Фуко»), которым преграждается путь лучей к глазу наблюдателя: 1 — нож впереди точки пересечения лучей; 2 — нож позади точки пересечения лучей; 3 — нож как раз в месте пересечения лучей (кажущийся профиль сферической поверхности — «плоский» рельеф).

мы увидим рядом с ним, в данном случае слева, изображение источника света S' ; оно будет иметь натуральную величину и, разумеется, будет обратным. Держа там кусочек матового стекла, мы увидим на нем изображение источника света, если последний не слишком мал и достаточно ярок (маленькая электролампочка, пламя свечи).

Убрав матовое стекло, мы сможем увидеть изображение и непосредственно глазом, если поместимся должным образом, т. е. не менее чем на 25 см позади центра кривизны (25 см — расстояние, на котором нормальный глаз хорошо видит детали). Немного подвигав голову в разные стороны, мы без труда поймаем глазом опрокинутое изображение лампочки или свечи, как бы «висящее» в воздухе. Постепенно приближаясь к зеркалу, но не теряя из виду изображения, мы заметим, что последнее мало-помалу становится менее отчетливым, как бы расплываясь во все стороны. В известный момент мы вместо изображений увидим почти ровный свет, заполняющий весь круг зеркала. Произойдет это тогда, когда наш глаз окажется близ самого центра кривизны зеркала, где лучи пересекаются и образуемый ими конус настолько узок, что значительная часть его вмещается в зрачок глаза.

Поставим перед лампочкой непрозрачную заслонку *K* с маленьким круглым отверстием (см. рис. 38), поймаем глазом изображение освещенного отверстия, похожее на звездочку, и приблизим глаз настолько, чтобы весь конус лучей вошел в зрачок; мы увидим равномерно светящийся круг зеркала.

Будем теперь заслонять лучи, идущие от зеркала в глаз, с помощью лезвия от безопасной бритвы или какого-либо иного экрана с прямолинейным и острым краем. Допустим, что лезвие будет в положении 1 (см. рис. 38). Осторожно продвигая его вправо, в глубь конуса света, мы будем постепенно преграждать путь все большей и большей части световых лучей; в результате на светлом круге зеркала появится темный сегмент, как бы тень, надвигающаяся на него слева направо. Продвинув лезвие настолько, чтобы совсем загородить проход лучами, мы «погасим» все зеркало.

Поместим лезвие в положение 2, позади изображения светящегося отверстия, т. е. позади центра кривизны. При продвижении его по-прежнему слева направо мы также увидим тень, находящуюся на светящийся круг зеркала, но теперь эта тень будет двигаться не в ту же сторону, что и лезвие (т. е. слева направо), а навстречу ему — справа налево. Причина этого ясна: лезвие пересекает конус лучей уже после их пересечения, поэтому правая часть конуса образована лучами, отраженными левой стороной зеркала, а левая часть — лучами, отра-

женными правой его стороной. Станем приближать лезвие к точке пересечения лучей, т. е. к самому изображению светящегося отверстия, к положению 3. Вследствие малых, почти точечных размеров сечения этой части пучка лучей, где оба конуса — передний, сходящийся к наблюдателю, и задний, расходящийся к наблюдателю, — соединяются вершинами, достаточно будет одного «прикосновения» лезвия, чтобы зеркало сразу погасло; легкое, едва осязаемое продвижение лезвия уже загородит проход всем лучам, проходящим тут почти в одной точке. Но такой результат получится лишь в том случае, если поверхность зеркала достаточно близка к сфере. Совершенно иная картина будет, если различные части зеркала имеют различную кривизну. Один из таких самых обычных на практике случаев изображен на рис. 39.

Интересно, между прочим, воочию увидеть ход лучей, отраженных зеркалом. Для этого стоит лишь пустить немного дыма в пространство близ центра кривизны зеркала, т. е. около самой лампочки (в нашем случае слева от нее).

Пусть, как показано на рис. 39, центральная часть зеркала имеет большую кривизну (т. е. меньший радиус кривизны), чем периферия. В этом случае уже не получится одного изображения нашей светящейся «точки» в одном общем центре кривизны: центральная часть зеркала образует изображение ближе, периферия — дальше. Тут уже нельзя будет сразу заслонить все лучи, загородив им проход в одной общей точке пересечения. Поместив лезвие в положение 1, там, где центральная зона зеркала образует изображение точки *K*, мы, затемнив центр зеркала, потушим лишь левую половину периферической части зеркала. Передвинув нож в положение 2, где образует изображение внешняя зона зеркала, мы потушим равномерно периферию, но левая половина центральной зоны будет оставаться освещенной.

Если бы центральная область зеркала имела меньшую кривизну, чем периферическая, т. е. если бы ее центр кривизны лежал дальше от поверхности зеркала (рис. 40), то картина получилась бы обратная: при положении ножа 1 гасла бы периферия зеркала, а центральная область оставалась бы освещенной справа; в положении 2 периферия была бы освещена слева, а центр погас бы весь сразу.

Рассматривая эти «тени», появляющиеся на зеркале при загоразивании конуса лучей на различных расстояниях от зеркала, нетрудно заметить, что они располагаются так, как если бы поверхность зеркала имела некоторый грубый рельеф и была освещена косыми лучами, идущими навстречу движению нашего лезвия.

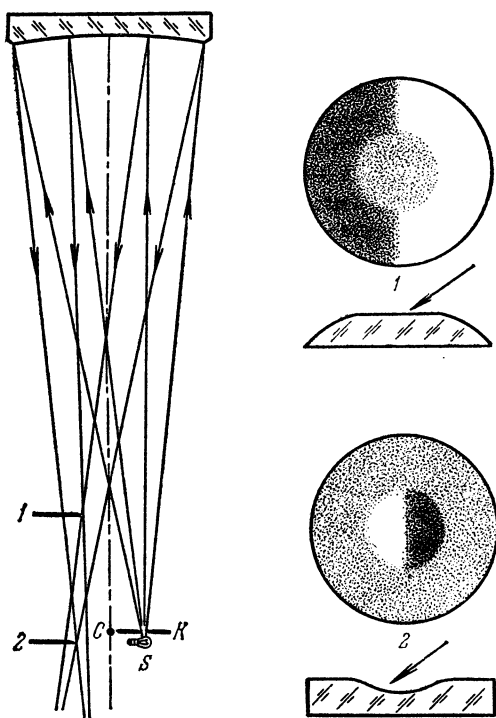


Рис. 39. Вид теневой картины, даваемой вогнутым зеркалом, у которого кривизна центральной части больше чем на периферии: слева — ход лучей и положения ножа 1 и 2; справа — соответственные теневые картины; сверху — кажущийся профиль поверхности при положении ножа 1 («горка» с усеченной плоской вершиной), внизу — кажущийся рельеф поверхности, видимый при положении ножа 2 как углубление, освещенное косыми лучами, падающими в направлении, противоположном движению заслоняющего ножа (показано стрелкой).

Этот кажущийся рельеф до некоторой степени сходен с сильно преувеличенным действительным рельефом поверхности зеркала по отношению к поверхности правильной сферы. Точная же сфера при испытании кажется плоской (см. рис. 38).

В самом деле, область большей кривизны, т. е. углубление в центре зеркала (см. рис. 39), была освещена в своей левой части, а в правой — затемнена; но именно так и выглядит углубление, освещенное косыми лучами, падающими справа. Центральная часть зеркала,

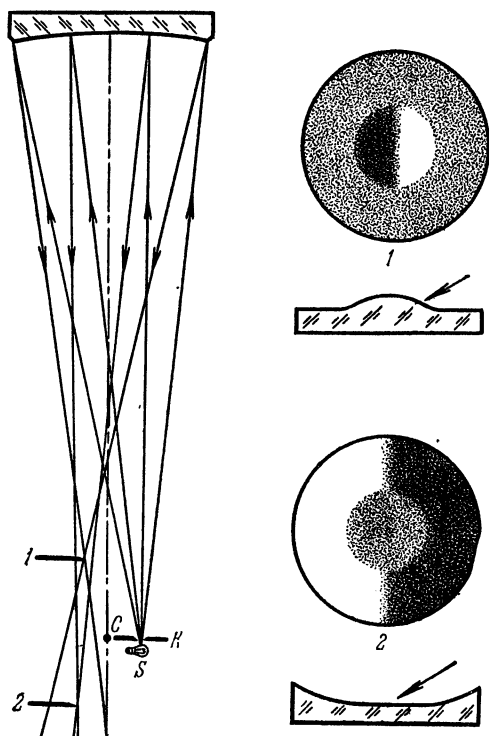


Рис. 40. Вид теневой картины, даваемой вогнутым зеркалом, обладающим меньшей кривизной центральной части по сравнению с периферией. Вверху справа показан кажущийся профиль поверхности при положении ножа 1, внизу — то же при положении 2.

обладающая меньшей кривизной, чем периферия (см. рис. 40), оказывается освещенной справа и темной слева, т. е. выглядит как возвышение, опять-таки освещенное косым светом, идущим справа.

Плоской, не имеющей рельефа, кажется при этом испытании лишь точно сферическая поверхность, одновременно погасающая во всех своих точках, если лезвие помещено в ее центре кривизны. Всякое место зеркала

с меньшей кривизной кажется при испытании возвышением; места с большей кривизной выглядят как углубления.

Мы рассмотрели наиболее простые примеры. На практике встречаются гораздо более сложные случаи, когда

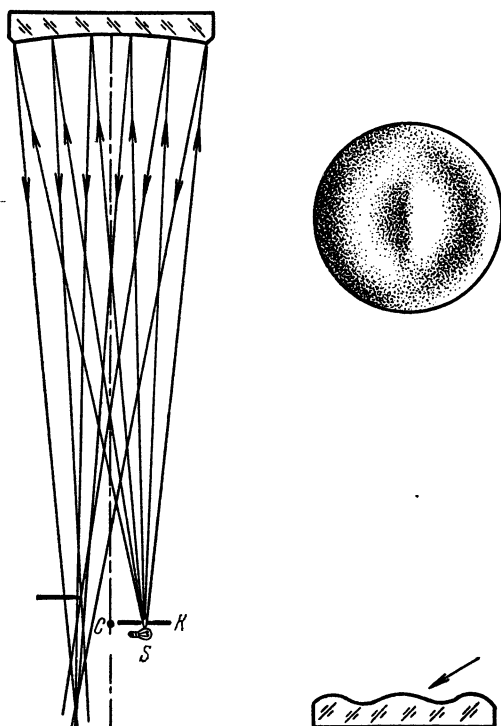


Рис. 41. Теневая картина вогнутого зеркала с завалом по краю и меньшей кривизной центральной части по сравнению с наружными частями. Внизу — кажущийся профиль поверхности. Ср. с рис. 39, 40.

поверхность зеркала состоит из ряда зон, различающихся по своей кривизне, и напоминает нечто вроде лунного кратера. Вид теней, возникающих на таком зеркале при испытании, показан на рис. 41.

Надо здесь заметить, что вначале на поверхности зеркала при теневом испытании часто открываются многочисленные неровности, делающие его волнистым или «рябым». Они вызываются неправильной полировкой, например, слишком быстрыми и резкими движениями,

а также и чересчур мягкой смолой. Обычно, когда работающий приобретает некоторый опыт, эти недостатки исчезают, и поверхность зеркала при испытании выглядит уже гладкой.

Необходимо обратить внимание читателя на то, что кажущийся рельеф поверхности зеркала виден лишь в том случае, когда нож помещается достаточно близко к точке пересечения лучей. Легко убедиться в том, что по мере удаления ножа от этой точки (безразлично, вперед или назад) видимый рельеф становится все менее отчетливым, пока, наконец, не останется лишь гладкая тень с прямым краем, которую неопытный мастер может принять за теневую картину точной сферы. Если отклонение формы поверхности от точной сферы невелико, то рельеф можно заметить лишь при очень небольших расстояниях ножа от точек пересечения лучей (порядка нескольких миллиметров); нужны очень большие неправильности поверхности, чтобы они сказывались на теневой картине при значительном удалении ножа от пересечения лучей. Небольшое упражнение позволит быстро усвоить эту простую истину.

Другое важное обстоятельство, которое необходимо иметь в виду с самого начала, состоит в следующем. Внимательно рассматривая теневую картину, мы замечаем, что видимые на зеркале круговые контуры теней не резки, а размыты, и образуют как бы «полутень», отделяющую освещенные части от темных. Эта полутень возникает там, где нож оказывается как раз в плоскости пересечения лучей, или, иначе говоря, в фокусе определенной кольцевой части зеркала, в котором для данной зоны образуется изображение маленького источника света. Ясно, что если бы это изображение было математической точкой, то нож одним своим прикосновением сразу преграждал бы проход всем лучам и, следовательно, границы теней были бы совершенно резки *). Но на деле изображение источника света имеет некоторые заметные размеры (несколько сотых долей миллиметра), вследствие чего нож может закрывать его частично, производя на зеркале *полутень*. Если зеркало имеет точно сферическую форму, то, помещая нож в плоскости

*) Точнее, на резкость границы света и тени влияла бы только дифракция света, создающая тоже размытость, хотя и гораздо меньшую.

центра кривизны и осторожно передвигая его вправо и влево, мы после некоторого упражнения заметим, что «погасание» зеркала происходит не мгновенно (как может показаться при первом взгляде), а постепенно: при некотором положении ножа вся поверхность зеркала покрывается ровной полутенью. Если же поверхность зеркала имеет неодинаковую кривизну в различных зонах, то полутень будет иметь форму кольца, располагающегося на границе между совершенно темными и совсем светлыми областями, лучи от которых нацело загораживаются ножом либо совершенно минуют его. Сказанное понятно из рис. 39 и 40.

Таким образом, полутень указывает те части поверхности зеркала, к фокусу которых нож ближе всего. Это нам особенно важно будет усвоить в дальнейшем при работе над параболическим зеркалом.

Объясненный только что способ испытания носит название теневого испытания; его часто называют именем французского физика Фуко, который изобрел этот общепринятый теперь метод более 100 лет назад. Подвижный экран (в нашем случае лезвие безопасной бритвы), которым заслоняют при испытании отраженные зеркалом лучи, у оптиков часто называется «ножом Фуко».

Познакомившись с основами теневого испытания, читатель, вероятно, припомнит, что при определении кривизны поверхности зеркала «мокрым способом» он замечал некоторое подобие этой «теневого картины». Действительно, поскольку край зрачка глаза до некоторой степени действует подобно ножу Фуко, заслоняя отражающиеся от зеркала лучи, то даже при всей примитивности «мокрого способа» можно с его помощью составить себе довольно верное предварительное представление о характере поверхности будущего зеркала, особенно на конечных стадиях тонкой шлифовки, когда поверхность станет совершенно гладкой.

Для испытания тeneвым способом необходимо некоторое приспособление, позволяющее удобно передвигать и «нож Фуко» и точечный источник света, обеспечивая в то же время их устойчивость. Устройство этого приспособления может быть самое различное в зависимости от обстоятельств. Опишем самый простой вариант. Маленькая электрическая лампочка помещается в жестяном футляре («домике»), как раз против вырезанного в нем

небольшого окошечка. Это окошечко может закрываться заслонкой с матовым стеклом и пазиками для вкладывания маленького экранчика с проделанным в нем отверстием, служащим «светящейся точкой».

Об изготовлении этого отверстия надо сказать особо. Оно должно быть насколько возможно малю и правильно. Проще всего сделать его очень тонкой и острой иглой в станиоле (металлическая фольга, в которую, например, завертывают шоколад). Достаточно малое отверстие (0,05—0,1 мм) получается, если проколоть иглой станиоль, положенный на металлическую подложку. Чтобы не повредить такого станиолевого экранчика, его надо наклеить на кусочек плотного картона с отверстием, против которого придется дырочка, проколота в станиоле.

Ножом Фуко нам послужит по-прежнему лезвие от безопасной бритвы, вставленное в расщеп пробки, в котором можно его наклонять для «регулировки». Пробка

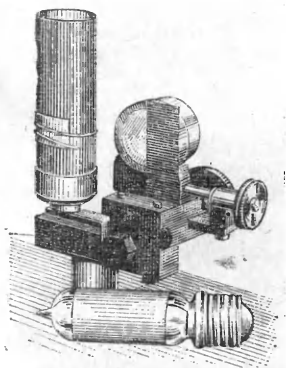


Рис. 42. Устройство приспособления для теневого испытания с помощью электрической лампочки.

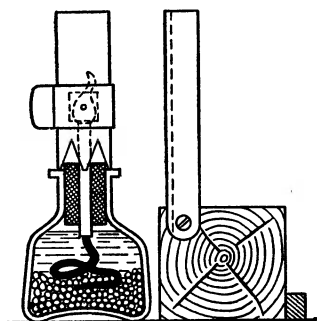


Рис. 43. Простейшее приспособление для теневого испытания с помощью керосиновой лампочки. Справа показан нож Фуко, прикрепленный к деревянному брусу (по Д. Д. Максудову, 1948).

в свою очередь укрепляется на плотном, гладко обструганном бруске, легко скользящем по хорошей доске. И нож и «домик» с лампочкой должны быть так построены к своим подпоркам, чтобы их можно было поднимать и опускать. При таком устройстве можно достаточно удобно расположить все части приспособления, как потребуется. На рис. 42 показано более сложное устройство для испытания тенью способом.

Если электрического освещения нет, то можно воспользоваться лампочкой от карманного фонарика с батарейкой. За неимением этого придется обойтись керосиновой лампой; нужно только достать самую маленькую горелку, вроде тех, которые употребляются для ночников. Приспособление с керосиновой горелкой для теневого испытания показано на рис. 43.

Зеркало для испытания помещается вертикально. Как мы уже говорили, удобнее всего, если позволяют условия, повесить его на стену с помощью тесьмы.

Нож Фуко и источник света мы расположим на столе перед зеркалом; в случае нашего 150-мм зеркала с фокусным расстоянием около 130 см нужное расстояние составит около 2,6 м.

Включив лампочку и затемнив комнату, прежде всего поймаем глазом отражение светлого окошечка в зеркале. Наш глаз должен расположиться недалеко от прямой, соединяющей центр зеркала с освещенным окошечком. При некотором упражнении мы скоро научимся отыскивать изображение освещенного окошечка без труда. Обычно изображение оказывается где-нибудь неподалеку от лампочки. Передвигая лампочку вверх, вниз или в стороны, а в случае нужды наклоняя зеркало, добиваемся того, чтобы изображение окошечка оказалось как можно ближе к самому окошечку и на одинаковом расстоянии с ним от зеркала; в этом мы убедимся, наведя изображение на кусочек матового стекла. Если изображение окажется ближе к зеркалу, чем лампочка, то последнюю придется, конечно, придвинуть к зеркалу, и наоборот.

Теперь все наше расположение соответствует схеме, представленной на рис. 38.

Устанавливаем нож Фуко рядом с изображением светлого окошечка и вставляем в последнее экранчик с отверстием. Глядя на зеркало (опять-таки поместившись на достаточном расстоянии позади изображения) между краем ножа и «домиком» с лампочкой, мы легко поймем глазом крошечную яркую точку — изображение освещенного отверстия, — так называемой «искусственной звезды». Будем приближать глаз к изображению, которое станет при этом расплываться в кружок, постепенно расширяющийся во все зеркало. Теперь наш зрачок настолько близок к центру кривизны зеркала, где пересекается отраженные зеркалом лучи, что весь конус

лучей вошел в него. Осторожно подвинем нож вправо, пока он не коснется конуса лучей; если при этом тень начнет надвигаться на правую сторону светлого круга зеркала (навстречу движению ножа), то нож находится позади центра кривизны, если на левую (в том же направлении, что и нож), то он впереди центра кривизны (т. е. между центром кривизны и поверхностью зеркала). Поупражняемся немного в наблюдении, двигая нож поперек оптической оси и следя за движением тени по зеркалу. Затем, двигая нож вдоль оптической оси, постараемся «нащупать» самый центр кривизны. Если нам удастся найти такое положение, при котором все зеркало темнеет одновременно, это значит, что поверхность зеркала близка к сфере. Гораздо чаще, однако, обнаруживается какая-нибудь рельефная теневая картина, вроде тех, с которыми мы недавно уже познакомились (см. рис. 39—41).

Огорчаться этим не следует, скорее даже наоборот, это к лучшему: случайная первая удача лишит нас упражнения в «чтении» теневых картин. А «понять истинную фигуру зеркала значит сделать очень хорошее зеркало», как совершенно правильно указывал еще 50 лет назад А. А. Чикин.

После нескольких опытов мы уже научимся разбираться в форме поверхности, достаточно для того, чтобы судить о ходе полировки. Дальнейшее упражнение позволит нам уловить тонкости, поможет нам открыть те небольшие отклонения от правильной формы, которые необходимо устранить на последних стадиях полировки.

Теперь несколько слов о необходимой точности.

Широко распространено представление, что от оптических изделий требуется большая точность. Но немногие конкретно представляют себе, насколько эта точность должна быть высока. Теория, в которую мы, разумеется, здесь входить не можем, показывает, что «ошибка» поверхности астрономического зеркала (т. е. ее отклонение от математически точной поверхности, в нашем случае от сферы) не должна превосходить $\frac{1}{8}$ длины волны света, иначе она повредит отчетливости изображения, даваемого телескопом.

Произведем простой расчет для желто-зеленых лучей, к которым наш глаз наиболее чувствителен. Длина волны этих лучей равна примерно 0,00055 мм. Таким образом, наибольшая допустимая ошибка составит около

0,00007 мм, или 0,07 микрона (1 микрон = 0,001 мм). Если принять во внимание, что наименьшая величина, доступная сильнейшему микроскопу, составляет 0,2 микрона, т. е. почти втрое больше, чем только что указанная, то можно оценить по достоинству, что такое оптическая точность!

Нам, следовательно, предстоит иметь дело с величинами, в полном смысле слова невидимыми даже для глаза, вооруженного самым сильным микроскопом. Но насколько такие крохотные дефекты оптических поверхностей недоступны непосредственно зрению, настолько же они дают себя знать, когда мы пользуемся этими поверхностями в оптическом приборе, например, в телескопе. Задача мастера-оптика состоит в том, чтобы овладеть возможностью обнаруживать ошибки поверхности с целью их уничтожения в процессе обработки. Теневой метод, как мы уже видели, наилучшим образом дает такую возможность. Однако он только в том случае может быть полезен, если с его помощью можно обнаружить ошибки порядка $\frac{1}{8}$ длины волны света и ниже. Для этого нужно правильно им пользоваться.

Основным условием успеха является достаточно яркое освещение. Если при наличии электролампочки это условие легко выполнимо, то при пользовании керосиновой лампой возникает уже нехватка света. Тут приходится на помощь остроумное усовершенствование теневого метода, введенное проф. Д. Д. Максutowым. Оно состоит в замене круглого отверстия («искусственной звезды») узкой щелью, пропускающей несравненно больше света, чем круглое отверстие равной ширины (примерно во столько раз больше, во сколько длина щели больше ее ширины). К сожалению, изготовление щели может оказаться для любителя затруднительным. Проще всего изготовить хорошую щель из посеребренного тонкого стеклышка («покровное стекло» для микроскопических препаратов). Проведя лезвием бритвы по серебряному слою, удастся сделать очень аккуратную щель шириной в 0,03—0,04 мм.

Само собой разумеется, что щель должна быть установлена параллельно ножу; это нетрудно сделать, подведя ее изображение, отброшенное зеркалом, к самому краю ножа; нагибая нож в нужную сторону, можно добиться точной параллельности (полезно при этом смотреть в сильную лупу). Несколько труднее, конечно, до-

стигнуть параллельности в другом направлении, т. е., в направлении оптической оси. Эти трудности устраняются сами собой, если нож соединен со щелью; тогда его можно раз и навсегда установить параллельно щели. Так обычно и делают в более совершенных приборах для теневого испытания.

Вторым условием является устойчивость всего приспособления для испытания. Когда нож находится близ фокуса, то малейшее его передвижение в стороны (перпендикулярно к оптической оси) резко изменяет всю картину: как мы скоро убедимся на опыте, наилучшее положение края ножа — как раз на оси пучка лучей. При малых поперечниках дырочки или щели сказываются передвижения порядка десятых и даже сотых долей миллиметра. Достигнуть такой точности при наших примитивных средствах нелегко. Но если стол шаток или пол трясется, то задача становится вовсе невыполнимой. Нож все время изменяет свое положение относительно пучка лучей, теневая картина то вспыхивает, то гаснет, тени пробегают по зеркалу слева направо и справа налево. Громадной помехой является также тряска, производимая трамваями и автомобилями, проезжающими по улице. Нередко поэтому оказывается возможным работать только по ночам, когда езда прекращается.

Третье условие — однородная температура в рабочем помещении. Токи теплого и холодного воздуха (которые простой глаз заметить не может), например, идущие от окна к нагретой печке и обратно, составляют величайшую помеху для теневого испытания. Эти токи резко заметны при теневом испытании, напоминая то облака, клубящиеся между наблюдателем и освещенным зеркалом, то струящуюся воду. Тепло человеческого тела также производит токи воздуха, отчетливо заметные при наблюдении теневой картины. Если положить руку на стол перед зеркалом на пути лучей, то можно видеть поднимающиеся вверх струйки, вроде тех, которые видны в жаркий день над разогретой солнцем землей. Такие воздушные помехи подчас совершенно скрывают теневую картину на зеркале. Любителю, работающему в домашних условиях, бороться с ними можно только одним способом: устроить картонную или фанерную трубу, в одном конце которой устанавливать испытываемое зеркало, а у другого конца помещаться самому с теневым приспособлением. Автор устраивал также

трубу из реек, навешивая на них одеяла, чем создавалась внутри очень однородная температура воздуха.

Эти воздушные токи при испытании зеркала досаждают не меньше, чем при наблюдении в телескоп. На оптическом производстве в рабочих помещениях (особенно в предназначенных для теневых испытаний) обеспечивается однородная и постоянная температура; для этого их устраивают в подвале без окон. Подвальное помещение выгодно еще и потому, что в нем может быть сведена до минимума тряска. Любитель, в распоряжении которого имеется хороший сухой подвал, сделает лучше всего, устроив там свою оптическую мастерскую.

Очень важно наладить все так, чтобы работать было удобно. Напряженное положение тела в случае, если источник света и нож Фуко расположены слишком высоко или, наоборот, слишком низко, вызывает быстрое утомление и делает невозможным точное наблюдение теневой картины. При обычной высоте рабочего стола нельзя, конечно, сидеть на стуле, а необходимо пользоваться скамеечкой такой высоты, чтобы подбородок приходился почти на уровне стола: иначе пришлось бы делать слишком высокие стойки для теневого прибора, что повредило бы его устойчивости.

Надо стараться глядеть свободно, не щурясь и не напрягая зрения, по возможности так, как смотрят на далекий предмет; ни в коем случае нельзя, конечно, пытаться «рассматривать» край ножа, находящийся около самого глаза, это вызовет только напрасное напряжение. Надо свободно глядеть на зеркало, совершенно не думая о ноже, так как глядят в окуляр зрительной трубы, не видя его оправы. Очень хорошо с самого начала приучать себя к тому, чтобы, глядя на теневую картину одним глазом, не зажмуривать другой глаз. После некоторого упражнения работающий, изучая теневую картину правым глазом, перестает вовсе замечать, что его левый глаз открыт. Опытные микроскописты и астрономы, наблюдая, никогда не зажмуривают свободный глаз, но это не только не мешает их работе, а наоборот, предохраняет от напрасного напряжения.

Если нам удастся обеспечить достаточно яркое освещение, добиться устойчивости и избавиться от воздушных помех, мы можем быть уверены в успехе. Всякое изменение поверхности зеркала будет нами сейчас же замечено, и мы сможем сознательно вести полировку для

исправления дефекта. Тут надо, однако, обратить внимание еще на одно важное обстоятельство.

Мы уже упоминали, что при полировке развивается тепло от трения стекла о полировальныйник, притом тепло очень значительное. Так как нагревание вызывает расширение стекла, то зеркало изменяет свою форму, именно, кривизна его поверхности становится меньше, т. е. радиус его кривизны увеличивается. Происходит это, понятно, от расширения лицевой, трущейся поверхности: задняя, верхняя сторона зеркала остается при полировке относительно холодной. Но этого мало; если отдельные места зеркала почему-либо трутся сильнее других, то они и сильнее нагреваются, а значит, и сильнее расширяются, образуя возвышения; от этого трение о полировальныйник еще усиливается (на единицу поверхности приходится большее давление), сполировывание стекла идет энергичнее и на этих местах могут получиться на зеркале углубления. Вот еще почему следует делать перерывы при работе, давая зеркалу остыть, а теплу распространиться равномерно по всей его толще.

Насколько сильно стекло меняет свою форму при изменении температуры, можно легко убедиться с помощью простого опыта. Если при теновом испытании приложить на 10—15 секунд палец к лицевой поверхности зеркала, то, отняв палец, мы увидим на теновой картине в том месте, где палец прикасался к стеклу, возвышение, настоящую горку. Наблюдая за ней мы вскоре заметим, что она становится ниже, как бы растекаясь по поверхности. Это — видимое воочию сжатие стекла до прежнего объема в силу отдачи тепла воздуху и остальной, главной массе зеркала. Это интересное наблюдение позволяет нам попутно судить о чувствительности тенового испытания: ведь высота «горки», образовавшейся от тепла пальца, конечно, крайне мала. Чтобы представить себе величину этого возвышения, достаточно вспомнить, что коэффициент температурного расширения обычного стекла составляет всего 0,000008!

В результате неравномерного разогревания стекла при полировке форма зеркала в начале испытания (т. е. немедленно после прекращения полировки) бывает всегда иной, чем через некоторое время, в течение которого оно успеет охладиться и принять равномерную температуру. Этот процесс изменения формы поверхности при остывании зеркала, снятого с полировального, назы-

вается на языке оптиков отстойкой. Очень часто только что снятое с полировальника зеркало обнаруживает большую кривизну центральных частей по сравнению с краевыми зонами; по мере отстойки разница в кривизне поверхности на наших глазах сглаживается и зеркало может стать вполне сферическим — всякий теневой рельеф исчезнет. Поэтому не следует торопиться с заключением о форме поверхности зеркала; надо сначала убедиться в том, что теневая картина перестала изменяться в ходе отстойки и что зеркало, следовательно, приняло равномерную температуру. При малых размерах зеркала это займет немного времени, но, во всяком случае, не менее 15 минут. Большие же зеркала, весящие десятки и сотни килограммов, отстаиваются целыми часами. Здесь особенно дает себя чувствовать сорт стекла: если сравнить обычное стекло с пирексом, температурный коэффициент которого в 2,5 раза меньше, то мы увидим разницу — поверхность зеркала, изготовленного из пирекса, может и не обнаружить после отстойки заметных изменений, если испытание не очень чувствительно.

6. Фигуризация

Мы уже определили понятие фигуризации или, как теперь часто говорят, ретуши зеркала. Производится она полировкой, а цель ее — в придании поверхности зеркала возможно более точной, нужной нам фигуры.

Естественно, что полировка чередуется с испытанием зеркала теневым методом, установлением погрешностей и продолжением полировки для их устранения.

В процессе фигуризации мы сталкиваемся с рядом важных свойств смолы, из которой изготовлен полировальник.

Если после двух-трех часов полировки окажется, что зеркало приобретает все более правильную сферическую форму, мы можем смело поздравить себя с близким успехом. Если испытание будет показывать упорно держащееся чрезмерное «углубление» в центральной части зеркала или, что еще хуже, мы заметим, что это углубление усиливается, значит, процесс полировки идет не так, как нужно.

Очень распространенной причиной такого недостатка является то, что смола, из которой сделан полировальник, слишком мягка. Вообще говоря, для получения сфе-

рической поверхности выгоднее пользоваться более твердой смолой. Мягкая смола благодаря своей текучести очень легко изменяет форму поверхности даже при одном передвижении зеркала (за один штрих). Поэтому если зеркало имеет неодинаковую кривизну в различных частях, то поверхность полировальника, сделанного из очень мягкой смолы, будет при каждом штрихе как бы «приспосабливаться» к поверхности зеркала, оставаясь с ней в постоянном контакте. Еще важнее, пожалуй, то, что мягкая смола очень легко разжижается и перестает работать в местах наиболее сильного контакта со стеклом, т. е. именно там, где нужно споллировывание.

Другое дело, если полировальник сделан из более твердой, менее текучей смолы. Не успевая деформироваться при одном штрихе, такой более устойчивый полировальник будет споллировывать лишь «вызвышения», т. е. те части зеркала, которые и подлежат снятию. Форма поверхности будет изменяться так же, как и при шлифовке, т. е. зеркало автоматически (конечно, при правильной длине штриха) приобретет одинаковую кривизну во всех своих частях, т. е. станет сферическим.

Слишком мягкая смола имеет в высшей степени вредное свойство не только поддерживать существование различий в кривизне центральных и краевых частей зеркала, но вызывать и усиливать такие различия. Причину этого понять нетрудно. Хотя смола и не «сошлифовывается» при полировке, но на поверхности полировальника давление и трение распределяются совершенно так же, как при шлифовке на поверхности шлифовальника. Чем ближе к краю полировальника, тем давление сильнее, чем ближе к центру, тем оно слабее. В силу текучести смолы поверхность полировальника оседает, но оседает она тем сильнее, чем сильнее на нее давит зеркало. Значит, полировальник будет сильнее оседать ближе к краю. Иными словами, он может приобрести неравномерную кривизну, его крайние части начнут отставать от зеркала, в то время как центральные части будут оставаться в плотном контакте с последним, продолжая споллировывать стекло. В результате зеркало приобретет большую кривизну в центральных частях, чем в периферических.

К сказанному надо еще добавить, что смола очень сильно размягчается от нагревания, вызываемого трением при полировке (в этом отношении гудрон и камен-

ноугольная смола лучше древесной смолы, так как их твердость меньше меняется при изменении температуры). Поэтому один и тот же полировальник может действовать на форму поверхности по-разному в начале работы и после длительной полировки; отсюда — необходимость «отдыха», т. е. перерывов в полировке. Большое значение имеет и скорость движения зеркала: чем быстрее движение, тем сильнее разогревается полировальник. Наконец, надо иметь в виду, что зеркало движется не только по прямой, но и вращается относительно полировальника, причем линейная скорость этого вращательного движения, разумеется, увеличивается по направлению от центра к краям. Поэтому края должны разогреваться сильнее середины.

В силу этих свойств полировальника у начинающих часто случается, что поверхность зеркала, оказавшаяся близкой к сфере в начале полировки, все больше и больше «портится» по мере того, как полировка продвигается и зеркало приобретает красивый блеск. Надо поэтому очень пристально следить за формой поверхности, прерывая полировку каждые 15—20 минут и подвергая зеркало испытанию. Если окажется, что неправильности поверхности не уменьшаются (а тем более, если они усиливаются), необходимо тотчас же принимать меры. Эти меры прежде всего состоят в укорочении штриха, в замедлении движений, в формовке и в подрезке полировальника. Если все эти меры не помогут, то причина, несомненно, в чрезмерной мягкости смолы. Придется, следовательно, очистить с полировальника старую смолу и сделать новый полировальник из более твердой смолы, т. е. с добавкой большего количества канифоли.

Если, полируя зеркало нормальными штрихами ($\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ радиуса зеркала в каждую сторону) и каждые полчаса проверяя его теневым методом, мы замечаем, что отклонения от сферы упорно держатся, не уменьшаясь, или даже увеличиваются, необходимо принять особые меры.

Как уже указывалось, причина может заключаться в чрезмерной мягкости смолы; надо думать, впрочем, что на данной стадии работы мы уже выяснили этот вопрос и, если оказалось нужным, заменили смолу более твердой. Если тем не менее середина зеркала продолжает оставаться углубленной больше, чем периферия, то надо попробовать укоротить штрих, сдвигая зеркало

всего на 1—1,5 см в каждую сторону. Этот часто встречающийся недостаток отличается большим упорством и, если можно так выразиться, инерцией. Раз появившись, он имеет тенденцию усиливаться, хотя, казалось бы, все делается, как надо. Тут и нет ничего удивительного. Надо думать, что наличие большей кривизны в центральной части придает и полировальнику чрезмерную выпуклость в центральной части, в то время как краевые его зоны становятся более плоскими. Поэтому углубление в центральной зоне зеркала продолжает все увеличиваться, центральная зона никак не может «оторваться» от полировальника, непрерывно сполIROвывающего стекло, но благодаря своей текучести все время остающегося с ним в контакте.

Если продолжительное полирование укороченными штрихами не помогает, то надо соответственным образом изменить поверхность полировальника. Здесь возможны два способа: формовка и так называемая «подрезка» полировальника.

Формовка состоит в том, что на центральной части полировальника выдавливается легкое углубление в виде звезды (такая формовка делается для того, чтобы действие углубления сходило плавно на нет по направлению к периферии). Вырежем из плотной бумаги (лучше из вощанки или пергамента) звезду такого размера, чтобы она покрыла среднюю часть полировальника, поперечником около $\frac{1}{3}$ его диаметра и, намочив водой, аккуратно уложим на середину полировальника, предварительно слегка подогретого в теплой воде (рис. 44). Наложив сверху наше зеркало, оставим его полежать 20—30 минут, после чего на полировальнике выдавится легкое углубление в форме нашей бумажной звезды. Возобновив теперь полировку, мы, разумеется, станем углублять периферические зоны зеркала, тогда как центральная часть его остается на время в неприкосновенности, так как не будет вовсе прикасаться к полировальнику. Иногда при этом изменение формы поверхности идет так быстро, что не успеем мы опомниться, как



Рис. 44. Вырезанная из бумаги звезда, наложенная на полировальник для выдавливания на нем углубления в средней части (один из видов «формовки»).

его центральная часть окажется не углубленной, а, наоборот, приобретет меньшую кривизну по сравнению с периферией. Поэтому надо внимательно следить за ходом полировки, чтобы вовремя вернуться к нормальному режиму. Для этого слегка подогреем опять полировальный и, наложив на него зеркало, дадим полежать; в результате поверхности опять придут в контакт на всем протяжении и полировка нормальными штрихами может скоро привести к совершенно «гладкой» сфере.

Подрезка в наиболее простом случае состоит в сцарапывании или соскабливании определенных участков полировальника с целью уменьшения поверхности их соприкосновения с зеркалом (рис. 45). Царапины или надрезы на смоле способствуют, кроме того, понижению поверхности прилегающих к ним участков полировальника

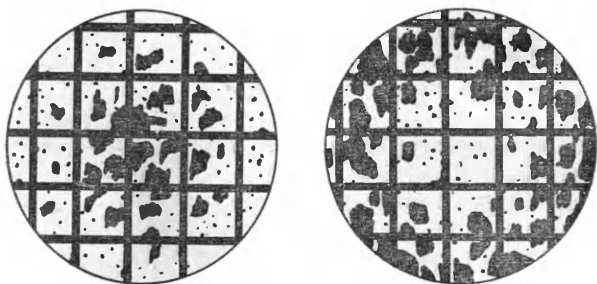


Рис. 45. Два примера подрезки полировальника посредством соскабливания части поверхности: слева — для увеличения кривизны центральных частей зеркала; справа — для увеличения кривизны периферии (соскобленные части показаны черным) (по Д. Д. Максутову; 1948).

в силу того, что смола стекает в эти углубления. Подрезка, как правило, оказывает сильное действие; как только достигнут нужный результат (лучше даже немного раньше, учитывая отмеченную выше «инерцию» полировки), нужно вернуть полировальнику нормальную форму поверхности, снова слегка подогрев его и отформовав зеркалом до сглаживания сцарапанных или соскобленных мест.

Все изложенное на предыдущих страницах может показаться очень сложным. Однако на деле читатель убедится, что трудности вовсе не так велики; нет сомнения, что описание многих простых вещей, гораздо более простых, чем изготовление астрономического зеркала, тоже показалось бы громоздким.

Рано или поздно, после трудов и волнений, быть может, даже и после временных разочарований, мы достигнем желаемого: наше зеркало при теновом испытании не обнаружит больше сколько-нибудь заметных неправильностей. Если с испытанием у нас все в порядке, мы можем быть уверены, что поверхность зеркала в высокой степени близка к сфере. Нужно ли добиваться такой высокой степени точности? На этот вопрос правильнее всего ответить так: не нужно, но лишь в том случае, если мы в силах измерить или хотя бы примерно оценить оставшиеся отклонения от точной сферической формы. К сожалению, такая оценка не слишком проста и требует, пожалуй, не меньшего умения, чем изготовление параболического зеркала, от которого мы для первого раза отказались именно из-за трудности задачи.

Оценка отклонений поверхности от заданной формы производится на основании измерения фокусных расстояний, вернее, радиусов кривизны различных зон зеркала; для этого надо достаточно точно определить положение фокусов этих зон. Из того, что нам уже известно о теновом испытании, становится понятно, что задача сводится к изучению участков зеркала, **п о к р ы т ы х** **п о л у т е н ь ю**: именно наличие полутени указывает, что нож находится как раз в фокусе данной зоны зеркала. Совершенно темными или совсем светлыми выглядят те части зеркала, фокусы которых лежат впереди или позади ножа, и потому идущие от них лучи либо полностью загораживаются ножом, либо беспрепятственно минуют его.

Как следует толковать теновые картины, изображенные на рис. 39?

Когда нож в положении 1, он находится в фокусе центральной зоны, т. е. близ центра ее кривизны, почему эта зона и выглядит плоским кружком, покрытым ровной полутенью; это значит, что ее поверхность по своей форме представляет сферу. Поместив нож в положение 2, мы видим, что внешняя зона также имеет поверхность, близкую к сфере (она выглядит при этом положении ножа как кольцо, покрытое полутенью!), но ее фокус лежит несколько далее от зеркала, чем фокус центральной зоны. Без объяснений из рисунка видно, почему правая половина внешней зоны при положении ножа 1 освещена, а левая — темная; точно так же вполне ясна причина того, что при положении ножа 2 централь-

ная зона освещена слева, а справа она темная. Это и производит соответственные кажущиеся рельефы, схематически изображенные в нижней части рис. 39.

Итак, из наблюдения теневых картин при различных положениях ножа мы с уверенностью заключаем, что центральная часть нашего зеркала имеет более короткий радиус кривизны (более короткофокусна), чем внешняя его зона. Если мы измерим расстояние между положениями ножа 1 и 2, то определим разницу длин радиусов кривизны центральной и внешней зон зеркала. Все дело в величине различия кривизны поверхностей этих зон; если оно превзойдет некоторую максимальную допустимую величину, то это отрицательно скажется на отчетливости изображения, даваемого зеркалом. Конечно, мы будем стремиться как можно более приблизиться к «идеальной» сфере, но реальное зеркало всегда будет обладать некоторыми ошибками поверхности. Тщательно измерив расстояния между положениями ножа, приводимого в фокус различных зон зеркала, мы можем по измеренным так радиусам кривизны вычислить отклонения любых точек поверхности зеркала от той, которую мы примем за образец для сравнения. Удобнее всего взять в качестве такого образца сферу, имеющую радиус кривизны, одинаковый с радиусом кривизны при вершине испытываемого зеркала. В нашем случае это будет, очевидно, радиус кривизны центральной зоны зеркала. Расчет, который мы здесь не приводим, показывает, что наше зеркало будет удовлетворять достаточно строгим требованиям, если расстояния фокусов центральной и внешней зон не превосходят 2 мм. При такой разнице кривизны ошибка не превзойдет известный нам допуск в $\frac{1}{8}$ длины волны света. Если бы относительный фокус нашего зеркала был больше 8, этот допуск сильно возрос бы, а именно пропорционально кубу относительно фокуса. Так, будь относительный фокус нашего зеркала при диаметре в 150 мм не 8,5 (как мы приняли), а, например, 12, то максимальное допустимое расстояние фокусов центральной и внешней зон могло бы достигнуть 7 мм без заметного вреда для качества изображения *). Разумеется разобранный нами пример принадлежит к простейшим. Чаше бывает, что по-

*) Эти выводы не вполне строгие, хотя и правильно отражают качественную сторону вопроса. (Прим. Д. Д. Максимова.)

верхность зеркала обладает более сложной формой и задача состоит в том, чтобы привести ее к сферической или какой-либо иной, но правильной форме. Подробнее мы рассмотрим все это ниже, когда будем говорить об изготовлении параболического зеркала.

Итак, по разности положений фокусов различных зон зеркала мы можем с достаточной точностью заключать о степени отклонения его поверхности от правильной сферы; если степень отклонения окажется в пределах допустимого, мы вправе считать работу законченной.

Однако здесь надо оговориться. Наши выводы правильны лишь в том случае, если поверхность зеркала достаточно плавная, т. е. если на ней нет резких местных отклонений вроде тех, которые почти всегда имеются вначале. Резкие местные неправильности, например, узкая, но глубокая кольцевая канавка или валик, могут остаться не учтенными при промерах фокусов разных частей зеркала, если не обратить на них специального внимания. Поэтому раньше чем пытаться делать измерения, нужно добиться, чтобы поверхность зеркала приобрела плавность. Нет нужды говорить о том, что зеркало с неплавной поверхностью может удовлетворительно работать лишь в том случае, если местные ошибки его поверхности не превосходят того же допуска в $1/8$ длины волны света.

Самой вредной и, к сожалению, самой распространенной неправильностью поверхности является *завал* на краю (см. рис. 41). Если вовремя не обратить на него внимания, то этот дефект может настолько усилиться, что полировкой его уже нельзя будет устранить; в таком случае пришлось бы вернуться к тонкой шлифовке, что, разумеется, крайне нежелательно. Наилучшим средством против завала является короткий штрих, твердая смола и плавность движений при полировке. Если сильный завал обнаружится в начале полировки, то это является следствием неправильной шлифовки и лучше всего вернуться к тонкой шлифовке, тщательно используя способ контроля, о котором говорилось выше. Самый небольшой завал можно обнаружить по форме тени на краю зеркала. Если верхний и нижний концы прямого края тени изгибаются при схождении с зеркала или при нахождении на него (при продвижении ножа в поперечном направлении), то это значит, что край зеркала либо завален (имеет меньшую кривизну, чем остальная часть

зеркала), либо, что бывает реже, он приподнят (имеет большую кривизну). Отличить одну неправильность от другой нетрудно. Если концы края тени идут вперед, опережая остальную часть, то край зеркала приподнят; если они отстают (движущийся край тени как бы «цепляется» за край зеркала), значит, имеется завал.

К сожалению, точно оценить величину отклонения малой части поверхности — дело нелегкое. Поэтому разумнее стремится к плавной поверхности; она, впрочем, получится почти автоматически, если не нарушены основные правила полирования, главное, если удачно выбрана твердость смолы и характер штриха. Заметим здесь, что поверхность зеркала часто утрачивает плавность после подрезки полировальника, и задача состоит в том, чтобы после возвращения к нормальному полированию сгладить эти неправильности.

Закончив наше сферическое зеркало, подвергнем его еще одному испытанию, интересному в том отношении, что оно во многом напоминает уже работу с телескопом. Это — испытание по «искусственной звезде» с помощью окуляра.

Искусственная звезда — это попросту достаточно яркий, но очень маленький источник света. В качестве искусственной звезды может служить достаточно ярко освещенное отверстие вроде того, которое мы применяли для испытания теньевым способом. Искусственной звездой может служить и отражение Солнца или яркой лампы в маленьком стальном шарике от подшипника.

Выбору величины и изготовлению искусственной звезды придется уделить особое внимание.

Как мы видели (стр. 32 и след.), вполне совершенный объектив (в нашем случае вогнутое зеркало точной сферической формы) производит изображение светящейся точки не в виде точки же, а в виде кружка определенного диаметра, окруженного концентрическими кольцами, яркость которых быстро убывает по направлению к периферии. Поперечник этого кружка (d), называемого дифракционным кружком или диском, зависит от длины волны света и от относительного фокуса согласно формуле

$$d = 2,44 \lambda V,$$

где λ — длина волны света, а $V = \frac{f}{D}$ есть относительный фокус. В случае нашего 150-мм зеркала с относи-

тельным фокусом, равным 8,5 для желто-зеленых лучей, имеющих $\lambda = 0,00055$ мм, диаметр дифракционного диска будет, следовательно,

$$d = 2,44 \cdot 0,00055 \cdot 8,5 = 0,011 \text{ мм.}$$

Эта величина соответствует, понятно, главному фокусу (так как мы брали относительный фокус 8,5), а при условиях теневого испытания, т. е. когда лучи света исходят из центра кривизны (на двойном фокусном расстоянии от зеркала),

$$d = 2,44 \cdot 0,00055 \cdot 17,0 = 0,023 \text{ мм,}$$

так как в этом случае изображение образуется также на двойном фокусном расстоянии от зеркала и, следовательно, надо взять удвоенную величину относительного фокуса, т. е. не 8,5, а 17,0.

Разумеется, светящейся математической точки в природе не существует; даже звезда и та имеет некоторый видимый диаметр, правда, ничтожно малый (достигающий лишь у немногих ближайших к нам звезд-гигантов сотых долей секунды дуги). Поэтому правильнее формулировать наше положение так: сколь бы ни было мало освещенное отверстие, помещенное в центре кривизны нашего зеркала диаметром в 150 мм и с фокусным расстоянием около 1250 мм, изображение этого отверстия будет иметь вид кружка диаметром не менее 0,023 мм. Отклонения формы зеркала от правильной сферы могут, по понятным нам теперь причинам, только у в е л и ч и т ь этот кружок, но никак не уменьшить его. В самом деле, если различные части зеркала значительно разнятся по своей кривизне, то, как мы уже видели, они имеют различные фокусы и центры кривизны; поэтому, поместив экран в точке фокуса одной части зеркала, мы пересечем конус лучей от другой части зеркала на некотором расстоянии от ее фокуса, т. е. в более широкой части. Иначе говоря, изображение, принятое на экран или рассматриваемое непосредственно, в таком случае не будет вполне отчетливо, а будет окружено некоторой каймой света («ореолом»), представляющей собой сечение конуса лучей на некотором расстоянии от фокуса, дальше или ближе его. Отсюда ясно, что о качестве зеркала можно судить по виду создаваемого им изображения искусственной звезды.

Как понятно из предыдущего, отверстие, играющее роль искусственной звезды, должно быть не больше определенной величины, в нашем случае, — не больше 0,02 мм. Изготовить такое маленькое отверстие не особенно легко, но вполне возможно. Осторожный укол очень тонкой и острой иглой в станиоль, плотно лежащий на стекле, нередко дает то, что надо. К сожалению, проконтролировать размер полученного отверстия нельзя без микроскопа, снабженного микрометром. Поэтому если такой возможности у читателя нет, то проще поступить следующим образом (на первый взгляд этот способ может показаться малонадежным, но на деле он вполне себя оправдывает). В станиоле всегда есть мельчайшие естественные отверстия, многие из которых вполне годятся в качестве искусственных звезд. Поместив кусочек станиоля перед яркой лампочкой, мы увидим эти отверстия в виде ярко сияющих крошечных звездочек. Сильная лупа позволит нам выбрать из них самые маленькие; пусть их будет несколько, одно около другого, — это «созвездие» или целая «звездная куча» будет еще удобнее для наших целей.

Остается засветить их достаточно ярко. Если постараться установить кусочек станиоля перед нашей лампочкой для теневого испытания таким образом, чтобы одна или несколько дырочек пришлись как раз против раскаленной спирали, свет будет очень ярким; но при этом, так как спираль лампочки очень узка, яркие лучи от нее упадут лишь на какую-либо часть зеркала, а не на всю его поверхность, как нам было бы необходимо. В сущности, получится то же самое, как если бы мы закрыли зеркало диафрагмой с вырезанным в ней увеличенным изображением спирали лампочки. Поэтому совершенно необходимо поместить перед лампочкой матовое стекло или устроить так, чтобы источник света (в данном случае спираль лампочки) был виден с места, где находится наша искусственная звезда, под углом не меньшим, чем видно оттуда зеркало (рис. 46).

Это необходимо основательно проверить. Если нет лампочки с достаточно толстой и близкой к ее стенке спиралью, то придется воспользоваться молочной лампочкой или подложить кусочек тонко матированного стекла. При этом, к сожалению, произойдет большая потеря света. Яркое же освещение важно потому, что иначе слабый ореол вокруг изображения может остаться неза-

меченным и, следовательно, дефект зеркала останется не обнаруженным. Необходимо помнить, что наше зеркало еще не посеребрено и потому отражает лишь около 4% падающего на него света! Для обеспечения хорошего освещения искусственной звезды прибегают поэтому к помощи линз, собирающих свет от лампочки на отверстии; в силу этого лучи падают на отверстие под

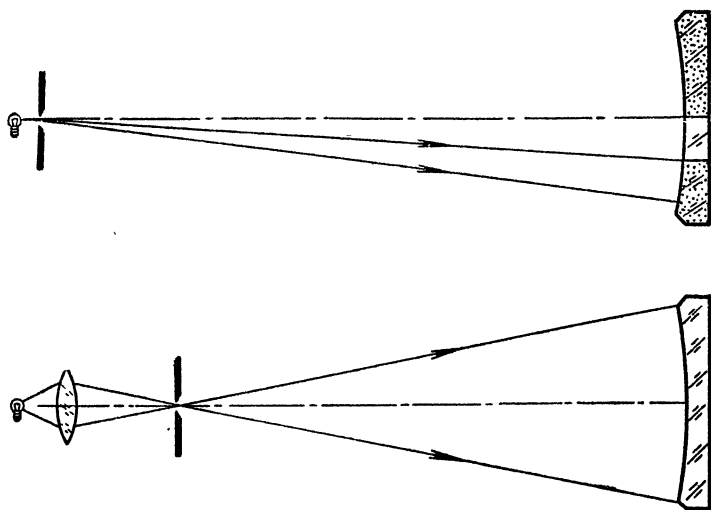


Рис. 46. Устройство точечного источника света: сверху — неправильное (раскаленная спираль лампочки посылает через малое отверстие слишком узкий пучок света, который не покрывает всей поверхности зеркала); внизу — правильное (с помощью линзы изображение раскаленной спирали фокусируется в плоскости отверстия, вследствие чего лучи, выходящие из него, образуют достаточно широкий конус, освещающий всю поверхность зеркала).

большим углом, и, пройдя отверстие, покрывают наверняка все зеркало (см. рис. 46). Любитель при желании сможет, конечно, устроить себе такое приспособление с помощью простой короткофокусной линзы.

Установив искусственную звезду или группу звезд близ центра кривизны зеркала, будем рассматривать изображение с помощью сильной лупы или окуляра. Сильный окуляр необходим не только для того, чтобы получить достаточно большое увеличение; он нужен еще и для того, чтобы по возможности устранить различные побочные явления («хвосты», лучи и пр.) вызываемые недостатками глаза (главным образом хрусталика). Эти дефекты дают себя знать, когда в глаз входит широкий

пучок лучей и когда, естественно, действует весь хрусталик. Сильный же окуляр вводит в глаз узкий пучок света, так что используется лишь центральная часть хрусталика, дающая лучшие изображения. В нашем случае желателен окуляр, дающий увеличение не менее 25 раз, т. е. с фокусным расстоянием не более 10 мм.

Для удобства рассматривания необходимо приладить окуляр так, чтобы он прочно держался и не дрожал, иначе колеблющееся изображение нельзя будет как следует рассмотреть. Очень удобно приладить к «домику» лампочки держатель, допускающий небольшие повороты во все стороны и передвижения по вертикали; в простейшем случае его можно сделать из мягкой проволоки, изгибание которой позволит производить регулировку.

Рассматривая изображение искусственной звезды в окуляр, начнем с того, что точно установим окуляр на фокус, чтобы добиться наибольшей резкости изображения. Если размеры отверстия превосходят 0,02 мм, то мы должны увидеть его форму и все случайные неправильности очертаний. При точной фокусировке вокруг яркого изображения не должно быть никакого ореола, никаких «хвостов», никакого тумана. Если нам попадется «звезда» меньшего диаметра, чем 0,02 мм, то она должна представиться нам совершенно круглой и очень маленькой; мы увидим в данном случае уже не само отверстие, а лишь дифракционный диск. Если освещение достаточно сильно (а об этом мы должны были позаботиться), то вокруг маленького яркого диска мы увидим слабые концентрические дифракционные кольца. Картина будет сходна с той, которая наблюдается у настоящих звезд в хороший телескоп при сильном увеличении и при хороших атмосферных условиях.

При смещении окуляра вперед (к зеркалу) или назад (от зеркала) на одинаковую небольшую величину вид изображения должен меняться одинаковым образом: изображение должно раздвигаться в кружок большего диаметра. При сдвиге порядка 2—3 мм в каждую сторону мы должны увидеть небольшой диск, состоящий из правильных концентрических колец (рис. 47, вверху). Такая картина получается, если поверхность нашего зеркала является достаточно правильной сферой. Всякое отклонение от сферы, превосходящее допустимую величину, скажется непременно на виде этих внефокальных изображений. При этом окажутся и различия между

предфокальным и зафокальным изображениями, т. е. когда окуляр находится соответственно ближе или дальше от зеркала, чем при точной установке на фокус.

Если мы увидим, что зафокальное изображение имеет резко очерченный внешний край с серединой более бледной, чем периферия, а предфокальное, наоборот, имеет

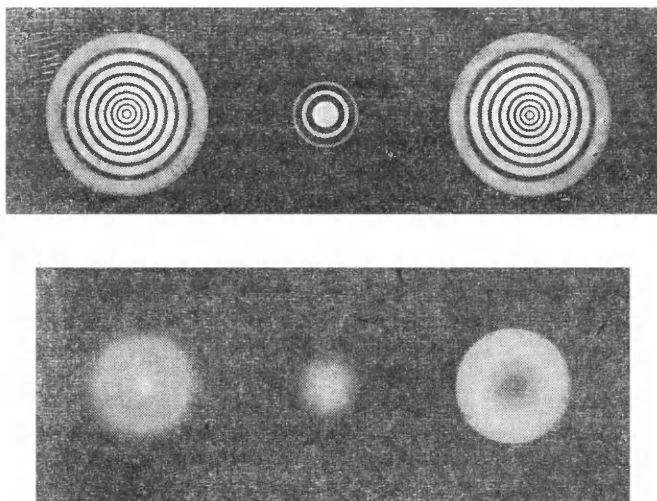


Рис. 47. Вид изображения светящейся точки в сильный окуляр при наилучшей наводке на фокус (посередине), при предфокальном (слева) и зафокальном (справа) положениях окуляра:верху—при безупречном сферическом зеркале, внизу—если радиус кривизны центральной части зеркала короче, чем радиус кривизны периферических частей.

более светлое ядро и размытую более бледную периферию, это значит, что центральные части зеркала обладают большей кривизной (более коротким фокусом), чем периферия (см. рис. 47, внизу). Обратная картина, т. е. резкий край и более яркая периферия у предфокального изображения, размытые края при ярком центре у зафокального изображения, безошибочно указывает на то, что фокусное расстояние центральной части зеркала длиннее, чем фокусное расстояние периферии.

Надо заметить, что испытание с помощью окуляра легче и нагляднее для начинающего, чем теневое испытание. Поэтому нередко случается, что зеркало, казав-

шееся вполне хорошим при теневом испытании, не выдерживает этой пробы. Виною этому, конечно, не сам теневой метод (который значительно чувствительнее окулярной пробы), а неопытность мастера, не сумевшего наладить как следует испытание или еще не научившегося «читать» теневую картину. Но при своей относительной наглядности и простоте окулярная проба лишена главного достоинства теневого метода: с ее помощью мы улавливаем лишь общий результат, но не можем определить, кака я и м е н н о зона зеркала обладает недостатком, не говоря уже о том, что нельзя судить о степени отклонения поверхности от желаемой формы. Тем не менее окулярное испытание чрезвычайно полезно, особенно благодаря тому, что приучает рассматривать изображение. Такое умение, приобретаемое в комнате, очень пригодится потом при настоящих наблюдениях в телескоп.

Необходимо, однако, сказать, что описанный нами вид внефокальных изображений при отклонении формы поверхности от сферы получится лишь в том случае, если отклонения эти очень велики. В случае легких отклонений, как раз того порядка, который достаточен, чтобы «испортить» зеркало, сделав его «плохим», различия внефокальных изображений несравненно тоньше. В сущности, они ограничиваются несколько иным видом дифракционных колец. Рис. 48 дает некоторые примеры, по которым можно получить ориентировку в этом важном для нас деле.

Здесь нелишне еще отметить, что вид искусственной звезды, рассматриваемой с помощью нашего зеркала, непременно будет сильно отличаться от вида настоящей звезды. При наблюдении настоящей звезды сказывается и влияние атмосферных условий, хотя воздух дает себя знать и при наблюдении искусственной звезды в комнате; размер дифракционного диска при этом вдвое меньше, чем у искусственной звезды, так как зеркало телескопа работает при вдвое меньшем относительном фокусном расстоянии, чем в том случае, когда наблюдают из центра кривизны; кроме того, ход лучей будет различен: при наблюдениях звезд на зеркало падают параллельные лучи, а во время испытания — расходящиеся. Большое отличие состоит и в том, что искусственная звезда рассматривается с помощью еще непосеребренного зеркала, отражающего лишь около 4% падающего

на него света. Поэтому если освещение не очень яркое, мы можем и не заметить ореола вокруг изображения; при наблюдении же яркой звезды в посеребренное зеркало недостаток может выступить с неожиданной резкостью.

Мы подходим к концу. Остается сказать несколько слов об одном недостатке зеркала, часто представляющем неприятный сюрприз в процессе работы — это появление у зеркала *астигматизма*.

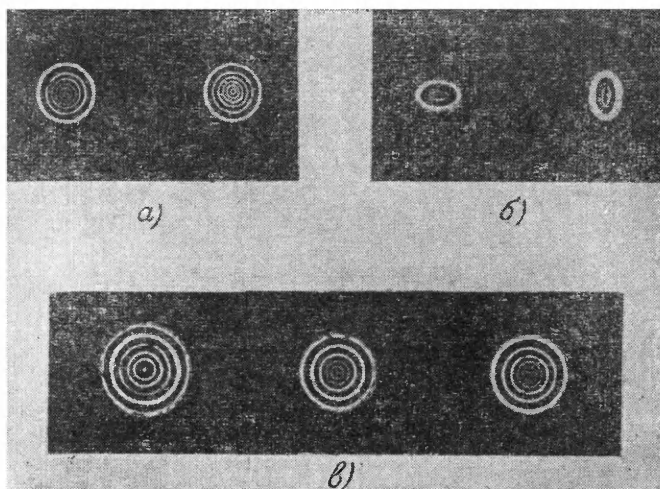


Рис. 48. Дифракционная картина внефокальных изображений светящейся точки при различных небольших отклонениях формы поверхности зеркала от правильной сферы: *а* — умеренные различия кривизны центральной и периферической частей зеркала; *б* — астигматизм; *в* — различные случаи зональных отклонений.

Астигматизм есть следствие неодинаковости кривизны поверхности по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Глаза, как известно, также у некоторых бывают астигматичны, что мешает человеку отчетливо видеть и вызывает потребность в особых исправляющих очках с цилиндрическими линзами.

Астигматическое зеркало имеет, таким образом, различные фокусные расстояния по двум взаимно перпендикулярным диаметрам (рис. 49). При рассматривании искусственной звезды в астигматическое зеркало не удастся навести на фокус окуляр так, чтобы видеть вполне правильный дифракционный диск. Хотя в случае

небольшого астигматизма и можно получить сравнительно хорошее изображение, но при смещении окуляра с наилучшей установки изображение не будет расширяться в правильный кружок, а станет вытягиваться в овал или даже в полоску. В зафокальном и предфокальном положениях окуляра вытягивание изображения будет происходить во взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис. 48, б).

Сильный астигматизм делает зеркало непригодным для работы. Чаще всего он происходит от отмеченного

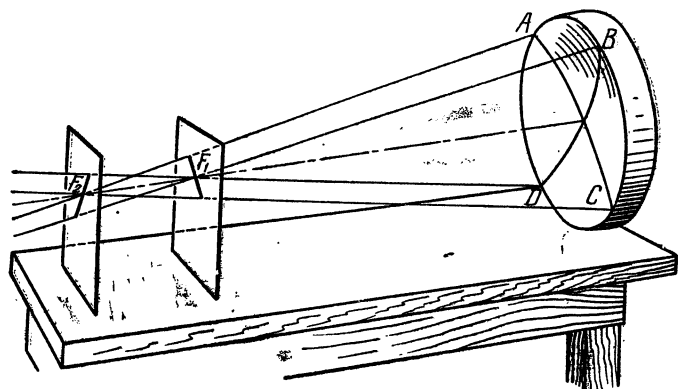


Рис. 49. Сущность астигматизма. Кривизна поверхности зеркала по AC меньше (фокус дальше) чем по BD (фокус ближе).

выше коробления плохо отожженного стекла. Но возможны и другие причины. Если стекло будет сильнее шлифовываться или полировываться в одном направлении, чем в другом, то, понятно, кривизна по разным диаметрам получится не одинаковая (оптики образно называют поэтому астигматическую поверхность «корытом»). Такая неправильность обработки может получиться при неравномерном нажиме или неравномерном вращении зеркала относительно шлифовальника или полировальника. Астигматизм может возникнуть и от временного изгибания стекла (например, от коробления ручки) или полировальника (вот почему последний не должен быть сделан из слишком тонкого стекла). Последней опасности можно избежать, правильно устроив подложку, на которой лежит полировальник.

Понятно, что ни нижняя поверхность полировальника, ни стол, на котором он лежит, не являются математи-

чески точными плоскостями: их поверхности имеют незначительные выступы и углубления, и практически полировальник опирается на стол всего тремя точками (положение плоскости определяется тремя точками), распределение которых может быть очень различным. Понятно, что стекло, лежащее всего на трех точках, будет прогибаться между этими точками; этот прогиб может быть очень различным и неравномерным в зависимости от распределения точек опоры. Говоря о нужной толщине дисков, мы имели в виду, что диск опирается на три точки, распределенные равномерно по его окружности; при таком условии указанная минимальная толщина диска обеспечит жесткость, достаточную для того, чтобы диск практически не деформировался (вернее, чтобы его деформация от изгибания не превышала допуска). Учитывая это, мы хорошо сделаем, если с самого начала будем класть шлифовальник (а потом и полировальник) не непосредственно на стол (или доску), а, как советует Д. Д. Максотов, на три опоры, укрепленные на столе таким образом, чтобы диск лег на них тремя равноотстоящими точками, расположенными недалеко от его края.

От астигматизма, производимого самой формой поверхности, необходимо отличать *абerrацию астигматизма*, возникающую оттого, что искусственная звезда, а следовательно, и ее изображение, находится не точно на главной оптической оси зеркала, а несколько в стороне от нее. Если расстояние от оси велико (особенно при малом относительном фокусе), то может получиться резкая картина астигматизма. Отличить ее от астигматизма поверхности зеркала ничего не стоит: длинные оси внефокальных изображений будут здесь всегда горизонтальны и вертикальны (потому что светящаяся точка и ее изображение в нашем случае лежат на горизонтальной линии), а главное, их положение не будет изменяться при поворачивании зеркала вокруг оси. Если же астигматизм вызван формой поверхности зеркала, то, разумеется, направление длинных осей внефокальных изображений будет меняться сообразно повороту зеркала. Может случиться, наконец, что астигматизм видимого изображения искусственной звезды вызван недостатками окуляра или глаза. Выяснить это тоже очень легко, поворачивая окуляр вокруг его оси или наклоняя голову в стороны. Если астигматизм вызван свойствами окуляра

или глаза, то при этом будет поворачиваться и вытянутое изображение.

Самые легкие степени астигматизма едва заметны по небольшим утолщениям дифракционных колец на взаимно перпендикулярных диаметрах. Очень часто такая картина видна в силу легкого астигматизма, производимого тем, что наблюдать приходится несколько в стороне от оси. Вообще же говоря, незначительный астигматизм зеркала довольно обычное явление; поскольку астигматизм снижает качество изображения, нужно стараться избегать его возникновения. Если бы читатель, приобретший уже некоторый опыт в работе, смог проверить зеркало «профессионального» изготовления, то он убедился бы, что значительные дефекты поверхностей представляют и там далеко не редкое явление, но обычно они остаются незамеченными, потому что любителю не всегда приходит в голову их искать.

Нередко случается, что поверхность готового зеркала приобретает астигматичность из-за неправильного устройства оправы, с помощью которой оно установлено в телескопе. Об этом мы скажем ниже.

7. Параболическое зеркало

Любитель может взяться за более трудную задачу изготовления параболического зеркала из различных побуждений, начиная с потребности в более крупном инструменте и кончая стремлением усовершенствовать свое мастерство; немалое значение имеет и вполне естественная любознательность.

Как мы хорошо помним, наименьший относительный фокус, допустимый для сферического зеркала, определяется из формулы

$$V_{\text{min}} = 1,52 \sqrt[3]{D}.$$

Для 250-мм зеркала он должен, следовательно, быть не менее $1,52 \sqrt[3]{250} \approx 9,6$. Такой относительный фокус невыгоден уже по одному тому, что придаст будущему инструменту чрезмерную громоздкость; длина трубы составит около 2,5 м.

Трудность изготовления параболического зеркала растет очень быстро с повышением светосилы и диа-

метра. Нужно поэтому хорошо заранее продумать вопрос об относительном фокусе и размере параболического зеркала; иначе, избегнув механических трудностей (в первую очередь изготовления установки для большой трубы, а также и самой трубы), мы рискуем встретиться с еще большими затруднениями оптического характера.

Остановимся на диаметре 250 мм. Хороший рефлектор с зеркалом такого диаметра представляет собой уже достаточно сильный инструмент, с которым возможны серьезные работы. В то же время он еще вполне по силам любителю. При дальнейшем увеличении диаметра трудности изготовления растут столь быстро, что фактическим пределом любительских возможностей надо считать диаметр 300 мм и то при наличии большого опыта. Впрочем, как мы уже отмечали, любитель-оптик в лучшем положении, чем любитель-механик. Постройка установки для 300-мм телескопа — дело гораздо более трудное, чем изготовление приличного 300-мм зеркала, если, конечно, нет возможности воспользоваться услугами настоящей механической мастерской.

На каком относительном отверстии остановиться? Для зеркала диаметром 250 мм мы выберем относительный фокус, равный 7, что определит длину будущего инструмента в 1,75 м. К меньшему относительному фокусу не следует стремиться не только из-за сильного увеличения трудностей изготовления зеркала: дальнейшее уменьшение относительного фокуса вызовет ограничение поля зрения из-за возникающих искажений изображения (аберраций); кроме того, это может создать затруднения при подборе окуляров, поскольку существующие окуляры рассчитаны на большой относительный фокус (большинство окуляров рассчитано на рефрактор, относительный фокус которого обычно равен 15); наконец, при малом относительном фокусе потребуются особенно точная юстировка.

Прежде чем приступить к описанию техники работы, нам придется напомнить кое-какие сведения из оптики.

В главе II мы объяснили, почему безупречное изображение звезды может дать только параболическое зеркало. Лучи, идущие от небесных тел, практически параллельны. Падая на сферическую вогнутую поверхность зеркала (рис. 13, 15), идущие от звезды параллельные лучи после отражения от нее не пересекаются в одной

точке (в фокусе); каждая зона*) зеркала имеет свой фокус. В результате вместо одного резкого изображения звезды, диаметр которого равен диаметру дифракционного диска, образуется ряд изображений вдоль оптической оси; понятно, что при таких условиях ни при каком положении окуляра нельзя добиться полной резкости изображения. Фокусируя, например, на переднее изображение, мы смещаем окуляр с точной фокусировки изображений, лежащих позади, и наоборот. Звезда представляется нам в виде центрального ядра, окруженного ореолом; центральное ядро — изображение, образованное той зоной зеркала, на фокус которой наведен окуляр, ореол — сечение конуса лучей, идущих от прочих зон зеркала. Это несовпадение фокусов, как мы знаем, называется *сферической аберрацией*.

Сферическое зеркало свободно от сферической аберрации лишь в одном-единственном случае, именно, когда лучи падают на него из центра его кривизны. В любом другом случае оно будет обладать сферической аберрацией. Величина сферической аберрации очень быстро возрастает с увеличением диаметра зеркала (разумеется, при неизменном радиусе кривизны); строго говоря, от сферической аберрации вполне свободно лишь бесконечно малое зеркало (которое можно рассматривать как состоящее из одной-единственной центральной зоны). К счастью, на практике эта аберрация очень мала: мы уже видели выше, что сферическое зеркало диаметром 150 мм с фокусным расстоянием 1250 мм обладает настолько незначительной сферической аберрацией, что по качеству даваемого им изображения оно практически неотлично от параболического зеркала.

Параболическая поверхность отличается от сферической тем, что она свободна от сферической аберрации, когда падающие на нее лучи параллельны оптической оси, т. е. при очень большом, практически бесконечном удалении звезды; если же источник света поместить близ центра кривизны одной из зон параболического зеркала, то, в отличие от сферического зеркала, оно обнаружит сферическую аберрацию.

*) Зоной называется окружность, описанная на поверхности зеркала из его вершины, как из центра; точки поверхности данной зоны, следовательно, равноудалены от оптической оси зеркала. Радиус этой окружности (y) называется радиусом или высотой зоны, который нельзя, разумеется, смешивать с радиусом кривизны (R),

Происходит это потому, что параболическая поверхность, в отличие от сферической, обладает не одной аковой кривизной в различных своих частях (зонах) и единого центра кривизны не имеет. Больше всего ее кривизна при вершине (в центре зеркала), а по мере удаления от вершины (по направлению к краям) кривизна уменьшается по определенному закону, свойственному только параболической поверхности. В то время как нормали сферы все пересекают ось в одной точке, именно, в центре кривизны сферы (являясь радиусами последней), нормали различных зон параболоида пересекают ось на различных расстояниях от вершины, притом тем дальше, чем больше радиус зоны (y). Если обозначить через R_0 радиус кривизны параболической поверхности при ее вершине, а через x — стрелку кривизны зоны y , то точка пересечения нормалей этой зоны с осью будет лежать на расстоянии $R_0 + x$ от вершины параболоида (рис. 50). Отсюда ясно, что лучи, исходящие из светящейся точки, помещенной на оси, на расстоянии R_0 от вершины параболического зеркала, отражаясь от любой его зоны, вследствие равенства углов падения и отражения будут пересекать ось на расстоянии от центра кривизны, приблизительно равном удвоенной стрелке кривизны этой зоны $2x$. Иначе говоря, фокус любой зоны параболического зеркала при помещении светящейся точки в центре его кривизны

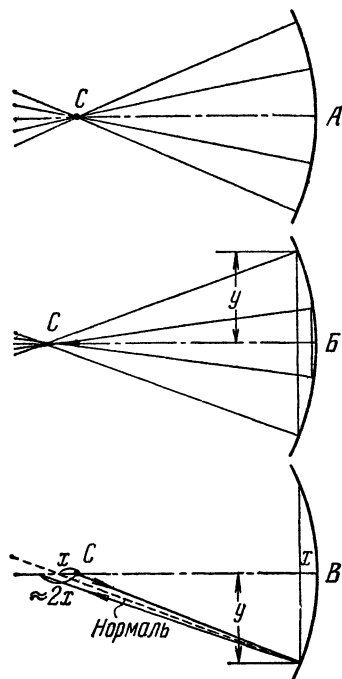


Рис. 50. Сравнение свойств сферы и параболоида: А—сфера; все нормали (они же радиусы) пересекаются в центре кривизны С; все лучи, падающие на поверхность сферы из центра кривизны, отражаются обратно туда же; В—параболоид; нормали пересекают ось позади центра кривизны его вершинной части на расстояниях, равных стрелкам кривизны (x) соответствующих зон; В—лучи, падающие из центра кривизны вершинной части параболоида (точки С), после отражения пересекают ось на расстоянии от центра кривизны, приблизительно равном удвоенной стрелке ($2x$) кривизны зоны.

при вершине будет находиться приблизительно на расстоянии $R_0 + 2x$ от вершины. Зная, что $x = \frac{y^2}{2R}$ (это равенство для параболоида является точным, так как прямо следует из уравнения параболы, а для сферы —

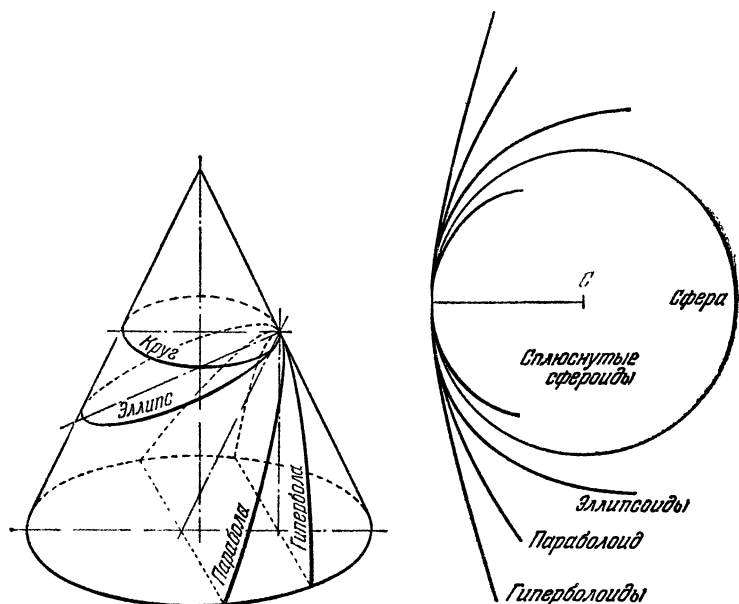


Рис. 51. Конические сечения, вращением которых создаются различные поверхности вращения. Справа — профили сечений таких поверхностей, имеющих одинаковую кривизну при вершине.

приближенным), расстояние фокуса любой зоны от центра кривизны мы выразим величиной $\Delta R_y = \frac{y^2}{2R_0}$, где R_0 — радиус кривизны при вершине. Эта величина есть абберация нормалей зон при испытании параболического зеркала из центра кривизны.

Кроме параболической, существует бесконечное множество других поверхностей, образуемых вращением конических сечений, именно гиперболоидов, эллипсоидов и сплюснутых сфероидов (рис. 51), но ни одна из них не имеет этого неосценимого свойства — образовывать безабберационное изображение звезды. Этим свойством обладает только параболическая поверхность. Подобно тому как сфера есть единственная поверхность,

способная образовать свободное от сферической аберрации изображение светящейся точки, если светящаяся точка находится в центре кривизны сферы, так параболоид есть единственная поверхность, создающая в своем главном фокусе свободное от сферической аберрации изображение бесконечно удаленной звезды.

Фактическое различие форм этих поверхностей при той малой кривизне (т. е. большом радиусе кривизны), с которой мы имеем дело, настолько мало, что изобразить его на чертеже нет возможности. Так, если бы на рис. 15, схематически изображающем профили сферы и параболоида, мы смогли показать фактическое положение в случае, скажем, зеркала диаметром 250 мм с радиусом кривизны 3500 мм, то потребовался бы сильнейший микроскоп, чтобы увидеть просвет между окружностью и параболой: приблизительный расчет *) показал бы, что даже у самого края они в данном случае должны отстоять менее чем на 0,001 мм. Мы знаем, однако, что теневое испытание позволяет замечать столь малые ошибки поверхности, что эта величина оказывается большой.

При изготовлении сферического зеркала мы стремились добиться того, чтобы оно не давало сферической аберрации у изображения «звезды», помещенной в центре его кривизны. Казалось бы, проще всего при изготовлении параболического зеркала испытывать его по настоящей звезде, добиваясь полировкой (ретушью) уничтожения аберрации. При теневом испытании параболическое зеркало, освещенное параллельными лучами настоящей звезды, должно выглядеть совершенно так же, как сферическое при испытании из центра кривизны с помощью искусственной звезды, т. е. казаться «плоским». Но этот способ на практике неприменим. Вполне

*) Величина отклонения параболоида у края от касательной сферы [при равенстве радиусов кривизны при вершине (R_0)] выражается приближенным отношением $\frac{D^4}{128R_0^3}$; в нашем случае

$\frac{250^4}{128 \cdot 3500^3} \approx 0,0008 \text{ мм.}$ До сих пор мы имели и еще будем иметь дело не с касательной, а с ближайшей сферой, отклонение которой (δ_{\max}^0) от параболоида вчетверо меньше и выражается формулами

$$\delta_{\max}^0 = \frac{D^4}{512R_0^3} \quad \text{или} \quad \frac{D}{4096\sqrt[3]{3}}.$$

понятно, что наводить зеркало в процессе его полировки на звезду и производить, пользуясь ее светом, теневое испытание — задача практически невыполнимая. Перечислять ее трудности не стоит, они и так ясны. Правда, имеется и такая возможность: проводить испытание параболического зеркала так же, как сферического, но не из центра кривизны, а удалив светящуюся точку на такое расстояние, чтобы абберрации зеркала стали неощутимыми. Как показал Д. Д. Максutow, в случае зеркала диаметром 250 мм и с относительным фокусом 7 требуется расположить светящуюся точку на расстоянии 18 м. Однако, конечно, любителю трудно рассчитывать на помещение такой длины, кроме того, потребуется еще и плоское диагональное зеркало отличного качества, так как, разумеется, при таком испытании смотреть необходимо сбоку, чтобы не заслонять головой светящуюся точку.

Поэтому любителю остается лишь один способ, именно, испытание из центра кривизны, т. е. с помощью той же техники, которая знакома ему уже в применении к сферическому зеркалу. Различие будет, однако, состоять в том, что параболическое зеркало, как сказано, в противоположность сферическому, обладает сферической абберацией при испытании из центра кривизны. В отличие от знакомого нам случая сферического зеркала, задача состоит теперь в том, чтобы рассчитать и заранее знать сферическую абберацию нашего зеркала и научиться измерять ее; при обработке мы должны только добиться того, чтобы зеркало стало давать именно такие абберации, какие свойственны данному («заданному»), параболоиду.

Опыт, приобретенный при работе над сферическим зеркалом, очень поможет нам в нашей новой задаче — научиться отличать параболическую поверхность от других несферических поверхностей. Для этого надо прежде всего уметь грубо оценивать характер поверхности, чтобы определить, к какому типу она принадлежит, и затем достаточно точно измерять абберации.

Сначала познакомимся с основными типами поверхностей, встречающихся в нашей практике.

Их можно разбить на два резко различных класса. У одних кривизна больше в центральной части, чем в периферических частях; у других, наоборот, кривизна меньше в центральных частях и больше на периферии.

К первому классу относятся, кроме параболоида, получить который мы стремимся, еще эллипсоиды и гиперболоиды. Они отличаются друг от друга степенью увеличения кривизны поверхности от краев к центру.

Ко второму классу относятся сплюснутые сфероиды: это поверхности, получающиеся от вращения эллипсов вокруг их малой оси (в отличие от эллипсоидов, получающихся вращением эллипсов вокруг большой оси). Сплюснутый сфероид легко узнается при испытании, так как кривизна его поверхности уменьшается от краев к центру. Весь «набор» профилей основных поверхностей схематически показан на рис. 51.

Среди различных поверхностей, получающихся от вращения конических сечений вокруг их осей, выделяются две: сферическая (шаровая), получающаяся от вращения окружности вокруг ее диаметра, и параболическая, получающаяся от вращения параболы вокруг ее оси. Дело в том, что «форма» окружности и параболы неизменна, на каком бы расстоянии от вершины конуса ни проходило сечение; это зависит от того, что окружность получается только при рассечении кругового конуса перпендикулярно к его оси, а парабола — при рассечении параллельно его образующей. Иными словами, все окружности, как и все параболы, одинаковы по форме и различаются между собою лишь масштабом, в котором изображены. Масштаб же задается радиусом кривизны при вершине (R_0). Наоборот, форм эллипсов и гипербол — бесконечное множество, так как они возникают от сечений под различными углами к оси конуса.

Весьма возможно, что наше первое зеркало в течение полировки уже побывало в обоих этих классах, последовательно переходя из одного в другой; поэтому мы могли уже научиться различать их с помощью теневого испытания. Надо заметить, однако, что на практике редко бывает, чтобы поверхность зеркала в точности соответствовала какой-либо одной из указанных форм. Очень часто она представляет комбинацию поверхностей различных типов, притом даже неправильную.

Вернемся теперь к изготовлению зеркала. Первые стадии обработки не будут ничем отличаться от уже нам знакомых. Грубая и тонкая шлифовки производятся совершенно так же, как и в случае сферического зеркала. Полировка тоже сначала ведется так, как если бы ее целью было получение строго сферической формы

поверхности. Нет нужды, однако, обязательно стремиться к достижению безупречной сферической поверхности. Правда, при недостатке опыта у начинающего мастера легко может случиться, что поверхность зеркала много раз успеет изменить свою форму прежде, чем будет закончена полировка. Тем более вероятно поэтому, что впервые взявшись за изготовление параболоида, любитель только «испортит» безупречную сферическую поверхность, добиться которой ему стоило большого труда. В силу этого можно посоветовать заранее, еще до достижения сферической формы (но, понятно, ближе к завершению полировки!), пристально следить за формой поверхности с помощью достаточно частых испытаний. При этом нужно стараться «нащупать» тот способ полировки, при котором поверхность зеркала приближается к параболоидальной, иными словами, можно непосредственно, минуя сферическую поверхность, прийти к параболоиду. Подобный способ имеет то достоинство, что при его применении мастер как бы исподволь подготавливается к предстоящей ему задаче: придать не одинаковую кривизну различным зонам поверхности зеркала, именно придать меньшую кривизну внешним зонам и большую — внутренним, притом по совершенно определенному закону, свойственному лишь параболоиду, этой, как мы видели, единственной в своем роде поверхности. При обработке же сферической поверхности мы рассматривали любые различия кривизны отдельных зон зеркала как порок, от которого необходимо избавиться.

Как уже было сказано, нам доступен лишь один способ, с помощью которого мы можем достигнуть этого: вычислить заранее aberrации истинного параболоида и затем, соответственным образом ведя полировку, добиться того, чтобы наше зеркало стало давать aberrации именно такого характера и такой величины, как вычисленные нами.

Если обозначить через H полудиаметр параболического зеркала и через R_0 радиус кривизны его центральной зоны (радиус кривизны при вершине), то *максимальная aberrация* ΔR_H , т. е. расстояние между точками пересечения нормалей центральной и самой крайней зон, определится из формулы

$$\Delta R_H = \frac{H^2}{2R_0}.$$

Но, как мы видели, любая промежуточная зона y будет обладать меньшей aberrацией, пропорциональной квадрату радиуса этой зоны:

$$\Delta R_y = \frac{y^2}{2R_0}.$$

Вспомним, что у параболоида стрелка кривизны есть $x = \frac{y^2}{2R_0}$; таким образом, aberrация любой зоны параболоида в точности равна стрелке кривизны этой зоны:

$$\Delta R_y = x_y.$$

Допустим, что наше зеркало имеет диаметр 250 мм и радиус кривизны при вершине (R_0), равный 3500 мм. Отметим на нем зоны с радиусом y : 125, 100, 75, 50 и 25 мм. Тогда aberrации этих зон будут таковы (табл. 4):

Т а б л и ц а 4

Зоны зеркала	y	Аберрация	
		ΔR_y	$2\Delta R_y$
5 (край)	125	2,23	4,46
4	100	1,43	2,86
3	75	0,80	1,60
2	50	0,36	0,72
1	25	0,09	0,18
0 (центр)	0	0,00	0,00

Мы видим, что aberrации зон быстро растут по направлению к краю: в то время как для двух средних зон aberrации незначительны, для зоны № 3 мы имеем aberrацию уже близкую к 1 мм, а на краю зеркала она превосходит 2 мм. Величины aberrаций ΔR_y , приведенные в левом столбце таблицы, соответствуют тому способу испытания, при котором источник света (точка или щель) и нож Фуко связаны воедино и поэтому перемещаются как одно целое. При нашем же способе испытания (источник света неподвижен, перемещается только нож), очевидно, нужно пользоваться удвоенными величинами aberrаций $2\Delta R_y$, приведенными в правом (последнем) столбце таблицы. Более совершенные («профессиональные») установки для теневого испытания устраниваются по первому способу, тогда как любители

чаще всего предпочитают второй способ (неподвижный источник света, перемещающийся нож).

Итак, если источник света неподвижен, мы пользуемся формулой $2\Delta R_y = \frac{y^2}{R_0}$; если он передвигается вместе с ножом, то значение аберрации мы находим из формулы $\Delta R_y = \frac{y^2}{2R_0}$.

Практически надо предпочесть устройство, при котором источник света передвигается вместе с ножом, так как здесь, во-первых, легче установить нож параллельно щели и, главное, поддерживать эту параллельность, а, во-вторых, можно максимально сблизить нож со щелью. Последнее преимущество позволит ослабить погрешность, происходящую от астигматизма изображения и кóмы, вызванных тем, что и источник света, и его изображение находятся в стороне от оси.

Строго говоря, при такой установке мы получаем более точный результат, так как измеряем непосредственно разницу положений точек пересечения нормалей (см. рис. 50) различных зон зеркала, помещая в них источник света вместе с ножом Фуко; в случае же неподвижного источника света мы вносим некоторую ошибку, так как источник света остается в центре кривизны одной и той же зоны.

Наша задача состоит, следовательно, в таком изменении сферической поверхности нашего зеркала, в такой его переделке, чтобы оно показало именно эти заранее вычисленные аберрации при испытании из центра кривизны. Эту переделку, состоящую в придании сферической поверхности параболоидальной формы, мы будем называть в дальнейшем *параболизацией*. Не забудем здесь, впрочем, того, что отнюдь не надо стремиться сначала добиться наилучшей сферической поверхности, а потом превратить ее в параболоидальную. Такой способ представляет, строго говоря, двойную трудность. Лучше всего, если мы, овладев техникой определения формы поверхности, будем стараться вести последние этапы полировки таким образом, чтобы продвигаться к непосредственному получению параболоидальной поверхности.

Наиболее простой способ парабололизации состоит в увеличении длины штриха. Как мы знаем, именно увеличение кривизны центральных зон часто по-

лучается нечаянно и даже бывает причиной больших хлопот при изготовлении сферического зеркала. К сожалению, такой простой способ параболлизации таит в себе опасность возникновения завала на краю. Гораздо безопаснее, хотя и несколько сложнее, специальная подрезка полировальника.

Если подскоблить полировальник, как показано на рис. 45 (или расширить канавки, чтобы площадь фасеток уменьшалась по направлению к периферии), то полировальник при нормальном штрихе в $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ диаметра (т. е. при сдвигании зеркала в каждую сторону на $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ его радиуса) будет сильнее сполировывать стекло по направлению к центру, вследствие чего поверхность зеркала начнет изменяться в нужном для нас направлении: ее кривизна будет становиться тем больше, чем ближе к центру. Прополировав на таком полировальнике минут 10—15, снимем зеркало с полировальника и исследуем его теньвым методом; не забудем, конечно, об отстойке. Если при этом испытании мы заметим некоторое увеличение кривизны по направлению к центру, то необходимо приступить к измерению аберраций; в противном случае продолжим полирование, пока не станет заметен результат.

Для измерения аберраций разметим зеркало на зоны с помощью миллиметровой линейки, положенной по диаметру; как советует проф. Д. Д. Максutow, метки на зеркале сделаем кусочком мыла, воска или парафина. Можно обойтись и без меток, которые приходится возобновлять, так как, разумеется, они стираются каждый раз при возобновлении работ. Указателями могут служить небольшие зубчики, вырезанные в соответствующих местах на узкой полоске жести или картона, навешиваемой горизонтально на зеркало так, чтобы ее край проходил по его диаметру. Еще лучше вдоль горизонтального диаметра зеркала натягивать нитку с укрепленными на ней бусинками или иными отметками зон. На рис. 52 показано размеченное на зоны зеркало.

Будем рассматривать теньвую картину зеркала, форма поверхности которого близка к параболоиду (рис. 53), постепенно продвигая нож Фуко вдоль оптической оси. Начнем с того, что определим **максимальную** аберрацию зеркала. Установим нож сначала в фокусе центральной зоны, стараясь добиться того, чтобы центральная часть зеркала, ограниченная справа и слева двумя

внутренними метками, была равномерно слабо освещена, т. е. была покрыта ровной полутенью. Отметим тогда положение ножа, для чего проведем острым карандашом черту вдоль края брусочка, держащего пробку с ножом. Удобнее, конечно, подложить лист белой бумаги. Вся левая половина зеркала при таком положении ножа будет совершенно темная, вся правая — светлая (нож находится слева от оптической оси, следовательно, своим краем вдвигается в конус лучей слева направо).

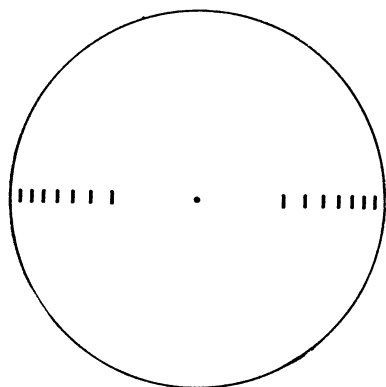


Рис. 52. Разметка зон зеркала.

Затем начинаем постепенно отодвигать нож назад, за фокус центральной зоны. При этом вскоре в левой части центральной области зеркала начнет появляться светлая область, захватывающая все больше и больше левую темную половину зеркала, а вторая половина центральной части начнет покрываться все расширяющейся тенью. Постепенно, по мере отодвига-

ния ножа, светлая область на левой части зеркала будет все шириться; на правой стороне будет одновременно разрастаться соответствующая ей темная область, пока в конце концов свет на левой половине не дойдет почти до края, а правая половина не потемнеет симметрично, также почти до края.

Этот момент соответствует положению ножа в фокусе краевой зоны № 6, которая будет теперь покрыта полутенью, как была покрыта зона № 1, когда нож был в ее фокусе. Отметим это положение ножа карандашной чертой. Если найденная двойная аберрация $2\Delta R_v$ приближается к 4 мм, то поверхность нашего зеркала близка к параболоиду, и необходимо промерить аберрации промежуточных зон, чтобы убедиться в том, что поверхность плавная и, главное, изменяется по тому именно закону, который свойствен параболоиду. При недостаточной величине максимальной аберрации надо еще полировать некоторое время. Однако следует помнить правило, что лучше слегка недокорректировать (т. е. оста-

новиться на меньших величинах, чем вычисленные) зеркало, чем перекорректировать.

Нужно с самого начала усвоить себе то положение, что различных несферических поверхностей бесчисленное

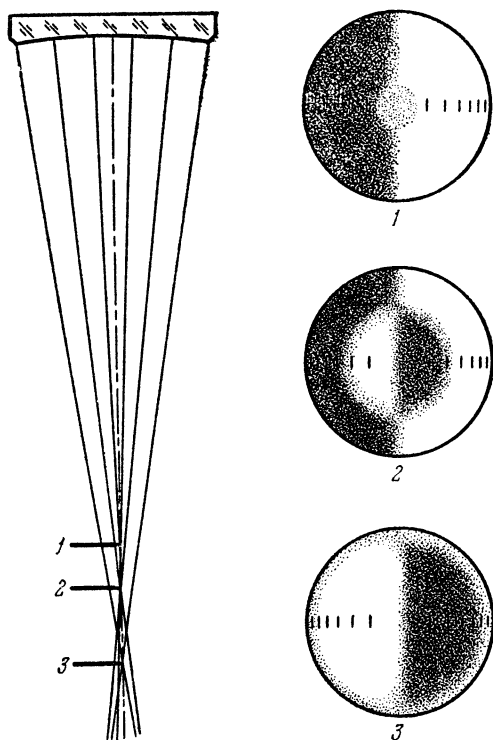


Рис. 53. Вид теневой картины, даваемой параболическим зеркалом (размеченным на шесть зон) при различных положениях ножа Фуко: 1 — нож находится в фокусе центральной зоны; 2 — в фокусе 2-й зоны; 3 — в фокусе 5-й зоны

множество, среди которых мы ищем одну-единственную — параболоид. Ее характеризуют именно те аберрации, которые мы определили по формуле $2\Delta R_y = \frac{y^2}{R_0}$

(или $\Delta R_y = \frac{y^2}{2R_0}$, если источник света движется вместе с ножом) и без измерения которых нельзя достаточно уверенно судить об истинной форме поверхности зеркала. Как мы уже говорили, величину максимальной аберрации параболоида (при подвижном источнике света) мы

очень наглядно представим себе, вспомнив, что она равна стрелке кривизны зеркала. Можно выразить абберрации параболоида и через относительный фокус V . Подставляя в формулу $\frac{D}{2}$ вместо y и $2f$ вместо R , получаем для абберрации выражение $\Delta R_H = \frac{D^2}{16f} = \frac{D}{16V}$ т. е. абберрация (при подвижном источнике света) всегда равна $\frac{1}{16}$ диаметра зеркала (в миллиметрах), деленной на его относительный фокус.

Эти отношения, конечно, верны не только для максимальной абберрации зеркала, но и для абберрации любой его зоны; но, разумеется, практически не имеет особого смысла вычислять абберрации отдельных зон по этой формуле, так как для этого надо было бы сначала находить соответствующие каждой зоне диаметры и относительные фокусы. Для максимальной же абберрации это удобно, так как относительный фокус своего зеркала мы хорошо знаем и, вероятно, запомнили надолго.

Когда максимальная абберрация зеркала стала близка к ожидаемой для параболоида, т. е. достигла у нашего 250-мм зеркала 4 мм (в случае неподвижного источника света), нужно тщательно изучить вид теневой картины при различных положениях ножа, чтобы составить себе общее представление о характере поверхности зеркала и прежде всего о ее плоскости. Ведь величина максимальной абберрации еще мало говорит об абберрациях промежуточных зон зеркала; вообще говоря, может случиться даже и так, что абберрацию вызовет лишь заваленный край, в то время как вся остальная поверхность зеркала осталась сферической. Такой случай, кстати сказать, вовсе не редкость.

Для того чтобы не впасть в такую ошибку, необходимо при каждом испытании обращать внимание на всю поверхность зеркала. Мы уже придерживались этого правила при изготовлении сферического зеркала, но тогда наша задача состояла в том, чтобы добиться одинаковой кривизны всех частей поверхности зеркала, в чем мы убеждались по отсутствию заметных теней при испытании — вся поверхность зеркала казалась плоской, без какого-либо видимого теневого рельефа. Теперь же мы должны добиваться того, чтобы зеркало начало давать при испытании тени и притом совершенно определенного вида и расположения; по этим теням мы должны

с помощью ножа Фуко определить положение фокусов различных зон зеркала.

«Чтение» теневой картины чрезвычайно облегчается, если вместо ножа пользоваться тонкой нитью, натянутой параллельно светящейся щели. Это усовершенствование техники испытания, введенное проф. Д. Д. Максutowым, как мы легко убедимся на опыте, позволяет с гораздо большей уверенностью, а следовательно, и с большей точностью, «нащупывать» центры кривизны различных зон зеркала. Дело в том, что при пользовании ножом поверхность несферического зеркала покрыта тенями, чередующимися с освещенными частями (см. рис. 53). Зона, в фокусе которой находится нож, представляется полуосвещенной («полутень»), а примыкающие к ней резко черные и ярко освещенные части зеркала мешают точному определению этой полуосвещенной зоны на поверхности зеркала.

Наоборот, при пользовании вместо ножа нитью вся поверхность зеркала остается светлой, кроме узкого кольца, в фокусе которого находится нить; оно представляется темным (рис. 54). Сама нить, правда, тоже видна в виде узкой темной полоски, пререзывающей зеркало по вертикальному диаметру (конечно, когда нить находится точно на оптической оси), но это очень мало мешает работе.

Передвигая нить подобно ножу Фуко взад и вперед вдоль оптической оси, мы с большой наглядностью и точностью находим фокус любой зоны; видимое на светлом зеркале теневое кольцо раздвигается и суживается, прямо указывая ту зону, в фокусе которой находится нить. В случае сферической поверхности нить дает, конечно, то же, что и нож, если находится в самом центре кривизны, т. е. «плоскую» картину — равномерное затенение всей поверхности. Вид несферического зеркала при различных положениях нити показан на рис. 54.

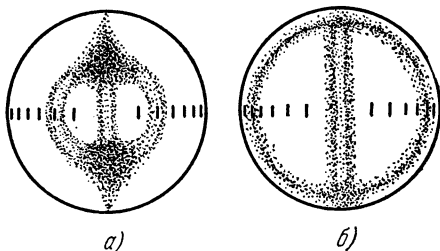


Рис. 54. Теневая картина, получающаяся при использовании нити вместо ножа. *а* — нить в фокусе 2-й зоны; *б* — нить в фокусе 5-й зоны (по Д. Д. Максutowу; 1948).

Надо, однако, сказать, что такие картины получатся лишь в том случае, если зеркало сильно отличается от сферы, т. е. если его зоны сильно разнятся по своим радиусам кривизны. При небольшой величине аберрации мы скорее всего будем наблюдать тень вида, изображенного на рис. 55, в. Здесь не будет кольца, а округлое

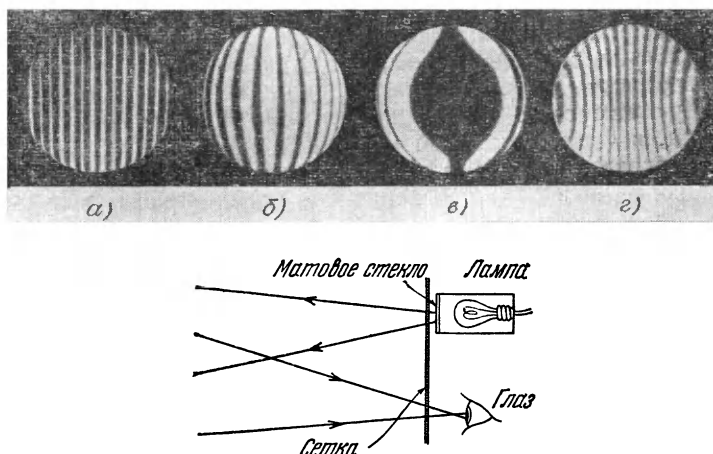


Рис. 55. Вверху: фотографии теневой картины при испытании с помощью частой сетки, действующей как ряд параллельных щелей и нитей; а—сфера с завалом на краю (сетка относительно далеко от фокуса); б—параболоид (сетка ближе к фокусу); в—тот же параболоид (сетка близ фокуса центральной зоны); г—сплюснутый сфероид. Внизу: схема устройства теневое прибора с сеткой, заменяющей щель и нить.

расширение посредине вертикальной полоски — тени от нити; величина этого расширения соответствует диаметру зоны, в фокусе которой находится нить. Поскольку аберрации быстро увеличиваются по мере удаления от центра зеркала, чаще всего бывает, что в фокусах средних зон наблюдается тень типа, изображенного на рис. 55, в, а при отодвигании нити дальше от зеркала к фокусам внешних зон появляется уже теневое кольцо, и центральные зоны зеркала становятся светлыми (см. рис. 53).

Испытание с помощью щели и нити очень чувствительно, если соблюдены некоторые необходимые условия. Напомним, что, как и в случае ножа, необходимо чтобы нить была параллельна плоскости щели; в противном случае уменьшится чувствительность испытания вследствие того, что разные части нити при одном и том

же ее положении будут находиться на различных расстояниях от фокуса одной и той же зоны; наклон же нити в плоскости щели вызовет эффект, равносильный расширению щели, т. е. снизит чувствительность испытания.

Важное значение имеет соответствие толщины нити ширине щели: она должна как раз закрывать просвет щели. Если наша щель имеет ширину $0,03-0,04$ мм, то в качестве нити проще всего использовать тонкий волос, имеющий примерно такую толщину. Нетрудно подобрать и подходящей толщины шелковинку или тонкую проволочку.

Волосок или шелковинку мы натянем на маленькую проволочную или жестяную стойку, закрепив концы каплями смолы (рис. 56). Слегка изгибая стойку, мы легко приведем нить в положение, параллельное щели.

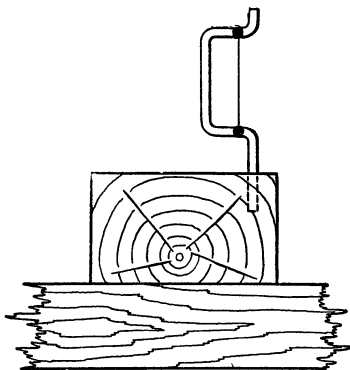


Рис. 56. Нить (волос), натянутая на стойку.

Небольшое упражнение научит нас с достаточной уверенностью устанавливать нить в фокусах различных зон зеркала. В этом отношении очень полезно начать упражняться как можно раньше, еще до того как наше зеркало приняло сферическую форму; те неправильности поверхности, которые неизбежны в процессе изготовления, дадут нам обильный материал для упражнения.

Чрезвычайно удобный прием, позволяющий очень наглядно судить о форме поверхности зеркала, состоит в замене нити частой сеткой (годится самое тонкое шелковое мукомольное сито). В комбинации со щелью вертикальные нити сетки создают ряд параллельных теневых полос, по форме которых легко оценить всю поверхность зеркала (см. рис. 55). Горизонтальные нити, идущие перпендикулярно к щели, при этом совершенно не мешают, так как не видны. Можно использовать сетку и без щели, поместив ее так, чтобы она перекрывала оба конуса лучей, как идущий от источника света, так и отраженный от зеркала. При этом первая часть сетки

будет действовать как ряд щелей, а вторая — как ряд параллельных им нитей. Сказанное поясняет рис. 55 (внизу).

Теперь мы подготовлены к измерению аберраций нашего будущего параболоида.

Прежде всего напомним одно важное обстоятельство, которое мы, вероятно, уже заметили при предварительных упражнениях. При переходе от центра зеркала к его периферии, т. е. при отодвигании нити назад, движение теневого кольца (или расширение вертикальной полосы тени) замедляется. Наоборот, при приближении к фокусу центральной части зеркала тень движется все быстрее и быстрее, а близ самой центральной части зеркала быстро расширяется, покрывая последнюю. Это понятно из табл. 4, содержащей вычисленные значения аберрации: ведь аберрации растут пропорционально квадрату радиуса зоны, следовательно, одинаковому передвижению нити назад (от зеркала) вдоль оптической оси будут соответствовать быстро уменьшающиеся приращение радиуса зон, т. е. все меньшее и меньшее увеличение диаметра кольца полутени. Из этого мы сделаем важный практический вывод: если мы хотим промерить форму поверхности зеркала в ее периферических частях с такой же точностью, как в центральных, то зеркало надо размечать на зоны так, чтобы их радиусы увеличивались пропорционально квадратным корням из ряда целых чисел *).

Будем исходить из того, чтобы приращение зон соответствовало определенному постоянному приращению аберрации. Тогда, очевидно, задавшись определенной величиной приращения аберрации, мы легко рассчитаем радиусы зон, на которые нужно разбить наше зеркало. Примем для нее величину 0,5 мм. Тогда из формулы удвоенной аберрации $2\Delta R_y = \frac{y^2}{R_0}$ (если источник света неподвижен) легко найти нужные радиусы зон. Начиная от центра зеркала, эти радиусы определяются из равенств

$$\frac{y_2^2 - y_1^2}{R_0} = \frac{y_3^2 - y_2^2}{R_0} = \dots 0,5,$$

*) Это не означает, что на практике нужно делать разметку зон с такой скрупулезностью. Достаточно, если зеркало будет размечено на периферии на более узкие зоны, чем вблизи центра. (Прим. Д. Д. Максимова.)

откуда

$$y_2^2 - y_1^2 = y_3^2 - y_2^2 = \dots 0,5R_0.$$

Зная, что полудиамер зеркала равен 125 мм, а $R_0 = 3500$ мм, мы без труда вычислим радиусы всех зон; aberrации будут теперь, начиная с края, падать с каждой последующей зоной на 0,5 мм в направлении к центру зеркала. Составим соответствующую приблизительную таблицу, округлив радиусы зон до 1 мм (табл. 5):

Т а б л и ц а 5

Зона N	\sqrt{N}	Радиус y , мм	Удвоенная aberrация, $\frac{y^2}{R_0}$, мм
9 (край)	3,00	125	4,5
8	2,83	118	4,0
7	2,65	110	3,5
6	2,45	102	3,0
5	2,24	33	2,5
4	2,00	84	2,0
3	1,73	72	1,5
2	1,41	59	1,0
1	1,00	42	0,5
0 (центр)	0,00	0	0,0

Размеченное согласно подобному расчету зеркало схематически изображено на рис. 52 (изображено 7 зон). Как показывают числа нашей таблички (округленные до 0,1 мм), переход от одной зоны к другой, соседней, соответствует изменению величины aberrации на 0,5 мм.

Естественно, возникает вопрос: с какой степенью точности должны мы измерять aberrации нашего зеркала?

Разбор этого вопроса выходит далеко за рамки нашей книги. Но мы попытаемся подойти к нему с практической точки зрения, исходя из тех возможностей, которыми располагает любитель. Прежде всего надо иметь в виду, что для изучения aberrаций надо измерять не только передвижения ножа, но и определять радиус соответствующей зоны. Обращаясь к нашей табличке, мы видим, что чем ближе расположена к краю зеркала зона,

тем скорее растет абберация. Так, вблизи центра зеркала приращение абберации на 0,5 мм соответствует увеличению радиуса зоны на 42 мм, в то время как вблизи края зеркала такое же приращение абберации соответствует увеличению радиуса зоны на 7 мм!

Совершенно ясно, что, глядя на зеркало с расстояния в 3,5 м, вряд ли удастся с достаточной уверенностью оценить расстояния на зеркале, меньшие 2—3 мм. Но даже и эта точность потребует очень хорошего зрения и большой сноровки; легко сообразить, что определить положение тени при испытании зеркала с такой точностью — задача примерно столь же трудная, как точно прицелиться из ружья в яблоко с расстояния в 100 м! Трудность увеличивается еще и тем, что теневая картина лишена такой четкости, которая допускала бы достаточную точность отсчета радиуса зоны.

В образовании изображения наибольшую роль играют внешние части зеркала, поэтому нам нужно обратить главное внимание на абберации краевых зон. При пользовании нитью вместо ножа Фуко видимое на зеркале теневое кольцо можно локализовать точнее, чем «полутень», разделяющую освещенные и темные области зеркала; но и в этом случае вряд ли можно будет ручаться за большую точность, чем 2—3 мм. А это значит, что в наших условиях не имеет смысла пытаться измерять передвижение ножа или нити с точностью, большей чем 0,2 мм, поскольку передвижению ножа на 0,5 мм вдоль оптической оси соответствует передвижение тени только на 7 мм в самой важной (наружной) части зеркала.

Итак, при наших возможностях мы вынуждены удовлетвориться точностью определения продольных перемещений ножа Фуко, равной 0,2 мм.

Попробуем составить представление о величине той ошибки, которую мы можем при этом совершить.

Нам помогут следующие выведенные ранее формулы: минимальное значение относительного фокуса, при котором сферическое зеркало можно не параболить, определяется формулой $V_{\min} = 1,52 \sqrt[3]{D}$, максимальное уклонение параболоида от «ближайшей» сферы вычисляется по формуле $\delta_{\max}^0 = \frac{D}{4096V^3}$, а максимальная абберация параболоида $\Delta R_H = \frac{D}{16V}$.

В следующей таблице приведены результаты вычислений для разных диаметров зеркала D :

$D, \text{ мм}$	V_{\min}	$f_{\min}, \text{ м}$	$\Delta R_H, \text{ мм}$
150	8,1	1,22	1,16
200	8,9	1,78	1,40
250	9,6	2,40	1,62
300	10,2	3,06	1,81

Для всех этих значений $\delta_{\max}^0 = 0,000069$, т. е. $\lambda/8$ для желто-зеленых лучей.

Из этой таблички можно вывести такие следствия.

Хотя при помощи теневого метода Фуко мы такие смещения ножа ΔR_H , безусловно, заметим, ими можно пренебречь из-за малости отклонения δ_{\max}^0 и оставлять зеркало сферическим.

Однако увеличение диаметра приведет к быстрому увеличению фокусного расстояния зеркала, что неудобно для наблюдателя.

Следовательно, если можно выбрать $V_{\min} = 8$ для рефлектора с диаметром $D = 150 \text{ мм}$, то при больших диаметрах надо зеркало обязательно параболизовать.

Посмотрим, что при этом произойдет. В следующей табличке приведены данные для зеркала с диаметром $D = 250 \text{ мм}$, но с другими относительными фокусами:

V	$f, \text{ м}$	$\Delta R_H, \text{ мм}$	δ_{\max}^0	k
9,6	2,40	1,62	0,000069	1,0
7	1,75	2,23	0,000178	2,6
5	1,25	3,12	0,000488	7,1

В последнем столбце указаны отношения δ_{\max}^0 .

Отсюда видно, что при $V = 5$ отклонение параболоида от «ближайшей» сферы в 7 раз превосходит допустимые. Отсюда одновременно видно, что аберрации, достигающие 3,12 мм, а при нашем способе исследования 6,24 мм, настолько велики, что продольные перемещения ножа Фуко следует измерять с точностью, пожалуй, до сотых долей миллиметра!

Поэтому к трудностям шлифовки и полировки, возрастающим вместе с отклонением параболоида от сферы, здесь присоединяется еще и возрастающая трудность испытания. Вот еще почему мы выбрали для 250-мм параболического зеркала не слишком малый относительный фокус, при котором достаточно точное измерение

аббераций нам еще по силам. Выше мы говорили об удобстве теневого испытания параболического зеркала с помощью сетки, работающей подобно ряду параллельных щелей и нитей. Этот способ выгоден в том отношении, что позволяет очень наглядно судить по форме темных полос, пересекающих зеркало, о плавности его поверхности и даже о ее природе; так, если поверхность параболическая, то полосы имеют форму парабол. Но одновременно он позволяет производить измерения с такой же точностью, как способ щели и нити.

В настоящее время при доступности фотопленки с очень прозрачной и мелкозернистой эмульсией (особенно хороша пленка для цветной фотографии) можно фотографическим способом изготовить экран, состоящий из параллельных темных линий, разделенных прозрачными промежутками. Для этого надо изготовить чертеж и сфотографировать его с уменьшением. Чтобы получить экран размером 20×20 мм при числе «щелей» и «нитей», равном по 10 на 1 мм, придется начертить 400 параллельных линий длиной в 400 мм, шириной в 1 мм и разделенных такими же промежутками; линейно уменьшив его при фотографировании в 20 раз, получим то, что нужно. Немалый труд, затраченный на изготовление такого экрана, вполне окупится, так как с его помощью можно почти обойтись без кропотливых промеров абберации промежуточных зон зеркала, а ограничиться измерением абберации одной зоны, если известна максимальная абберация. В самом деле, поскольку испытание в данном случае дает возможность убедиться в плавности поверхности, практически достаточно произвести измерение абберации одной рационально выбранной зоны. Такой зоной не без основания считается зона, обладающая абберацией, равной половине максимальной. Ее радиус $y_{0,5}$, как легко сообразить, составляет около

0,7 полудиаметра зеркала H (точнее, $\frac{y_{0,5}^2}{H^2} = 0,5$, откуда $\frac{y_{0,5}}{H} = \sqrt{0,5} = 0,707$).

При принятой нами разбивке 250-мм зеркала на зоны эта «зона половинной абберации» будет примерно соответствовать зоне № 4 ($y=83$). Для оценки поверхности зеркала достаточно будет, следовательно, проделать следующее: 1) по форме темных полос, видимых при теновом испытании, убедиться в плавности поверхности; 2) отметить положение экрана,

соответствующее центру кривизны нулевой (центральной) зоны; 3) сделать то же для «зоны половинной аберрации» и убедиться, что отметка положения экрана соответствует половине максимальной аберрации. Если аберрация больше или меньше половины максимальной, то зеркало либо «недопараболизировано», либо «перепараболизировано» и нуждается еще в дальнейшей фигуризации.

Итак, мы, наконец, вооружены всем необходимым для того, чтобы действовать дальше.

До сих пор мы довольствовались тем, что просто отмечали положение ножа с помощью карандашной черты. Для измерения аберраций это неудобно. Нужно соорудить себе простейшее устройство, позволяющее делать отсчеты с помощью шкалы. В оптических лабораториях и мастерских применяются точнейшие приборы, в которых движение ножа производится с помощью микрометрического винта, а передвижения отсчитываются на точной шкале. Можно, конечно, выйти из затруднения многими путями, соответственно обстоятельствам. Простейший «прибор» состоит из деревянного прямоугольного желобка, в котором скользит плотно пристроганный к нему массивный брусок, несущий на себе нож или стоечку с нитью. На краю желобка можно пристроить хорошую миллиметровую линейку, по которой нетрудно с точностью до 0,25 мм отсчитывать передвижения бруска с помощью приделанной к нему тонкой указки (хорошую службу может сослужить логарифмическая линейка). Каково бы ни было приспособление, которым мы воспользуемся, оно должно быть непременно как можно устойчивее; понятно, что всякое шатание ножа или нити не только будет мешать, но сделает измерения совершенно ненадежными, в особенности если шатание будет происходить в продольном направлении, вдоль оптической оси. Заметим, что плотно пристроганные деревянные поверхности надо натереть мылом или тальком, чтобы они ходили гладко.

Немного поработав, мы увидим, насколько это деликатное дело — найти положение ножа, при котором являющаяся на зеркале тень как раз касается определенной метки. Малейшая тряска, беспокойствие воздуха, неудобное положение тела при работе и т. д. — все это создает величайшие помехи. Тени дрожат и переливаются, зеркало то гаснет совершенно, то, наоборот, ос-

вещается, тени как будто меняют свою форму, словом, ни о каких точных измерениях при таких условиях не может быть и речи. Поэтому еще раз напоминаем о необходимости заранее все хорошо приладить и проверить. Худшая из помех, конечно, это тряска, происходящая от уличного движения.

Важно устроить в комнате освещение, которое, с одной стороны, было бы достаточно для отсчетов по шкале, а с другой, — не мешало бы различению теневой картины. Часто в комнате при работе бывает как раз достаточное освещение, происходящее от неполного затемнения, от небольшого света, прорывающегося из теневого прибора, и т. п. Если в комнате совершенно темно, то надо приладить какой-нибудь очень слабый источник света, загородив его так, чтобы он не светил никуда, кроме как на линейку, по которой мы делаем отсчеты.

Особое внимание надо уделить движению ножа (нити) в поперечном направлении, т. е. вправо и влево. Если вся установка устроена аккуратно, то при продольных передвижениях нож должен двигаться точно по оптической оси; таким образом, будучи установлен однажды на оси, он уже значительно не отойдет от нее вправо или влево. Чтобы перекрыть ножом или нитью точку пересечения лучей, достаточно будет поэтому самого небольшого бокового передвижения. Обычно такие небольшие передвижения достигаются легким нажатием руки на одну сторону подпорки, несущей теневое устройство, т. е. прогибание стола или деревянного желобка производит вполне достаточное отклонение ножа или нити вправо или влево; при помощи такого легкого покачивания посредством нажатия очень удобно «нащупывать» самую точку пересечения лучей.

Отсчет по линейке для каждой зоны нужно повторить несколько раз, по возможности не менее десяти раз, чтобы, разделив потом сумму сделанных отсчетов на их число, получить среднее значение, которое будет гораздо точнее, чем каждый отсчет в отдельности. По каждой зоне очень удобно записывать отсчеты столбцами в виде таблички, затем вычислить среднее по каждому столбцу и найти разности между этими средними для соседних зон; эти разности и будут абберациями каждой зоны. При работе полезно иметь перед глазами вычисленные теоретические величины абберации.

Вместо разметки зон на зеркале применяется еще и такой способ: на зеркало накладывается непрозрачный экран с прорезанными в нем дугообразными окнами (диафрагмами), расположенными (как и наши метки) на горизонтальном диаметре зеркала. Сравнивая освещенность пар окон, расположенных на одинаковых расстояниях вправо и влево от центра, можно судить о том, в фокусе какой зоны находится нож. Преимуществом такого способа некоторые считают то, что он позволяет выделить определенные зоны, освободившись от сложной и изменчивой картины теней, покрывающих поверхность зеркала. Однако на деле пользоваться им очень трудно, так как чрезвычайно мешает блеск (вызываемый дифракцией) на краях окон, затрудняющий оценку освещенности.

Если мы подвергнем теперь наше параболическое зеркало окулярной пробе по искусственной звезде, как делали это при испытании готового сферического зеркала, то обнаружим, что оно дает заметную аберрацию. При точной установке на фокус мы увидим в сильный окуляр довольно резкое ядрышко изображения «звезды», окруженное большим ореолом с быстро спадающей к краям яркостью; зафокальное и предфокальное изображения будут различны: первое будет обнаруживать «сгущение» света на периферии светлого кружка, второе — в центре (см. рис. 47).

В такой форме проба не представляет для нас интереса. Но если мы станем удалять искусственную звезду, то лучи будут приближаться к параллельному пучку, пока условия не приобретут сходства с теми, которые существуют при наблюдении настоящей звезды.

Нам осталось коснуться еще одного вопроса, имеющего большое практическое значение, именно о тех изменениях формы поверхности зеркала, которые вызываются колебаниями температуры. Мы уже убедились на опыте при изготовлении зеркала, насколько меняется форма его поверхности вследствие нагревания, вызываемого трением о полировальник.

В еще большей степени надо учитывать влияние колебаний температуры на форму поверхности зеркала, когда из комнаты оно попадает под открытое небо. Если при изготовлении зеркала достаточно было подождать некоторое время, чтобы вся толща зеркала приняла температуру, одинаковую с постоянной температурой

комнаты, то при работе под открытым небом дело сильно меняется, так как температура воздуха не остается постоянной (при ночных наблюдениях она чаще всего падает), и зеркало, следовательно, испытывает изменения своей формы, зависящие от его охлаждения и сжатия. Если сильнее охлаждается задняя поверхность, то в силу ее сжатия зеркало как бы «развертывается», становясь более длиннофокусным; при этом, однако, обычно кривизна его поверхности изменяется неравномерно: фокус наружных зон удлиняется сильнее, чем фокус центральных. Таким образом, сферическое зеркало приобретает черты, свойственные параболическому зеркалу, а параболическое зеркало уклоняется в сторону гиперболического. Если, следовательно, сферическое зеркало может оказаться в выгодном положении при его использовании в телескопе, то работа параболического зеркала может страдать оттого, что разница кривизны его краевых и центральных частей станет чрезмерно высока, следствием чего будет появление вредных аберраций. Поэтому при изготовлении зеркала лучше «недопараболизировать», чем «перепараболизировать» его, т. е. лучше не доводить параболизацию до тех значений аберраций, которые были заранее вычислены, а остановиться на несколько меньших величинах.

Влияние изменения температуры воздуха при наблюдениях сказывается неприятным образом особенно на форме поверхности самой внешней зоны крупного зеркала («эффект края»), часто приобретающей при этом завал. Отсюда ясно, что незначительный завал, которым мы могли законно пренебречь при испытании в комнате, усилится при условиях наблюдения настолько, что станет вредить качеству изображения. Это обстоятельство заставляет нас не жалеть труда на устранение завала.

Наконец, резкие колебания температуры могут вызвать неправильные изменения формы поверхности зеркала, если стекло, из которого оно сделано, плохо отожжено или неоднородно по своему составу. Автор располагал 250-мм зеркалом, которое обладало вполне удовлетворительной поверхностью в комнате или при теплой погоде. Однако при охлаждении появлялся близ его средней части большой и резкий бугор, а даваемые им изображения сильно портились. Это зеркало было изготовлено автором из очень плохо отожженного стекла.

Г Л А В А IV

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ (ДИАГОНАЛЬНОЕ) ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

1. Роль плоского зеркала в рефлекторе Ньютона

В избранной нами простейшей (ньютоновской) системе телескопа-рефлектора конус лучей, отраженных главным зеркалом, выводится в боковое отверстие трубы, где помещается окуляр. Как мы видели, для этого служит небольшое плоское зеркало, помещающееся внутри трубы таким образом, чтобы «перехватить» весь конус лучей и отбросить его вбок. Эта чрезвычайно простая по своей идее конструкция оказывается, однако, на практике далеко не столь легко выполнимой, так как качество плоского зеркала, отражающего лучи, отброшенные главным зеркалом телескопа, столь же важно, как и качество главного зеркала. Это вполне понятно: раз все лучи, идущие от главного зеркала, отражаются от поставленного на их пути вспомогательного зеркала, всякое отклонение формы поверхности последнего от точной плоскости будет иметь не менее вредные последствия, чем отклонения формы поверхности главного зеркала от точной сферы (или параболоида). Собственно говоря, к плоскому зеркалу надо в данном случае предъявлять даже более строгие требования, чем к вогнутому, так как лучи падают на его поверхность под значительными углами (около 45°), тогда как лучи, падающие на главное зеркало, образуют очень небольшие углы с перпендикуляром. Поэтому в плоском зеркале страшны не только «ошибки формы», но и «ошибки кривизны».

Как мы уже отмечали, искажение хода лучей вспомогательным плоским зеркалом, а также потери света вследствие вторичного отражения, были причиной того, что в ранний период телескопостроения на заре оптической техники, когда изготовление точных плоских поверхностей представляло непреодолимые трудности, предпочитали обходиться вовсе без вспомогательного зеркала. Главное зеркало располагали наклонно к направлению падающих лучей, так, чтобы главный фокус зеркала оказался вне трубы телескопа. Теперь эта система может удовлетворить наблюдателя лишь при одном условии, соблюдение которого, как мы сейчас увидим, представляет гораздо большие трудности, чем изготовление хорошего плоского зеркала.

Дело в том, что наклон зеркала под значительным углом (при относительном фокусе, равном 8, этот угол составит не менее $1^{\circ},8$) вызовет очень сильную порчу изображения вследствие астигматизма и кóмы, достигающих чрезвычайно высокой степени на таком большом расстоянии от оси, что равносильно наблюдению далеко за пределами полезного поля зрения.

Избежать этого можно лишь одним способом: наклонное зеркало должно быть боковой частью параболаида, имеющего по крайней мере вдвое больший диаметр. Такое «внеосевое» параболическое зеркало изготовить возможно, но чрезвычайно трудно. Изготовить же вполне удовлетворительное плоское зеркало, пользуясь способами, разработанными многими поколениями оптиков, в настоящее время может каждый любитель. Опыт, приобретенный при изготовлении главного зеркала телескопа, окажет в этом деле большую помощь.

2. Призма полного внутреннего отражения вместо диагонального зеркала

В литературе нередко можно встретить указание, что трудности изготовления плоского зеркала настолько велики, что браться за него не имеет смысла, а лучше постараться подобрать хороший обрезок зеркального стекла, обладающий точно плоской поверхностью.

Подобные советы — чистейшее недоразумение. Не говоря уже о том, что качество обработки зеркального стекла не удовлетворяет тем высоким требованиям, которые должны предъявляться к астрономической оптике,

надо помнить, что, как бы ни была точна поверхность, она испортится при разрезании стекла в силу коробления, вызываемого остаточными внутренними натяжениями. При таких условиях надежда найти обрезок зеркального стекла с оптически точной плоской поверхностью имеет немногим более оснований, чем надежда найти точно сферическое зеркало среди боя стеклянной посуды.

Другое дело — попытаться подобрать прямоугольную призму полного внутреннего отражения, которая нередко употребляется вместо плоского зеркала (рис. 57). В одном отношении призма представляет даже преимущество перед зеркалом: поскольку в ней происходит полное внутреннее отражение, отпадает нужда в серебрении или алюминировании, уменьшается,

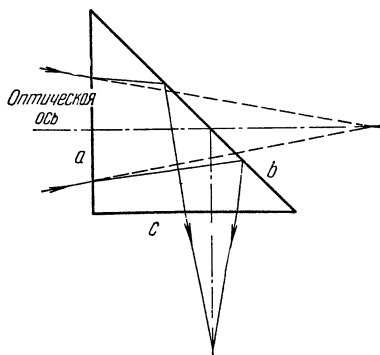


Рис. 57. Призма полного внутреннего отражения. Лучи от главного зеркала падают на катет a , испытывают полное внутреннее отражение от гипотенузы b и выходят через катет c .

следовательно, потеря света вследствие поглощения и рассеяния света металлическим слоем; отпадает также необходимость в возобновлении этого нежного слоя. Но призма имеет и свои недостатки: дополнительные аберрации, поглощение света в стекле.

Кроме того, достать действительно хорошую призму можно лишь случайно; сделать же ее самому гораздо труднее, чем зеркало. Трудность изготовления призмы вызывается не только тем, что у нее три рабочие поверхности, но и необходимостью достать высококачественное оптическое стекло. Поэтому мы настоятельно советуем не полагаться на случайную удачу, а, не боясь неизбежных трудностей, самому взяться за изготовление плоского зеркала для своего телескопа.

3. Размеры и форма диагонального зеркала

Перед тем как приступить к изготовлению плоского диагонального зеркала, нам нужно разобрать вопрос о его размерах и форме (очертаниях). Поскольку назначение вспомогательного зеркала телескопа системы

Ньютона состоит в выведении изображения в боковое отверстие трубы, чтобы там его можно было рассматривать в окуляр, фотографировать и т. д., это зеркало должно быть помещено на совершенно определенном расстоянии от главного фокуса зеркала. Это расстояние равняется, как ясно из рис. 58, сумме радиуса трубы (которая шире главного зеркала) и некоторого дополнительного расстояния, на которое желательно вывести фокус наружу. Вполне понятно, что от положения зеркала на оси зависит и выбор его размеров; если сделать зеркало слишком малым, то оно не вместит всего конуса лучей, идущих от главного зеркала, а слишком большие размеры зеркала вызовут напрасное экранирование (заслонение) падающего света его краевыми частями. Таким образом, рассчитать размеры будущего вспомогательного зеркала можно, лишь исходя из расчета всего телескопа. Проведем этот несложный расчет для нашего 150-мм зеркала, обладающего фокусным расстоянием в 1275 мм. Читатель без труда проведет его потом для любого иного зеркала.

Чтобы определить диаметр трубы нашего будущего телескопа, надо знать ее длину и задаться максимальным поперечником поля зрения, которым должен обладать телескоп. Что касается длины трубы, то она должна

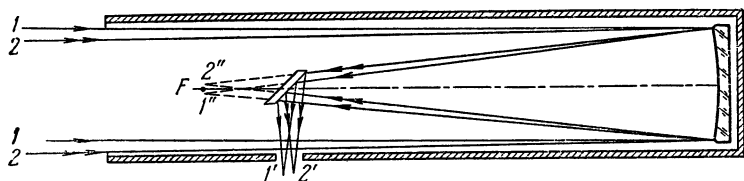


Рис. 58. Общая схема хода лучей в рефлекторе системы Ньютона. Параллельные лучи от звезд 1 и 2 после отражения от главного вогнутого зеркала и от плоского диагонального зеркала собираются в точках 1' и 2', где образуют изображения этих звезд: в данном случае звезды 1 и 2 лежат на диаметрально противоположных краях поля зрения, величина которого определяется внутренним диаметром (отверстием) трубы.

немного превосходить фокусное расстояние; примем ее равной 1300 мм. Совершенно понятно, что диаметр трубы должен быть больше диаметра зеркала, в противном случае лучи звезды упадут на всю поверхность зеркала лишь в том случае, если оптическая ось зеркала точно нацелена на эту звезду; лучи всякой иной звезды, находящейся в стороне от оси, будут частично заслоняться краем трубы (рис. 58). Иными словами, ширина трубы

должна быть приведена в соответствие с размером поля зрения.

Каким полем зрения следует задаться? Очевидно, что, разделив разность диаметров трубы и зеркала на длину трубы, мы получим поперечник полезного поля зрения в долях радиана (радиан — угол, длина дуги которого равна ее радиусу: 1 радиан $\approx 57^\circ,3$).

Если исходить из диаметра максимального полезного поля зрения в 1° (удвоенного видимого диаметра Луны или Солнца), то мы должны будем внутренний диаметр трубы сделать больше, чем диаметр зеркала, приблизительно на $\frac{1}{57}$ ее длины. В нашем случае внутренний диаметр трубы должен быть, следовательно, равен $150 + \frac{1300}{57} \approx 173$ мм, а линейный поперечник полез-

ного поля зрения в фокальной плоскости при этом составит 22 мм. Округлив величину внутреннего диаметра трубы до 180 мм и накинув 10 мм на толщину стенки трубы, примем наружный диаметр трубы равным 200 мм.

Если мы поместим центр вторичного (плоского вспомогательного) зеркала на оптической оси трубы на расстоянии 100 мм от главного фокуса (разумеется, по направлению к главному зеркалу), то главный фокус окажется в боковом отверстии трубы как раз на уровне ее наружной боковой поверхности. На практике удобнее выводить главный фокус несколько далее наружу, что потребуется в ряде случаев, например, при использовании приспособлений для фотографирования небесных тел. Так, например, если мы захотим вынести главный фокус на 20 мм из трубы, то нам придется расположить плоское зеркало на расстоянии 120 мм от главного фокуса. Если какое-нибудь приспособление потребует большего выноса, то, естественно, вспомогательное зеркало придется соответственно передвинуть еще ближе к главному зеркалу, исходя из желаемого выноса главного фокуса. Какие же размеры придется придать плоскому зеркалу в таком случае?

Нередко приходится встречать указание, что размер малого зеркала определяется поперечником конуса лучей (вершина которого в главном фокусе) на том расстоянии от главного фокуса, где помещается малое зеркало (рис. 59). Нет ничего ошибочнее такого совета. Читателю должно быть совершенно ясно, что зеркало такого размера вместит лишь конус, образованный

лучами одной-единственной звезды, на которую нацелена оптическая ось, так как лучи от всякой другой звезды, находящейся чуть в стороне от центра поля зрения, уже не будут полностью отражаться малым зеркалом, а частично минуют его. Иными словами, телескоп, снабженный диагональным зеркалом столь малого размера, может работать всей поверхностью своего главного зеркала лишь при наблюдении в самом центре поля зрения, а по направлению к краям поля зрения все большая и большая часть света, отраженного главным зеркалом, будет

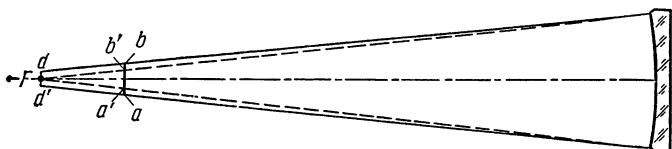


Рис. 59. Определение размера диагонального зеркала по соотношению между длиной малой оси эллиптического диагонального плоского зеркала и полем зрения. Только при длине малой оси, равной ab , зеркало перехватит весь конус лучей, соответствующий заданному полю зрения da' ; зеркало с малой осью $a'b'$ направит в окуляр все лучи только от одной звезды, расположенной в самом центре поля зрения (т. е. на оптической оси главного зеркала).

проходить мимо диагонального зеркала и, следовательно, не попадет в окуляр. Это явление называется *виньетированием*. Диагональное зеркало недостаточно большого диаметра будет действовать наподобие диафрагмы, загораживающей тем больше лучей, чем больше их наклон к оси, т. е. чем звезда дальше от центра поля зрения. Это вредное «винjetiрующее» действие слишком малого плоского зеркала не только отнимает свет и делает изображения светил, лежащих не в центре поля зрения, бледнее, но, что еще хуже, снижает разрешающую силу, т. е. способность телескопа показывать детали наблюдаемого светила (мелкие подробности на Луне и планетах, способность разделять тесные пары звезд и т. п.).

Как видно из рис. 59, диагональное зеркало должно иметь такие размеры, чтобы перехватить все лучи, образующие усеченный конус, основанием которого является главное зеркало, а усеченная вершина представляет максимальное полезное (т. е. не виньетированное) поле зрения в фокальной плоскости.

Простой геометрический расчет (который читатель, конечно, проведет сам, пользуясь рис. 59) позволит вывести приближенную формулу, с помощью которой легко определить размеры диагонального зеркала. Если D —

диаметр главного зеркала, d — поперечник поля зрения (линейный), f — фокусное расстояние главного зеркала, то длина малой оси эллиптического диагонального зеркала b найдется из следующей приближенной формулы:

$$b \approx d + \frac{r(D-d)}{f},$$

где r есть расстояние центра диагонального зеркала от точки фокуса главного зеркала, равное в нашем случае 120 мм. Подставляя в эту формулу значения всех указанных конструктивных характеристик для нашего зеркала, у которого $D = 150$ мм и $f = 1275$ мм, получим

$$b = 22 + \frac{120 \cdot (150 - 22)}{1275} \approx 34 \text{ мм.}$$

Следовательно, согласно этой формуле (имеющей широкое хождение среди любителей телескопостроения) малая ось эллиптического зеркала должна в нашем случае иметь длину не менее 34 мм для того, чтобы телескоп мог работать при полезном поле поперечником в 22 мм, соответствующем примерно 1° . Если вместо эллиптического мы воспользуемся круглым зеркалом, то ему нужно придать диаметр, равный $34 \cdot \sqrt{2} \approx 48$ мм.

Легко, однако, видеть из рис. 60, что эти расчеты, из которых исходит большинство авторов, не вполне верны. Они были бы совершенно верны лишь в том случае, если бы лучи, отраженные главным зеркалом, были перпендикулярны к поверхности нашего плоского зеркала, вернее, если бы оно было перпендикулярно к оси пучка этих

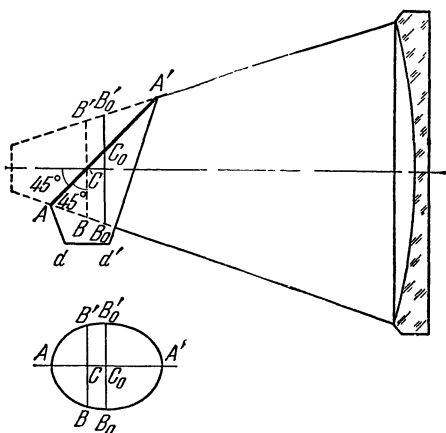


Рис. 60. Действительные геометрические отношения между размерами диагонального зеркала и полем зрения. Для обеспечения поля зрения dd' необходимо придать диаметру круглого зеркала (или большой оси эллиптического зеркала) длину AA' . Как видно из чертежа, действительная малая ось диагонального зеркала B_0B_0' имеет большую длину, чем вычисленная по формуле, т. е. BB' . Это видно еще яснее на нижней части рисунка, где показано диагональное зеркало в плане; очевидно, что BB' — не малая ось, хотя и проходит через точку C , лежащую на оптической оси главного зеркала.

лучей. В действительности же плоское зеркало стоит наклонно (под углом в 45°) к оси конуса лучей, который оно должно отразить в окуляр, ось которого перпендикулярна к направлению лучей, идущих от звезды. Поэтому величина, которую мы принимаем за малую ось эллиптического диагонального зеркала, есть в действительности диаметр сечения конуса лучей плоскостью, перпендикулярной к оси последнего. Отсюда ясно, что, вычисленная по ней длина большой оси эллиптического зеркала будет меньше требующейся, т. е., иными словами, реальное эллиптическое зеркало, пригодное для заданного нами поля зрения, должно быть несколько большего размера, иначе оно не перехватит всего конуса лучей, соответствующего полю зрения в 1° . Впрочем, эта ошибка будет значительной лишь при большом относительном отверстии, при малом же относительном отверстии, как в нашем случае, она не столь значительна. В самом деле, здесь речь будет идти о столь небольших величинах, что о них можно особенно не беспокоиться. При большом же относительном отверстии погрешность, вызванная неточностью приведенной выше формулы, станет уже совершенно недопустимой.

Исходя из сказанного, мы поступим, пожалуй, лучше всего, если, вовсе отказавшись от расчетов, определим нужный нам размер диагонального зеркала просто графически, т. е. посредством вычерчивания. Для этого надо в определенном масштабе (1 : 2 или 1 : 3) тщательно вычертить на хорошей бумаге схему хода лучей в нашем рефлекторе, исходя из его конструктивных данных: линейного диаметра поля зрения (равного по нашему условию $f/57$), длины трубы, фокусного расстояния и диаметра главного зеркала и, наконец, «выноса» изображения, определяющих расстояние центра диагонального зеркала от главного зеркала. Величину большой оси эллиптического зеркала (она же будет и диаметром круглого зеркала) нетрудно таким способом определить с точностью до 0,5 мм; этого более чем достаточно. Длину малой оси мы, разумеется, найдем делением длины большой оси на $1,41 (\sqrt{2} = 1,41)$.

Остается коснуться вопроса о потерях света, вызываемых диагональным зеркалом. Разумеется, эллиптическое зеркало с этой стороны заслуживает предпочтения перед круглым, так как, проектируясь на главное зеркало в виде кружка, оно загораживает почти в полтора

раза меньше света, чем круглое зеркало, которому придется придать диаметр, равный длине большой оси эллиптического зеркала, и которое будет, конечно, проектироваться на главное зеркало в виде эллипса. Несложный расчет покажет нам, что потери света и в том и в другом случае не столь велики, чтобы их бояться. В самом деле, количество света, загороженного эллиптическим зеркалом, будет так относиться ко всему количеству света, отраженного главным зеркалом, как квадрат малой оси эллиптического зеркала относится к квадрату диаметра главного зеркала. Увеличив расчетную длину малой оси эллиптического зеркала (исходя из нашего предыдущего разбора) с 34 до 37 мм, мы потеряем $17^2/150^2 \approx 0,06$ или около 6% света. Круглое же зеркало, которое должно иметь диаметр $37 \cdot \sqrt{2} \approx 52$ мм, загорит вместе с оправой до 12% света.

Таким образом, в худшем случае (т. е. при использовании круглого зеркала) около 88% света, отраженного главным зеркалом, все-таки сможет быть использовано наблюдателем. Поэтому, принимая во внимание трудность изготовления плоского зеркала эллиптического очертания, мы сделаем правильно, остановившись на диагональном зеркале круглого очертания.

Указанные потери света являются, конечно, минимальными. На деле они будут несколько больше уже по одному тому, что диагональное зеркало должно еще быть помещено в оправу, которая заслонит некоторое дополнительное количество света. Но если потери света в случае круглого зеркала достигнут даже 15%, то и тогда они окажутся не столь большими, чтобы причинить серьезный ущерб работе телескопа.

При нашем расчете размеров диагонального зеркала мы исходили из того, чтобы обеспечить в фокальной плоскости главного зеркала полезное (невиньетированное) поле в 1°, линейный поперечник которого, как мы видели, составит около 22 мм для 150-мм зеркала с фокусным расстоянием в 1275 мм. При таком же угловом диаметре поле зрения для зеркала с фокусным расстоянием в 1750 мм будет уже иметь поперечник свыше 30 мм. Поскольку передняя (полевая) линза окуляра редко бывает больше 20 мм в поперечнике, такое поле зрения уже не будет вмещаться в него; однако имеющийся запас может очень пригодиться в некоторых случаях, например, при фотографировании неба.

4. Изготовление плоского диагонального зеркала

Выше, в связи с испытанием параболического зеркала, мы говорили о трудности изготовления плоских поверхностей. Но это относилось к плоским зеркалам большого размера. Маленькое же плоское зеркало, безусловно, по силам тому, кто уже приобрел опыт в работе над главным вогнутым зеркалом. Решающую роль в достижении успеха играет здесь, как и при изготовлении вогнутого зеркала, испытание обрабатываемой поверхности, с помощью которого постоянно следят за ходом работы с тем, чтобы направлять ее должным образом. Таким доступным для любителя способом является так называемый *интерференционный* способ.

Интерференционный способ, широко применяющийся в оптической промышленности для контроля изготавливаемых оптических поверхностей малого и среднего размера, основан на наблюдении интерференционных полос, видимых при рассматривании в отраженном свете двух прозрачных тел, например, стекол, тесно сближенных своими оптополированными поверхностями.

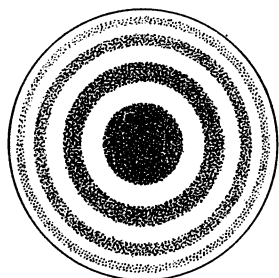


Рис. 61. Вид интерференционных полос («колец Ньютона»), возникающих при наложении слегка выпуклой стеклянной поверхности на плоскую.

Легче всего наблюдать интерференционные полосы, приложив выпуклую линзу малой кривизны (с радиусом кривизны порядка нескольких метров) к куску зеркального стекла. При рассматривании в падающем свете (лучше рассеянном) мы увидим вокруг той точки, где линза касается поверхности стекла, ряд концентрических радужных колец, известных под названием «колец Ньютона» (рис. 61). Если бы мы могли рассматривать эту картину сквозь светофильтр, выделяющий узкую область спектра, то мы увидели бы систему темных колец, разделенных светлыми промежутками.

При рассматривании в белом свете мы увидим уже цветные кольца, причем фиолетовый край внутреннего кольца будет обращен к центру всей системы колец, а красный — к периферии. Дальше от центра цветовая картина начнет усложняться: фиолетовые края внешних

колец будут накладываться на красные края внутренних, и мы будем наблюдать цвета самых различных оттенков.

В белом свете обычно можно видеть не более пяти колец; с красным светофильтром их можно насчитать до двадцати. Нетрудно заметить, что ширина колец убывает по направлению к периферии.

Из этого простого наблюдения мы легко сделаем тот вывод, что вид и расположение интерференционных полос зависят от расстояния между поверхностями, приложенными друг к другу; в нашем случае вся картина определяется тем, что шаровая поверхность линзы касается плоскости в одной точке, а остальные точки плоскости находятся от поверхности линзы на расстояниях, пропорциональных квадрату их удаления от точки касания, т. е. квадрату радиуса кольца.

Система колец Ньютона в известной мере напоминает систему *горизонталей* — линий, соединяющих на географической карте точки поверхности, находящиеся на одинаковой высоте над уровнем моря. Каждое кольцо соответствует в нашем случае точкам линзы, находящимся на одинаковой «высоте» над уровнем плоского стекла.

Совсем уже похожи на горизонтали неправильные, извилистые интерференционные полосы, получающиеся при складывании двух кусков зеркального стекла невысокого качества, т. е. не обладающего достаточно ровной поверхностью.

Из физики известно, что так называемая ширина интерференционной полосы, т. е. расстояние между серединами двух соседних темных полос, соответствует изменению расстояния между поверхностями, равному половине длины волны света соответственного цвета. Поэтому очень важно запастись хорошим светофильтром, который позволил бы наблюдать всю картину гораздо яснее в узком участке спектра *). Можно воспользоваться и монохроматическим желтым светом натриевого пламени, который легко получить от газовой горелки или спиртовой лампочки, поместив в пламя клочок асбеста, пропитанный раствором поваренной соли, или

*) О светофильтрах и их изготовлении собственными силами см.: В. П. Цесевич, Что и как наблюдать на небе. Изд. 4-е, «Наука», 1973, § 35.

просто бросая на фитиль небольшие порции мелкоистолченной соли. Наконец, если удастся достать неоновую или ртутную лампу, то она также может быть использована в качестве источника света для испытания.

Если бы вместо выпуклой и плоской поверхностей мы приложили друг к другу две точно плоские стеклянные пластинки, то вместо колец получили бы совершенно прямые интерференционные полосы (рис. 62). Эти по-

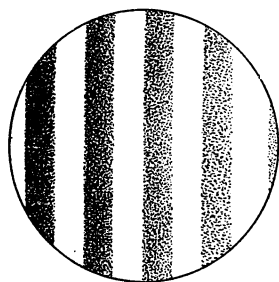
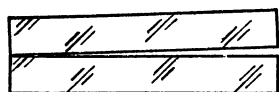


Рис. 62. Вид интерференционных полос при складывании двух точно плоских стекол.

лосы были бы обращены своими красными краями в ту сторону, где расстояние между поверхностями стекол больше, а фиолетовыми — в ту, где они сближены сильнее. Кроме того, контраст полос тем выше, чем больше сближены стекла (первая полоса — в месте соприкосновения стекол — контрастнее последней). Всякое же искривление полос указало бы на существование в соответственном месте выпуклости или вогнутости поверхности, величину которых можно непосредственно измерить по искривлению полос: очевидно, что стрелка кривизны полос является мерой отклонения данной части

поверхности от плоскости в полуволнах света. В языке оптиков поэтому существуют выражения: «ошибка в полполосы», «выпуклость в четверть полосы» и т. д., вместо «ошибка в $\frac{1}{4}$ длины волны света», «выпуклость в $\frac{1}{8}$ длины волны света».

Если сложенные плоские поверхности вполне чисты и, следовательно, ничто не мешает им сблизиться предельно тесно, то картина интерференционных полос не останется неизменной: мы увидим, что при сближении плоскостей полосы постепенно расширяются и уменьшаются в числе, пока на стекле не останется лишь одна полоса, занимающая всю его поверхность. Если смотреть в белом свете, то можно будет заметить, как эта полоса, вначале радужная, будет продолжать раздвигаться, пока не останется один какой-либо цвет, заливающий все стекло. Если осторожно приподнять верхнее стекло с одного края, то снова появятся узкие и многочисленные па-

параллельные полосы, затем повторится то же явление: под действием собственной тяжести верхнее стекло начнет «оседать» (за счет вытеснения разделяющего слоя воздуха), приближаясь к нижнему, и полосы на наших глазах начнут «разбегаться», пока снова не останется какой-либо один цвет. Однако если поверхности совершенно плоские, полосы все время остаются прямыми.

В оптическом производстве для контроля изготавливаемой плоской поверхности применяется «пробное стекло» — пластинка, поверхность которой представляет собой плоскость высокой точности; во избежание деформаций от колебаний температуры пробные стекла обычно делаются из пирекса или даже из плавленного кварца. Если любителю удастся приобрести пробное стекло, то его задача значительно упростится. В противном случае необходимо выходить из затруднения своими силами, по существу, прибегнуть к тому же методу, который применяется в мастерских для первоначального изготовления пробных стекол.

Легко понять, что если у нас имеются два стекла, кривизна поверхности которых неизвестна, мы никак не можем определить эту кривизну путем наблюдения интерференционных полос, появляющихся при их складывании. Ясно, что интерференционные полосы покажут, если можно так выразиться, лишь относительную форму поверхности стекла. Так, например, проба одинаково покажет искривление полос, соответствующее выпуклости, и в том случае, когда оба стекла выпуклые, и если одно выпуклое, а другое плоское или даже вогнутое. Может получиться и так, что интерференционные полосы окажутся прямыми, как в случае плоской поверхности, в действительности же одно стекло вогнутое, а другое обладает выпуклой поверхностью с таким же радиусом кривизны *). Иными словами, попытка определить кривизну поверхности, используя в качестве пробного другое стекло, кривизна поверхности которого также не известна, равносильна попытке решить одно уравнение с двумя неизвестными.

Наоборот, задача становится вполне определенной, если у нас не два, а три стекла. Тогда мы легко можем составить три уравнения, необходимые для нахождения

*) Между прочим, это будет именно тем случаем, с которым имеют дело при массовом производстве небольших линз, поверхность которых контролируют с помощью пробных стекол.

всех трех неизвестных. В самом деле, условимся относительную вогнутость считать отрицательной величиной, выпуклость — положительной. Складывая попарно наши стекла в трех возможных комбинациях, выразим наблюдающуюся кривизну интерференционных полос в отношениях стрелки кривизны полосы к ширине этой же полосы (в «числе полос», выражаясь языком оптиков). Если, например, стрелка кривизны вдвое превосходит ширину полосы, то говорят, что «кривизна равна двум полосам».

Как отличить вогнутость от выпуклости по форме интерференционных полос, подробно объяснено дальше.

Допустим, мы получили следующие результаты от складывания стекол № 1 с № 2, № 1 с № 3 и № 2 с № 3:

$$\text{№ 1} + \text{№ 2} = -1 \text{ (вогнутость)}$$

$$\text{№ 1} + \text{№ 3} = -2 \text{ (вогнутость)}$$

$$\text{№ 2} + \text{№ 3} = +1 \text{ (выпуклость)}.$$

Решая эти уравнения обычным способом, находим: № 1 = -2, № 2 = +1, № 3 = 0. Это значит, что стекло № 1 имеет вогнутость в две полосы, стекло № 2 — выпуклость в одну полосу, а стекло № 3 имеет нулевую кривизну, т. е. точно плоское. Этот «способ трех стекол» до сих пор и применяется в оптических мастерских для изготовления пробных стекол и вообще точных плоскостей малого и умеренного размера.

Теперь мы можем обратиться к самому изготовлению плоского круглого зеркала.

В качестве материала лучше и выгоднее всего использовать обыкновенное зеркальное стекло, если только оно хорошо отождено. Для будущего зеркала небольших размеров обычная толщина зеркального стекла (7—12 мм) совершенно достаточна.

Если любитель имеет доступ к вертикальному сверлильному станку, то проще всего воспользоваться трубчатым сверлом (рис. 63), которое можно изготовить из тонкостенной трубы из мягко отожденной стали или красной меди (внутренний диаметр должен быть на 1 мм больше нужного диаметра стеклянного кружка); сверло можно снабдить глубокими прорезями на рабочем краю. Необходимо хорошо центрировать его относительно оси, зажимающейся в патрон сверлильного станка, чтобы оно не «било». Если нет сверлильного станка, то можно

устроить примитивное приспособление, вроде изображенного на рис. 63 справа; вращение сверла производится в данном случае с помощью «лучка» или рукоятки.

Быстрее всего, конечно, работа идет при помощи сверлильного станка. Установив его на наименьшую скорость, сверлим стекло без сильного нажима с помощью нашего трубчатого сверла, все время подкладывая карборунд № 200, разведенный водой в жидкую кашицу. Чтобы избежать разбрызгивания, необходимо устроить

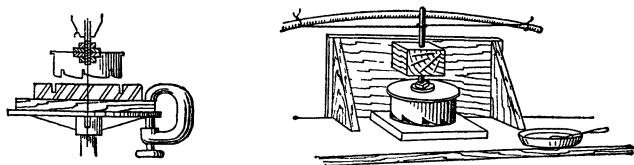


Рис. 63. Вырезание кружков из стекла с помощью трубчатого сверла: слева — на вертикальном сверлильном станке; справа — на примитивной самодельной установке с помощью «лучка».

защитный барабан. Стекло нельзя класть прямо на плиту станка — следует подложить под него доску. С помощью трубчатого сверла можно вырезать кружок из зеркального стекла за несколько минут, но на краях кружка часто получаются выколки. Во избежание этого следует наклеить на стекло (смолой или, лучше, с помощью сплава из трех частей канифоли и одной части пчелиного воска) с обеих сторон по куску оконного стекла, которое предохранит края вырезаемого кружка. Наклеивать защитные стекла надо возможно малым количеством смолы, чтобы они прилегали очень плотно. Все склеиваемые стекла надо предварительно подогреть (лучше всего на плите, подложив под них асбест). Большая капля расплавленной смолы кладется на середину зеркального стекла и сверху накладывается первое защитное стекло, после чего посредством равномерного нажима смола распределяется между стеклами. Затем таким же образом наклеивается с другой стороны второе защитное стекло, и всякий избыток смолы выдавливается, пока стекла еще горячие. Можно и сразу вырезать все три кружка, склеив заготовки в одну стопочку. Разумеется, что теперь понадобится более длинное трубчатое сверло.

Если в распоряжении мастера нет сверлильного станка или даже примитивной самодельной сверлильной

установки (см. рис. 63), то можно прибегнуть к тому способу, который уже был описан: готовится разрезанный на части деревянный (или металлический) цилиндр (см. рис. 28). Из зеркального стекла сначала вырезает алмазом квадратные куски со стороны, несколько большей диаметра нужного кружка. Отрезая затем углы, превращают квадрат в восьмиугольник. Для удаления лишнего стекла (сошлифовывание которого заняло бы много времени) осторожно обламывают углы щипцами. При некотором навыке легко удаётся обламывать стекло по кусочкам, как бы «обгрызая» его. Приготовив несколько таких заготовок (лучше четыре — три для зеркала и одно для шлифовальника), склеивают их смолой в стопочку, приклеивают по краям стопки два защитных стекла и вклеивают всю «конструкцию» в деревянный (или металлический) цилиндр. Затем, укрепив цилиндр в токарном станке, сошлифовывают выступающие части стекла с помощью карборунда на металлической плите. Эту операцию можно производить и вручную, без станка. По окончании описанного процесса стекла легко разделяются при нагревании, смола стирается и стеклянные кружки промываются в керосине.

Изготовленные кружки должны быть снабжены фаской; однако последняя должна быть в нашем случае очень узкой. В широкой фаске и нет надобности, так как при изготовлении плоского зеркала снимается очень небольшое количество стекла. Из того, что мы узнали об изготовлении вогнутого зеркала, нам вполне ясно, что два шлифующихся друг о друга одинаковых диска лишь в том случае могут сохранить плоскую поверхность, если они будут постоянно обмениваться местами: то один из них должен быть внизу, то другой. В противном случае, как мы знаем, нижний диск непременно приобретает выпуклость, верхний — вогнутость. Из этого понятно, что плоская форма поверхности крайне неустойчива; она существует, строго говоря, в течение короткого времени, когда поверхность диска перестала быть выпуклой, но еще не успела стать вогнутой, или наоборот.

Это наиболее распространенный способ изготовления оптических плоскостей небольшого размера.

Шлифовка нужна, однако, лишь в том случае, если поверхность стекла, из которого делается зеркало, имеет грубые неровности или сильно отклоняется от плоскости. Поверхность хорошего зеркального стекла обладает

настолько малыми ошибками, что шлифовка оказывается излишней и при изготовлении из него плоского зеркала можно ограничиться одной лишь полировкой, сэкономив, таким образом, много времени и труда. Поэтому мы начнем с того, что проверим качество поверхности стекла, из которого вырезаны наши кружки. Если при накла́дывании пробного стекла или складывании двух кружков друг с другом не обнаружится ошибок, больших чем в 3—4 полосы, то шлифовки не потребуется, и мы, безусловно, сможем добиться получения точной плоскости, начав прямо с полировки. При наличии грубых ошибок поверхности придется предварительно отшлифовать наши кружки. Поскольку обычно удастся подобрать кусок достаточно хорошего зеркального стекла, мы рассмотрим сначала первый вариант.

Перенумеруем наши три кружка с тыльной стороны и приступим к работе. Нумерация стекол должна быть четкой. Проще всего сделать метки карандашом для стекла, но они могут стереться; поэтому лучше делать метки алмазом.

Сама полировка производится так же, как и при изготовлении вогнутого зеркала, т. е. прямыми штрихами по диаметру при длине штриха с $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ диаметра (сдвиге в каждую сторону на $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ радиуса).

Так как стеклянные кружки очень малы (диаметр их будет около 50 мм), то работать, обходя вокруг стола, в данном случае окажется очень неудобным. Необходимо поэтому устроить себе приспособление, позволяющее работать сидя. Оно может быть самое незатейливое, лишь бы позволяло поворачивать нижний кружок во время полировки.

Вполне удовлетворительным устройством будет такое. В хорошо выстроганную доску, служащую основанием, вбиваем круглый гвоздь без шляпки, высотой около 20 мм, служащий вертикальной осью. На него может надеваться деревянный кружок диаметром около 10—12 см и толщиной 25—30 мм, в центре которого просверлен канал такого диаметра, чтобы гвоздь не слишком свободно входил в него. Во избежание коробления надо, конечно, предварительно проварить дерево в парафине. В эту импровизированную втулку следует положить тавот, вазелин или другую густую смазку. Во избежание попадания туда абразива канал в деревянном кружке не следует просверливать насквозь.

Технически лучше оснащенный читатель сможет, конечно, устроить себе настоящий станочек с металлической втулкой; практичнее всего верхний конец оси сделать плоским, а для уменьшения трения во втулку положить соответствующего диаметра шарик от шарикоподшипника, который будет удерживаться на месте маленькой ямкой, высверленной в верхнем конце оси. Между прочим, по этому простому принципу можно устроить и большой станок для обработки главного зеркала,

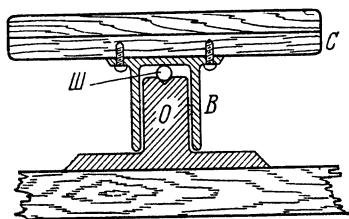


Рис. 64. Простой станок для шлифовки и полировки, устроенный любителем А. И. Чистяковым. Массивная металлическая втулка *В*, надетая на прочную вертикальную ось *О*, поддерживает круглый деревянный столик *С*. Легкость вращения обеспечивается стальным шариком *Ш*.

ла, чрезвычайно облегчающий работу. Автор с большим успехом пользовался подобным устройством (рис. 64).

В простейшем случае можно удовлетвориться просто круглой дощечкой, удерживаемой от скольжения в стороны тремя планками, между которыми она может поворачиваться на поверхности стола.

Для закрепления нижнего кружка воспользуемся тремя маленькими пробками или тремя гвоздиками, обтянутыми тонкой резиновой трубкой (например, для велосипедных вентилей).

Наклеим стеклянные кружки на деревянные круглые дощечки. Во время полировки мы будем оперировать двумя руками. Одна рука покоится на верхнем кружке и совмещает два движения: выполняет штриховые перемещения и поворачивает дощечку на небольшой угол. Вторая рука в то же время поворачивает нижнюю дощечку в обратном направлении.

Особое внимание при полировке надо обращать на то, чтобы избежать «эффекта опрокидывания», о котором мы уже говорили (стр. 118 и 140). Ввиду малого диаметра кружков этот эффект усиливается, и потому очень трудно избежать производимого им завала; завал же здесь, понятно, особенно вреден, так как при одной и той же ширине заваленного края он составит гораздо большую часть поверхности, чем в случае главного зеркала, диаметр которого в несколько раз больше диа-

метра нашего кружка. Борьба с эффектом опрокидывания надо посредством тщательного контроля движения при полировке; вот почему мы уже обращали внимание на то, что эффект опрокидывания вызывается быстрыми и резкими движениями. При обработке малых дисков надо особенно стараться придавать движению плавность. Само собой разумеется, что эффект опрокидывания будет тем сильнее, чем выше точка приложения силы; поэтому, конечно, надо держать ручку (в качестве которой хороша пробка) как можно ниже, у самой поверхности стекла.

Полировальник мы сделаем, как и для главного зеркала, из смолы. Основанием для него послужит четвертый кружок, который мы заготовили вместе с тремя другими. Все отличие этого полировальника будет состоять, собственно, в его малых размерах, лишь немного превышающих одну фасетку (квадратик) большого полировальника, послужившего нам для полировки главного зеркала. Мы сделаем фасетки в данном случае совсем маленькие, со стороной не более 10 мм; понятно, что специального фасетника нам для этого не требуется, а мы выдавим канавки просто на глаз линейкой или даже вырежем их лезвием безопасной бритвы. Можно, наконец, обойтись и вовсе без фасеток, ограничившись подрезкой полировальника в зависимости от хода полировки. Полезно сделать два полировальника, чтобы можно было подвергать поверхность одного из них «формовке», в то время как другой находится в работе.

После часа полировки можно приступить к испытанию методом интерференционных полос.

Если бы у нас имелось оптически точное плоское пробное стекло, то испытание сильно упростилось бы. После небольшого упражнения мы научились бы с уверенностью непосредственно определять характер отклонения поверхности от плоскости и, главное, нам тогда не понадобилось бы, конечно, обрабатывать три стекла.

Предположим сначала, что у нас имеется пробное стекло. Прежде всего несколько слов о самой технике прикладывания стекол друг к другу. Как мы уже упоминали, поверхности должны быть насколько возможно чисты для того, чтобы ничто не мешало им предельно сблизиться при наложении. Кроме того, частицы твердой пыли могут легко вызвать царапины. Здесь необходимо указать, что при накладывании стекол надо всячески

остерегаться с к о л ь ж е н и я одного по другому, иначе неминуемы царапины, производимые пылью. Хотя избежать вовсе попадания твердых пылинок между складываемыми поверхностями почти невозможно, эти пылинки не принесут вреда, если стекла не скользят одно по другому; в худшем случае они выдавят крошечные ямки, а всего скорее — раздавятся сами.

Чистка поверхностей производится посредством осторожного протирания чистой полотняной тряпочкой; подышав на поверхность стекла, протираем ее, а потом смахиваем оставшиеся соринки и волоски с помощью мягкой акварельной кисточки большого размера. Оптики предпочитают пользоваться для чистки поверхности мягкой шелковой тканью.

Положив одно стекло на стол, осторожно накладываем на него другое, сначала с одного края, а потом медленно опускаем его всё, придерживая с боков, чтобы оно не скользнуло в сторону под давлением воздуха, не успевшего выйти из-под стекла. Никакого нажима производить не следует; как правило, достаточен собственный вес стекла. Если при рассматривании в отраженном свете интерференционные полосы не появились, то это указывает на недостаточную очистку — между стеклами осталась пыль, а скорее всего, — волоски от тряпки. Осторожно снимем верхнее стекло (опять-таки остерегаясь скольжения!), приподнимая его с одного края, и постараемся очистить поверхности, тщательно обмахнув их кисточкой; если это не поможет, то нужно повторить протирку. Иногда на поверхности стекла оказываются соринки, плотно приклеившиеся к ней и не удаляющиеся повторным протиранием; в таком случае помогает протирка спиртом.

Если сложенные поверхности достаточно чисты, то мы увидим красивые радужные полосы, вид которых сейчас же откроет нам характер поверхности. Первые полосы появятся с той стороны, где стекла сначала приложены друг к другу; по мере того как их поверхности сближаются, полосы на наших глазах «побегут» прочь от того края, где стекла сложены теснее, причем будут становиться все шире и шире. Всякий изгиб полос, как мы знаем, указывает на наличие кривизны поверхности.

Отличить выпуклую поверхность от вогнутой очень легко. В случае выпуклой поверхности полосы обращены своей выпуклостью в ту сторону, где расстояние между

поверхностями больше, а вогнутостью — к той точке, где стекла сближены всего сильнее, т. е. где они соприкоснулись вначале при наложении. Если поверхность вогнутая, то картина будет обратная: искривленные полосы со стороны более близкого контакта поверхностей будут выпуклыми, а их вогнутость будет направлена в ту сторону, где стекла отстоят дальше друг от друга. При значительной кривизне поверхности полосы окажутся настолько искривленными, что могут образовать уже не дуги, а замкнутые кольца; картина получится, следовательно, качественно такая же, как при наложении выпуклой линзы на плоскость. Отличить выпуклость от вогнутости и здесь очень легко: при выпуклости красные края колец обращены к периферии, при вогнутости — к центру. Кроме того, в случае выпуклости система колец легко передвигается в сторону пальца, нажимающего на край верхнего стекла.

Полезно запомнить еще следующее правило: если при опускании головы (т. е. при увеличении угла падения лучей) видимые кольцеобразные полосы разбегаются от центра к краям, то поверхность выпуклая; если же они, наоборот, будут сбегаться к центру, то поверхность вогнутая. При поднимании головы картина будет конечно, обратная.

Неправильности поверхности мы сразу узнаем и по соответствующим неправильностям полос. Так, заваленный край в комбинации с вогнутостью внутренних частей дает характерную форму полос, представляющую не что иное, как преувеличенное изображение именно этого профиля поверхности. Надо заметить, что этот недостаток чаще всего встречается при работе у начинающих; в сущности говоря, это тот же дефект, с которым мы имели дело при изготовлении главного зеркала, когда у последнего возникал завал на краю; вся разница в данном случае состоит лишь в меньшей в тысячу раз кривизне поверхности: в то время как величина стрелки кривизны главного зеркала превосходила 1 мм (2000 длин волны света или 4000 полос), здесь она нередко составляет около тысячной доли миллиметра (1—2 длины волны света или 2—4 полосы). Рис. 65 наглядно поясняет сказанное.

Таким образом, имея точно плоское пробное стекло, мы без особых трудностей можем контролировать ход полировки, непосредственно по интерференционным

полосам определяя, какова форма поверхности изготавливаемого плоского зеркала.

Здесь необходимо, однако, заметить, что вид полос зависит и от того, как их наблюдать; изогнутые полосы могут несколько распрямиться, если их рассматривать не в перпендикулярном направлении, а наклонно. В силу этого неизбежно возникает ошибка в оценке формы поверхности: поверхность, которая в действительности обладает кривизной, мы можем счесть за почти плоскую.

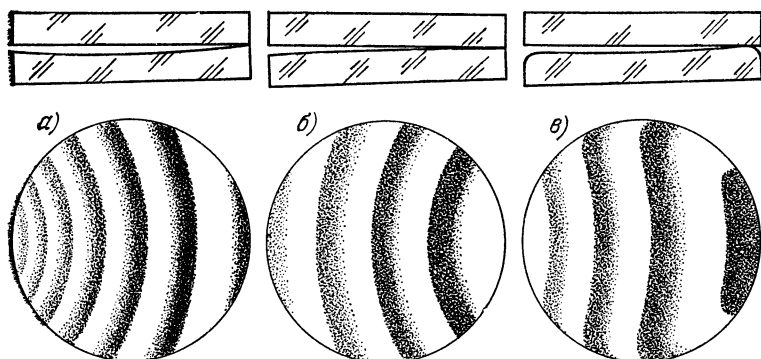


Рис. 65. Вид интерференционных полос при различных отклонениях формы поверхности от точной плоскости: *а* — вогнутость, *б* — выпуклость; *в* — вогнутость с завалом на краю. Вверху, в сильно преувеличенном виде, показаны профили испытываемых поверхностей, приложенных к точно плоскому (пробному) стеклу.

Совершенно так же, конечно, влияет и направление лучей, падающих на испытываемую поверхность. Поэтому, строго говоря, вполне избежать ошибки можно лишь в том случае, если свет падает перпендикулярно и перпендикулярно же глядят на испытываемую поверхность. Очевидно, что для выполнения этого условия необходимо особое приспособление, вроде изображенных на рис. 66. Испытуемое стекло лежит на пробном стекле; источник света (в данном случае несколько электрических лампочек, помещенных позади матового стекла), находится вверху на достаточном расстоянии. Наклонное тонкое зеркальное стекло между испытываемой поверхностью и источником света, не задерживая света последнего, позволяет в то же время видеть сбоку даваемое им отражение интерференционных полос. Для лучшей видимости полос пробное стекло кладется на черную бумагу. Пожалуй, проще и выгоднее способ, при кото-

ром используется картонный экран (рис. 66, внизу); он не нуждается в особых пояснениях.

Во всяком случае надо принять меры к тому, чтобы угол, образуемый лучом зрения и падающими на стекло лучами, был как можно меньше; для этого, очевидно, придется поместить источник света подальше. Необходимо помнить, что интерференционные полосы видны лучше всего, когда стекла освещаются рассеянным светом; поэтому нельзя пользоваться для испытания просто лампочкой, а необходимо создать светящуюся поверхность достаточно больших размеров. Если есть сильная лампа с рефлектором, то удобно осветить ею потолок, который и будет такой светящейся поверхностью. Иначе придется устроить матовый экран (из стекла, материи, папиросной бумаги) и поместить за ним несколько лампочек; можно, наконец, пользоваться светом от белого облачного неба.

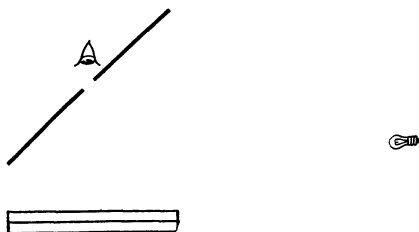
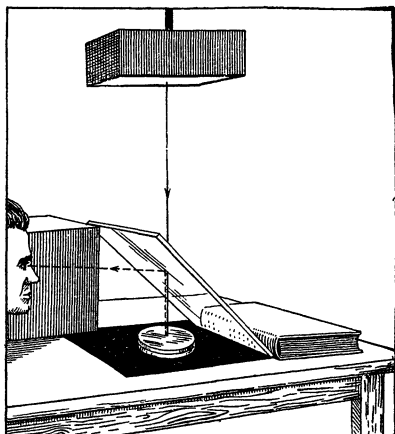


Рис. 66. Простейшие приспособления, позволяющие избежать ошибки в оценке формы интерференционных полос, вызываемой наклонностью лучей.

Что касается самой оценки кривизны полос, то она производится просто посредством прикладывания линейки (рис. 67), желательно из прозрачного материала, чтобы она не скрывала полос. На основании своего опыта автор находит, впрочем, что удобнее держать линейку (еще лучше карандаш, так как линейка очень широка и заслоняет свет) над стеклами и наблюдать ее отражение. Поместив линейку (карандаш) так, чтобы край соединил концы полосы, мы можем на глаз

с достаточной точностью оценить стрелку кривизны полосы в долях ширины последней; так, например, в случае, показанном на нашем рис. 67, можно с уверенностью сказать, что кривизна составляет полполосы, так как максимальное расстояние полосы от хорды, соединяющей ее концы (стрелка кривизны полосы), равно половине расстояния между соседними полосами.

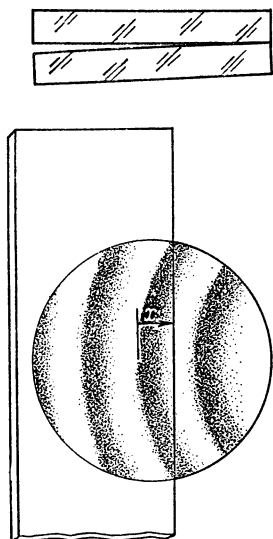


Рис. 67. Измерение кривизны полос с помощью линейки. В данном случае испытываемая поверхность, сложенная с пробным стеклом, обнаруживает выпуклость в полполосы.

Поскольку каждый различный в полосе цвет занимает известную часть ее ширины, надо стараться оценивать расстояние между соответственными краями цветных полосок; так, если мы выбираем красный цвет, то мерить надо, например, от левого края красной части одной полосы до левого же края красной части соседней полосы.

Чувствительность испытания тем выше, чем шире полосы, т. е. чем плотнее соприкасаются между собой стекла; это вполне понятно, так как при этом вместе с шириной полос увеличивается и стрелка кривизны, так что незаметное раньше для глаза искривление полос не только становится видимым, но и легче поддается измерению. Читатель, конечно, заметил сам с первого взгляда, что вначале, пока наложенные

стекла еще не сблизились достаточно, многочисленные узкие полосы могут казаться прямыми; когда же после достаточного сближения поверхностей останутся всего 3—4 широкие полосы, последние могут оказаться сильно искривленными, и, кроме того, станут заметны местные неправильности поверхности, например, завал на краю.

Здесь уместно обратить внимание на то, что судить о форме поверхности близ края (в частности, о наличии завала) удобнее, накладывая стекла не в центральном положении, а так, чтобы край одного из них выдавался за край другого.

При первых же пробах можно заметить, как сильно меняется форма поверхности под влиянием температуры. Мы хорошо убедились, конечно, в значении «отстойки» при испытании вогнутого главного зеркала. Еще виднее все тепловые искажения поверхности в случае плоского зеркала как вследствие его малых размеров (быстрое изменение температуры), так и благодаря большей наглядности контроля, позволяющего здесь воочию видеть не только изменения формы поверхности, но и ее кривизны. Если на несколько секунд приложить палец к стеклу, лежащему на пробном стекле, то полосы, бывшие до того прямыми, сначала изогнутся, а потом превратятся в несколько замкнутых колец, настолько сильную вогнутость приобретет нижняя поверхность стекла вследствие расширения его верхней стороны. Отняв палец, понаблюдаем за кольцами, и мы увидим, что кольца на наших глазах станут расширяться, радиус их кривизны будет увеличиваться, потом останется лишь несколько изогнутых полос, которые, наконец, выпрямятся, когда температура всей массы стекла выравняется. Весь этот процесс в случае малых размеров стекла займет немногие минуты.

Читателю будет небезынтересно также воочию убедиться с помощью интерференционных полос в том, что стекло действительно гнется при сравнительно незначительном нажиме; стоит лишь осторожно надавить на стекло, лежащее на пробном стекле, с двух краев спичками, чтобы заметить искривление полос.

Остается сказать немногое, а именно, коснуться вопроса о том, как регулировать ход полировки, чтобы достигнуть точно плоской формы поверхности.

Основные принципы в данном случае такие же, как и уже знакомые нам по работе над главным зеркалом телескопа. Здесь также мы будем прибегать к двум главным приемам, именно, к изменению характера движения при полировке и к переделке полировальника посредством подрезки и формовки. Последний прием, пожалуй, здесь будет иметь особенно важное значение. В процессе полировки важно, чтобы поверхность полировальника была насколько возможно плоская. Поэтому если в распоряжении имеется достаточно точная плоскость (хорошее зеркальное стекло), то чрезвычайно полезно в ходе работы формировать полировальник, накладывая его на плоскость и оставляя лежать в течение

получаса. Чтобы не прерывать из-за этого работы, очень полезно иметь два полировальника. Само собой разумеется, пользоваться для формовки точным пробным стеклом нельзя, так как оно может скоро испортиться вследствие сполIROвывания стекла при накладывании и снятии с полировальника.

Подрезку полировальника мы будем производить, сообразуясь с формой поверхности. Если наше зеркало обладает вогнутостью и завалом на краю (как мы уже упоминали, это обычный дефект у начинающих), то мы подскоблим наружную зону и центральную часть полировальника, оставив нетронутой лишь промежуточную зону. При общей плавной вогнутости нужно подскоблить центральную часть, стараясь свести эту подрезку на нет по направлению к периферии. При выпуклости же поверхности мы подрежем наружную зону, постепенно сводя подрезку на нет к центру. Вообще надо сказать, что иногда решить вопрос удастся только посредством проб; изменяя различным образом поверхность полировальника, мы непременно нападём в конце концов на то, что нужно в данном случае.

Что касается характера движения, то прежде всего, понятно, мы должны помнить правило: чем длиннее штрих, тем сильнее сполIROвываются центральные части зеркала, и наоборот. Вообще говоря, учитывая малые размеры зеркала, длинных штрихов следует избегать, так как появление завала на краю здесь происходит особенно легко. Надо заметить, что гораздо более сильное влияние, чем при полировке главного зеркала, теперь будет оказывать изменение давления (в силу малых размеров поверхности). Несколько опытов быстро покажут, что можно направлять ход полировки, меняя нажим. Очень часто удастся избавиться от упорного завала на краю, надавливая при полировке на край зеркала; при этом почти всегда получается вогнутая поверхность, но зато завал исчезает; плавную же вогнутость легко уничтожить соответствующей подрезкой полировальника, а иногда и одной лишь формовкой последнего на плоском стекле.

Само собой разумеется, что мы все время будем следить за появлением местных неправильностей (зональных ошибок), нарушающих плавность поверхности зеркала. Читатель, конечно, хорошо усвоил при работе над главным зеркалом, что устранение таких местных

погрешностей невозможно без должного изменения хода полировки. Поскольку местные дефекты возникают от того, что определенные части полировальника, находящиеся в постоянном соприкосновении именно с этими частями, где обнаруживается дефект, сползают со стекла слабее или сильнее, чем прочие, проще всего устранить дефект, изменив характер движения таким образом, чтобы эти части полировальника пришлись на другие места стеклянной поверхности. Поэтому если при полировке время от времени переходить с центральных прямолинейных штрихов на боковые (т. е. в направлении хорды) или делать в течение некоторого времени беспорядочные движения, то легче избежать появления местных ошибок и обычно без труда удастся устранить уже имеющиеся небольшие дефекты. В связи со сказанным напомним еще о том, что фасетки полировальника обязательно должны быть расположены асимметрично относительно его центра. Точно так же и при подрезке или при формовке полировальника надо следить за тем, чтобы сцарапанные или выдавленные места не оказались симметрично расположенными относительно центра.

Иногда имеет смысл поменять зеркало и полировальник местами. Это может дать хороший результат.

До сих пор мы предполагали, что в распоряжении работающего имеется точно плоское пробное стекло. Если пробного стекла нет, то придется использовать в полной мере «способ трех стекол».

Прежде всего заметим, что нет необходимости доводить все три стекла до полной готовности, так как два из них явятся лишь вспомогательными пробными стеклами. Но это отнюдь не значит, что вспомогательные стекла не должны обладать насколько возможно более точной плоской поверхностью. Мы знаем, что оценка поверхности с помощью интерференционных полос тем точнее, чем теснее контакт между сложенными поверхностями и чем, следовательно, шире полосы. Таким образом, очевидно, что для испытания плоской поверхности надо иметь как можно более плоские пробные поверхности, если мы хотим достигнуть достаточной точности. Надо принять за правило, что при попарном накладывании наших стекол не должно быть кривизны, превышающей одну полосу; что же касается местных неправильностей (завал на краю и др.), то надо добиться их полного устранения, иначе очень легко запутаться.

Некоторые рекомендуют вести работу следующим образом. Поскольку у малоопытного любителя нет достаточной уверенности в том, что он сможет по своему желанию направлять ход полировки, результат до некоторой степени случаен. Поэтому, якобы, разумнее всего доводить до конца обработку всех трех стекол, выбрав из них наилучшее. С таким решением вопроса нельзя согласиться. Гораздо правильнее оставить два стекла в качестве пробных, прекратив их полировку с того момента, как они приобретут плавную форму поверхности, т. е. освободятся от местных ошибок. Нет никакого сомнения, что техника работы чрезвычайно упростится, если работающий все время будет иметь дело с одними и теми же двумя поверхностями, форма которых ему хорошо известна; в сущности говоря, при таких условиях работать будет почти так же удобно, как и при использовании одного точно плоского пробного зеркала. Если же все три стекла будут полироваться до самого конца, то форма их поверхности будет изменяться, и при каждом испытании мы будем иметь дело с новым уравнением с тремя неизвестными. Нечего уж и говорить о том, как невыгодно полировать различные поверхности одним и тем же полировальником. Наоборот, имея в конечной фазе работы дело с одним и тем же стеклом, мы приспособим и самый полировальник, и характер штриха к тому, чтобы полировка шла в направлении приобретения поверхностью точно плоской формы.

Работу мы будем считать законченной, если вполне отполированное зеркало не обнаруживает отклонений от истинной плоскости, превышающих $\frac{1}{8}$ длины волны света, т. е. $\frac{1}{4}$ полосы. Строго говоря, это слишком мягкое требование, и лучше постараться добиться того, чтобы отклонение было еще меньше — $\frac{1}{5}$ или $\frac{1}{6}$ полосы. Тогда мы можем быть действительно уверены, что качество изображения, даваемого хорошим главным зеркалом, не будет испорчено после отражения от малого вспомогательного зеркала.

Мы рассмотрели тот случай, когда имеется хорошее зеркальное стекло и поэтому можно обойтись без шлифовки. Если в качестве исходного материала придется использовать стекло, поверхность которого очень далека от плоскости (или хорошее, но старое, сильно поцарапанное зеркальное стекло), то шлифовка необходима.

В принципе шлифовка в данном случае не отличается от уже знакомой нам. Разница состоит лишь в деталях. Прежде всего нет никакой надобности в том, чтобы начинать с крупнозернистых абразивов, так как нам предстоит сошлифовать лишь незначительное количество стекла. Поверхность зеркального стекла, которое служит нам материалом, очень близка к плоскости; поэтому мы начнем шлифовку сразу с 15- и даже 30-минутного наждака.

Второй особенностью будет переключивание и смена дисков через правильные промежутки времени.

Наконец, ручек к стеклянным кружкам приклеивать не придется. Вместо ручки проще всего пользоваться широкой пробкой, наклеив на нее слой резины. Такая «ручка» хорошо «цепляется» за поверхность стекла. Разумеется, первые стадии шлифовки, пока стекла еще будут «заедать» вследствие имеющихся на них неровностей, можно проделать, просто держа стекла пальцами.

Порядок работы установим такой: сначала стекло № 1 шлифуется сверху стеклом № 2, затем стекло № 2 шлифуется сверху стеклом № 3 и, наконец, стекло № 3 шлифуется сверху стеклом № 1. В течение этого цикла каждое из стекол оказывается, следовательно, один раз нижним и один раз верхним. Разумеется, необходимо следить за тем, чтобы каждая комбинация шлифовалась в течение одинакового времени: достаточно будет пяти минут.

По окончании этого цикла все начинается сначала, и так до окончания тонкой шлифовки. Таким способом поддерживается плоская форма поверхности всех стекол, потому что приобретаемая стеклом вогнутость (когда оно наверху) ликвидируется после того как оно шлифуется сверху другим стеклом.

Строго говоря, конечно, точно плоская поверхность может получиться при таком способе работы лишь случайно. На практике по окончании тонкой шлифовки поверхность каждого из трех стекол оказывается немного выпуклой или вогнутой.

Каждая «порция» шлифовки займет, как сказано, около пяти минут. По истечении - одного 5-минутного периода оба стекла следует обмыть в воде комнатной температуры, верхнее положить вниз, нижнее отложить в сторону, а третье взять в качестве верхнего. Чтобы не

сбиться с должной очередности, надо класть каждое из стекол всегда на одно и то же назначенное ему место. На последних стадиях шлифовки, когда диски очень легко скользят друг по другу, можно вовсе обойтись без ручки, а двигать верхний диск просто пальцем за середину, на которую положен кружок листовой резины (лучше пористой, для ослабления передачи тепла) или ломтик пробки.

В остальном техника шлифовки ничем не будет отличаться от уже знакомой нам. Совершенно так же, как и при шлифовке главного зеркала, надо следить за чистотой во избежание заноса более крупных зерен абразива; царапины при шлифовке в данном случае, пожалуй, даже более вредны, чем при изготовлении главного зеркала, так как полировка, как правило, заканчивается скорее и, следовательно, возрастает опасность, что царапины не успеют сполироваться.

Контроль полноты и равномерности шлифовки мы произведем уже знакомым нам способом по отражению. Наш основной враг, — завал, — очень легко обнаруживается при рассмотрении в косом свете: при соответствующем «критическом» угле падения лучей он имеет вид темного ободка вокруг блестящей внутренней части диска. При обнаружении завала надо попытаться устранить его на последней стадии тонкой шлифовки посредством изменения характера движения. Особенно помогает, если вместо полных штрихов делать «полуштрихи» по направлению к себе, а двигая от себя, доводить диск только до центрального положения.

Перед тем как начать полировку, полезно убедиться в том, что поверхности отшлифованных дисков действительно близки к плоскости. Для этого мы опять-таки используем их способность отражать наклонные лучи. Несложное испытание, которое мы произведем, основано на том, что любая поверхность, за исключением точно плоской, вызывает искажение хода лучей после их отражения от нее; это искажение будет тем сильнее, чем больше угол падения, т. е. чем наклоннее падают лучи на поверхность. В уродливо грубой форме мы наблюдаем это явление, глядя в плохое зеркало из волнистого стекла. Подобно такому «кривому зеркалу» испытываемая поверхность будет искажать вид отражающегося в ней предмета, если она не вполне плоская. Поэтому, рассматривая отражение предмета очень правильной и про-

стой формы, например, кружка, квадрата или сетки линий, мы легко заметим самое небольшое искажение.

Испытание проще всего производить следующим простым способом, предложенным Д. Д. Максutowым. Маленький круглый предмет (очень удобна бусина) подвешивается так, чтобы он был виден на ровно освещенном фоне (днем лучше всего подвесить к оконному переплету). Держа испытуемое зеркало в вытянутых руках так, чтобы видеть отражение предмета, постепенно поднимаем зеркало все выше и наблюдаем вид отражения. По мере того как угол падения лучей увеличивается (т. е. по мере того как лучи падают со все большим наклоном), отражение становится все ярче, а искажение вида отражающегося предмета (если испытуемая поверхность не плоская) становится все сильнее. Легко сообразить, что выпуклость поверхности будет вызывать кажущееся сплющивание предмета в вертикальном направлении; поэтому очертание круглой бусинки будет казаться при таком испытании сплюснутым в овал, как Солнце близ горизонта. Наоборот, вогнутость поверхности ведет к вытягиванию в вертикальном направлении.

Это испытание очень чувствительно, если рассматривать отражение при «бреушем» падении лучей, т. е. когда плоскость зеркала расположена насколько возможно ближе к лучу зрения, направленному на бусинку; при таком «критическом» положении отражение будет видно непосредственно под наблюдаемым предметом (бусинкой), так что сравнение формы станет наиболее удобным.

Если при испытании незаметно или почти незаметно искажения (сплющивания или растягивания) отражения, то мы можем быть уверены, что испытуемая поверхность очень близка к плоскости. В противном случае мы продолжим тонкую шлифовку, конечно, заранее сообразив, что именно следует делать для устранения замеченного недостатка. Вполне понятно, что если данное стекло выпуклое, оно должно быть при шлифовке верхним, если вогнутое, то его надо поместить вниз. Обычно, однако, не представляют себе, насколько быстро происходят изменения формы поверхности, о которых сейчас идет речь, т. е. приобретение стрелки кривизны порядка длины волны света (0,5 микрона). Поэтому по мере приближения к концу шлифовки следует сокращать продолжительность каждого периода:

так, если мы начали с того, что шлифовали каждую парную комбинацию стекол в течение пяти минут, то к концу тонкой шлифовки лучше сократить время шлифовки до одной минуты для каждой комбинации.

Когда все три стекла вполне отшлифованы и описанное предварительное испытание уже не обнаруживает заметной кривизны их поверхностей, можно приступать к полировке, уже подробно рассмотренной нами выше.

Если читатель пожелает все же избавиться от напрасной потери света и других нежелательных последствий, вызванных применением круглого зеркала, то ему неизбежно придется пойти на дополнительные трудности, связанные с изготовлением зеркала эллиптической формы.

Как мы уже указывали, трудность состоит не только в придании эллиптической формы, но и в полировке некруглого зеркала и в сохранении точно плоской поверхности у зеркала эллиптического очертания при переменах температуры. Рассчитывать на то, чтобы приобрести стекло, совершенно свободное от внутренних натяжений, не приходится; поэтому нельзя надеяться на успех, если мы захотим вырезать эллиптическое зеркало из предварительно отшлифованного и отполированного круглого зеркала, так как его поверхность при вырезке почти наверное исказится. Поэтому остается лишь один путь: сделать заготовку эллиптического зеркала и потом придать его поверхности точно плоскую форму посредством шлифовки и полировки.

Саму заготовку сделать нетрудно. Для этого вырежем из зеркального стекла прямоугольник с отношением сторон $1 : \sqrt{2} = 1 : 1,41$ с припуском по длине, равным толщине стекла. Осторожно обломаем щипцами его углы, чтобы получился грубый эллипс; размеры этой сырой заготовки должны быть рассчитаны так, чтобы со всех сторон был запас стекла миллиметра на три. Таким образом, если длины осей готового эллиптического зеркала, например, должны быть 34 и 48 мм, то наша заготовка должна иметь около 37 мм в ширину и $51 + 7(7 \text{ мм} - \text{толщина стекла}) = 58 \text{ мм}$ в длину.

Затем выточим или подберем деревянный цилиндр диаметром около 34 мм и распилим его посередине наискось под углом в 45° . Это — задача не из легких, и вряд ли мы с первого раза достигнем цели. Проверить

правильность распила можно очень легко, если сложить поверхности распила нашей деревяшки так, как показано на рис. 68, *а*. Всякая ошибка скажется в виде отклонения взаимного направления сложенных кусков от перпендикулярного. С помощью рашпиля постараемся исправить дело и, спиливая им поверхности распила, добьемся того, чтобы при складывании в одном направлении получался совершенно прямой цилиндр, а в другом — сломанный под прямым углом.

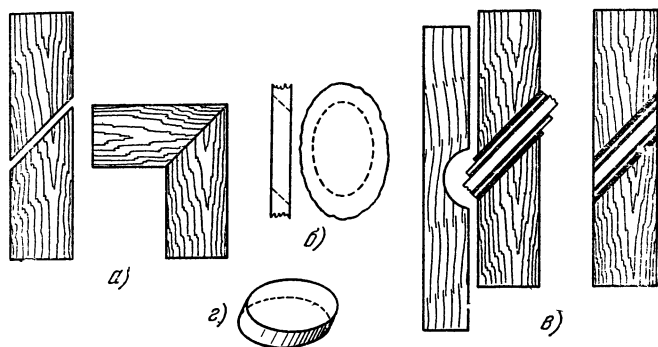


Рис. 68. Изготовление заготовки для плоского диагонального зеркала эллиптического очертания: *а*—деревянный цилиндр, распиленный под углом в 45° ; если угол выдержан правильно, то при складывании, как показано справа, должен получиться прямой угол; *б*—кусочек зеркального стекла, обломанный щипцами; пунктиром намечены очертания будущего эллиптического зеркала (вид с поверхности и сбоку); *в*—стекло, вклеенное смолой в распил деревянного цилиндра, вместе с защитными стеклами с каждой стороны; слева—до шлифовки, справа—после шлифования лишнего стекла; *г*—законченная заготовка.

Вклеим тогда с помощью смолы нашу стеклянную заготовку в распил, как показано на рис. 68, *в*. Пока смола еще не затвердела, постараемся добиться того, чтобы оси (а следовательно, и образующие) обеих частей деревянного цилиндра составили продолжение друг друга. В этом нам очень поможет линейка с вырезом, вроде изображенной на рис. 68, *в*. После полного остывания сошлифуем уже знакомым нам способом все стекло, выдающееся над поверхностью дерева. Во избежание выколок на краях (особенно на острых краях у концов длинной оси эллипса) полезно заготовку защитить стеклами, наклеенными на обе поверхности. При шлифовке с этой же целью не следует пользоваться слишком грубозернистым абразивом и применять сильный нажим.

После разогревания удаляем ненужные уже теперь отрезки деревянного цилиндра и защитные стекла, отмываем смолу керосином и получаем заготовку, которая будет иметь красивый вид, изображенный на рис. 68, г.

Но работа наша здесь только еще начинается. Отполировать маленькое зеркальце такой формы, добившись точно плоской поверхности, далеко не просто: неравномерное распределение веса самого стекла, неодинаковость его толщины, а следовательно, и сопротивления изгибу, неравномерность распределения температуры, а главное, — невозможность достижения одинаковой длины штриха по всем направлениям (вследствие того, что зеркало не круглое, а эллиптическое) вызывают появление сильного астигматизма и неравномерного завала на краю, справиться с которыми может только очень опытный мастер.

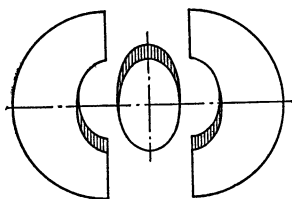


Рис. 69. Вспомогательные стекла («подклейки»), применяющиеся при шлифовке и полировке зеркала эллиптического очертания.

В оптических мастерских пользуются так называемыми «вспомогательными стеклами», или «подклейками», дополняющими очертания обрабатываемого изделия до круглого; в данном случае эти стекла должны иметь вид, изображенный на рис. 69. Легко понять, что жестко склеив заготовку со вспомогательными стеклами, можно шлифовать и полировать все вместе как одно круглое стекло, что сильно упрощает задачу, а по достижении точно плоской поверхности удалить вспомогательные стекла. Но этот способ, весьма привлекательный в описании и рекомендуемый многими, на деле не очень надежен, так как при склейке происходит изгибание стекла под влиянием склеивающих материалов (гипс, смола и др.). Для изделий малой и средней точности это не имеет особого значения, но для плоскостей, которые, как мы знаем, не должны обладать погрешностями, превосходящими $\frac{1}{8}$ длины волны света, подобный способ, вообще говоря, ненадежен.

Поэтому, не отговаривая читателя от того, чтобы сделать такую попытку, мы и не рекомендуем ему особенно гнаться за изготовлением эллиптического зеркала, сколь это ни привлекательно. Не следует огорчаться, если не удастся изготовить хорошее эллиптическое зер-

кало и остаться при круглом, но зато обладающем безупречной поверхностью. Потеря нескольких лишних процентов света не так страшна, особенно если мы примем во внимание, что гораздо большие потери все равно неизбежны в силу потускнения серебряного слоя, которыми будут покрыты наши зеркала.

Чтобы наглядно представить себе значение потери 3% света (максимальная непроизводительная потеря, вызываемая круглой формой диагонального зеркала), вспомним, что уменьшение проникающей силы телескопа на одну звездную величину соответствует потере 60% света! Таким образом, мы рискуем потерять из-за менее выгодной формы круглого зеркала лишь 0,05 звездной величины. В крайнем случае можно взять прямоугольное зеркало, срезав у него углы.

На этом мы закончим описание изготовления обоих зеркал телескопа и обратимся к третьей оптической части телескопа — к окулярам,

Г Л А В А V

ОКУЛЯРЫ

Мы уже неоднократно упоминали об окулярах в связи с увеличением, полем зрения, значением выходного зрачка и т. д., но не касались деталей их устройства и действия. Нам необходимо теперь несколько подробнее рассмотреть эту важную часть телескопа, от свойств которой в комбинации с объективом зависит качество работы всего инструмента. Окулярам свойственны недостатки, которыми обладают и объективы, но эти недостатки сказываются иначе.

Первый окуляр, примененный в телескопе Галилея, представлял собой простую рассеивающую линзу. Вытесненный вскоре навсегда из астрономической практики, он, однако, сохранился до настоящего времени в театральных биноклях. В дальнейшем мы будем рассматривать свойства только кеплеровских окуляров. Положительный (кеплеровский) окуляр имеет то преимущество, что он дает большое поле зрения, резко ограниченное, если в его передней фокальной плоскости установлена диафрагма.

Существует несколько систем окуляров; кроме того, каждая из этих систем может быть выполнена по-разному. Имеет значение и то, с каким объективом употребляется тот или иной окуляр. Иными словами, окуляр должен соответствовать объективу. Хорошо подобранный окуляр может частично исправить недостатки объектива; несоответствующий окуляр не только не исправляет их, но вносит еще и свои собственные. Линза или линзы, из которых состоит окуляр, подобно объективу страдают от аберраций. Эти аберрации, ра-

зумеется, зависят не только от свойств линз, но и от свойств светового пучка, падающего на них. Когда мы рассматривали действие объектива, то не принимали во внимание последнего обстоятельства, полагая, что на объектив падают всегда параллельные лучи от удаленных небесных тел. Окуляр же получает лучи под различными углами в зависимости от относительного отверстия объектива; кроме того, ход лучей сильно усложняется аберрациями объектива.

Простейшим кеплеровским окуляром является обычная короткофокусная собирательная линза. Разумеется, она работает в совершенно иных условиях, чем объектив, даже состоящий из одной линзы. В то время как объектив обладает малым относительным отверстием, что снижает аберрации, окуляр должен иметь относительно большие кривизны поверхностей, так как фокусное расстояние его должно быть мало, а поперечник должен быть достаточно велик, чтобы пропустить лучи от всего поля зрения. Кроме того, в окуляр попадают не параллельные лучи, а образующие значительные углы с оптической осью телескопа. При возрастании относительного отверстия очень быстро усиливается хроматическая аберрация, производимая окуляром. Поэтому простая линза в качестве окуляра годится для рефрактора с относительным отверстием 1:15 и почти непригодна для рефлектора с относительным отверстием 1:5. Сферическая аберрация простой линзы, применяемой в качестве окуляра, не будет особенно сказываться на работе длиннофокусного рефрактора, но она может превысить допустимую величину, если относительное отверстие объектива будет велико. Из этих предварительных данных мы легко заключим, что более короткофокусный рефлектор требовательнее к качеству окуляра, чем длиннофокусный рефрактор, и что его высокие достоинства могут быть сведены на нет неподходящим окуляром.

Особое значение для работы окуляра приобретает *хроматическая разность увеличения*. Рассматривая хроматическую аберрацию объектива, мы видели, что изображения, образованные лучами разных цветов, имеют различный масштаб, т. е. глаз видит их под неодинаковыми углами. Неахроматический окуляр преломляет падающие на него от объектива лучи по-разному, в зависимости от их цвета: синие — сильнее, красные —

слабее. В результате вместо единого ахроматического изображения мы увидим налегающие друг на друга цветные изображения разного размера; самым большим будет синее изображение (так как синие лучи преломлены сильнее и синяя часть изображения представляется под большим углом), самым малым — красное. Поэтому изображение звезды, не находящейся точно в центре поля зрения, представляется вытянутым в направлении радиуса поля зрения в радужную полоску, красный конец которой направлен к центру, а синий — к периферии поля зрения.

Вот почему простая линза, примененная в качестве окуляра, вследствие вызываемых ею дефектов обладает очень малым полезным углом поля зрения, не больше 10° . Между тем малые размеры поля зрения причиняют большие неудобства наблюдателю. Эти неудобства особенно чувствительны при недостаточно совершенной установке инструмента. Любителю, следовательно, особенно важно иметь хорошие окуляры, обладающие большим полезным полем зрения. Допустим, что в неподвижно установленный телескоп наблюдается планета, проходящая в силу суточного движения через поле зрения. За 4 минуты она перемещается примерно на один градус. Между тем угловое поле зрения диаметром в один градус можно получить в телескопе только с лучшим окуляром при увеличении около 40 раз. Такого увеличения будет едва достаточно для использования разрешающей силы маленького инструмента с объективом диаметром всего в 30 мм. При мало-мальски сильном инструменте с объективом диаметром хотя бы 150 мм нам нужно увеличение $150 : (0,7) = 215$ раз, при котором телескоп с лучшим окуляром будет иметь поле зрения лишь $0,2$ градуса. Иначе говоря, планета пройдет через поле зрения неподвижного телескопа за какие-нибудь 50 секунд — срок совершенно недостаточный, чтобы как следует рассмотреть мелкие детали (особенно, если принять во внимание атмосферные помехи).

Исправление недостатков линз окуляра занимало наблюдателей уже на заре истории телескопа. Первым типом усовершенствованного окуляра был *окуляр Гюйгенса*, изобретенный знаменитым физиком в середине XVII в. и широко применяющийся и поныне (рис. 70). Хотя простая линза в качестве окуляра и обладает важными достоинствами, состоящими в малых потерях

света и в отсутствии отблесков (рефлексов), однако ее недостатки заставили пренебречь этими достоинствами. Гюйгенс нашел, что окуляр из двух простых плоско-выпуклых линз, обращенных своими выпуклыми поверхностями к объективу, позволяет избавиться от окраски изображения. Передняя линза Π , ближайшая к объективу, называется полевой, задняя (Γ), меньшая, — глазной. Между ними помещается диафрагма поля зрения D , поставленная в фокальной плоскости глазной линзы и поэтому видимая вполне отчетливо вместе с изображением предмета. Падающие от объектива лучи вместо

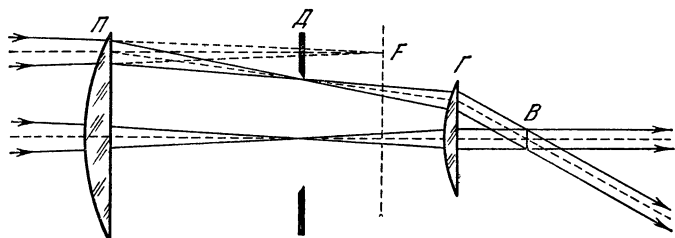


Рис. 70. Схема окуляра Гюйгенса и ход лучей в нем.

того, чтобы образовать изображение в фокальной плоскости объектива F , преломляются полевой линзой и собираются в плоскости диафрагмы, затем входят в глазную линзу и выходят из нее уже параллельными пучками; эти пучки, идущие от разных точек изображения, пересекаются образуя выходной зрачок B .

Достоинства окуляра Гюйгенса состоят в отсутствии окраски изображения (хроматической разности увеличения). Однако, хотя в окуляре Гюйгенса и отсутствует хроматизм увеличения, он, как и простая линза, страдает хроматизмом положения. Поэтому даже вблизи оси не получается вполне ахроматического изображения. Угловое поле зрения гюйгенсовского окуляра достаточно велико — около 40° (под таким углом видна глазу диафрагма D). У окуляра Гюйгенса большая кривизна поля, которая также ограничивает полезное поле зрения. Для рефлектора гюйгенсовский окуляр мало пригоден, так как он рассчитан на малое относительное отверстие.

В применении к окулярам говорят об эквивалентном фокусном расстоянии, которое зависит от фокусных расстояний каждой из линз f_1 и f_2 и от расстояния между

ними d и определяется по формуле

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d}.$$

Обычно применяется окуляр с такими характеристиками (эквивалентное фокусное расстояние f принимается за 1):

Фокусное расстояние полевой линзы	$(f_1) = 2$
» » глазной линзы	$(f_2) = 2/3$
Расстояние между линзами	$(d) = 1 1/3$
Расстояние выходного зрачка от глазной линзы	$= 1/3$

Фокальная плоскость окуляра Гюйгенса находится между линзами, вследствие чего им нельзя пользоваться как лупой. Вероятно, поэтому он иногда называется (совершенно неправильно) «отрицательным» (напомним, что отрицательная линза — вогнутая, рассеивающая; галилеевский окуляр может быть с правом назван отрицательным). Гюйгенсовский окуляр мало пригоден для измерений, так как микрометр надо помещать между его линзами в плоскости диафрагмы, и самое главное, — микрометр будет недостаточно отчетливо виден, так как рассматривается через глазную линзу, оптические недостатки которой в данном случае выступают с полной силой. Крест нитей, однако, вполне может применяться в окуляре гюйгенсовского типа, так как он находится в центре поля зрения и виден вполне отчетливо. Для креста нитей, особенно если он паутинный и очень нежен, гюйгенсовский окуляр даже предпочтительнее, так как крест нитей помещается внутри и надежно защищен.

Нетрудно понять, что один и тот же окуляр будет работать по-разному, в зависимости от относительного отверстия объектива, обуславливающего угол конуса лучей, под которым они падают на полевую линзу. Чем больше относительное отверстие объектива, тем сильнее проявляются недостатки окуляров. Собирая окуляр Гюйгенса из случайных линз, любитель может путем проб подобрать такое расстояние между ними, при котором хроматизм увеличения окажется исправленным. Если звезда на краю поля зрения выглядит как маленькая полоска спектра, красный конец которого направлен к периферии, то полевую линзу надо сблизить с глазной; если периферический конец изображения звезды си-

ний — линзы надо раздвинуть. В старых окулярах полевая линза делалась подвижной, вероятно, потому, что оптики не могли справиться с точной сборкой и изготовлением линз заданной кривизны, а правильное расположение частей окуляра подгоняли посредством проб. Это имеет и другое значение: возможность передвигать линзы окуляра вдоль его оптической оси полезно в том отношении, что позволяет фокусировать крест нитей или микрометр (установленные в плоскости диафрагмы). Теперь, впрочем, подвижной устраивается диафрагма, чтобы ее можно было поместить на нужном расстоянии от глазной линзы.

С целью усовершенствования гюйгенсовского окуляра в его конструкцию вносились различные изменения. Наиболее удачная из них и пользующаяся самым широким распространением носит название *окуляра Миттенцвея*. Он отличается менискообразной (вогнуто-выпуклой) полевой линзой, задняя поверхность которой не плоская, а вогнутая. Окуляр Миттенцвея дает очень широкое поле зрения (до 50°) с достаточно хорошим качеством изображения до края.

Неизбежным недостатком окуляров с двумя и более линзами является то, что значительная часть света отражается от их поверхностей, отчего, с одной стороны, уменьшается яркость изображения, а с другой, — отраженный свет рассеивается, ослабляя контрасты, и, кроме того, производит отблески (рефлексы), иногда выглядящие как звезды, которых на самом деле нет (так называемые «дúхи»)*). Остроумное решение задачи уничтожения двух свободных поверхностей линз найдено в так называемом *сплошном окуляре*, часто носящем имя оптика Толлеса (рис. 71). Это, собственно, гюйгенсовский окуляр, но сделанный из одного куска стекла. Диафрагмой служит здесь кольцевая канавка D , прошлифованная вокруг цилиндрического тела окуляра. Кривизна задней поверхности, обращенной к глазу, существенно больше кривизны передней поверхности. Сплошной окуляр в этом смысле превосходит по своим качествам обычную конструкцию из отдельных линз, но его изготовление гораздо труднее, так как обоим поверхностям

*) Довольно неудачное, но, к сожалению, широко распространенное название, возникшее от плохого перевода английского слова «ghost», которое в применении к данному случаю надо, конечно, переводить не «дух», а «призрак».

должна быть придана не только точно заданная кривизна, но и расстояние между ними тоже должно быть строго выдержано согласно заданию; будучи же сплошным, он, конечно, не допускает никакой регулировки.

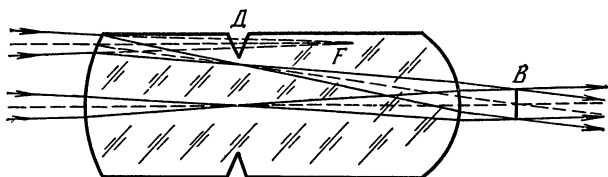


Рис. 71. Схема сплошного окуляра и ход лучей в нем.

Кроме того, полезное поле зрения такого окуляра мало и не превышает $20-25^\circ$.

Представителем другого типа окуляров, фокальная плоскость которых находится перед полевой линзой, является широко распространенный *окуляр Рамсдена*. В отличие от «отрицательных» окуляров типа гюйгенсовского, окуляры Рамсдена называют «положительными», хотя все описываемые нами окуляры, кроме галилеевского, являются системами положительными. Окуляр Рамсдена (рис. 72; обозначения те же, что и на

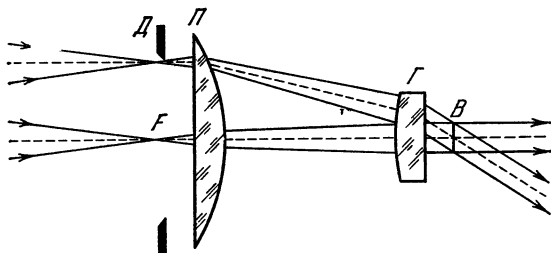


Рис. 72. Схема окуляра Рамсдена и ход лучей в нем.

рис. 70) подобно гюйгенсовскому, состоит из двух плоско-выпуклых линз Π и Γ , но обращенных своими выпуклостями друг к другу. Обе линзы имеют одинаковое фокусное расстояние и отстоят друг от друга также на величину их фокусного расстояния. При такой конструкции лучи лучше всего исправляется хроматизм увеличения при удовлетворительном исправлении кривизны поля,

которая, как мы видели, сильно вредит в гюйгенсовском окуляре. Так как расстояние между линзами $d = f_1 = f_2$, то по формуле эквивалентного фокусного расстояния получаем

$$f = f_1 = f_2.$$

Таким образом, эквивалентное фокусное расстояние окуляра Рамсдена равно фокусному расстоянию каждой из его отдельных линз. Недостатком этого окуляра является то, что выпуклая поверхность передней линзы находится в фокусе глазной линзы, вследствие чего находящиеся на первой пыли или дефекты совершенно отчетливо видны и могут мешать наблюдению. Кроме того, в этом окуляре выходной зрачок очень близок к глазной линзе и даже может оказаться внутри нее, что делает наблюдение неудобным и ведет, разумеется, к ограничению поля зрения. Вот почему на практике в окулярах Рамсдена берут d меньше f , т. е. жертвуют ради устранения указанных недостатков исправлением хроматизма увеличения. Поле зрения рамсденовского окуляра составляет около 35° . Главное достоинство этого окуляра — достаточно плоское поле и возможность хорошо и без искажений видеть микрометр, помещающийся в фокальной плоскости перед полевой линзой. Собственно говоря, ради последнего преимущества он и был сконструирован Рамсденом.

Разобранные нами системы окуляров дают, как мы отмечали, изображение, свободное или почти свободное лишь от хроматизма увеличения, но не от хроматизма положения. Дальнейшим усовершенствованием окуляров является применение для них комбинаций ахроматических линз.

В простейшем виде ахроматический окуляр представляет собой, собственно, маленький ахроматический склеенный двухлинзовый объектив. Он, как и одиночная выпуклая линза, обладает малым полем зрения, около 15° .

Окуляр Кельнера (рис. 73, обозначения те же, что и на рис. 70) является, по существу, рамсденовским окуляром, но в нем только полевая линза — обычная плоско-выпуклая, глазная же — ахроматическая, рассчитанная таким образом, чтобы компенсировать хроматическую aberrацию полевой линзы. Если принять эквивалентное фокусное расстояние этого окуляра за 1, то

конструктивные его элементы выразятся следующими величинами:

Фокусное расстояние полевой линзы	$7/4$
» » глазной линзы	$4/3$
Расстояние между линзами	$3/4$

Окуляр Кельнера обладает широким полем зрения (до 50°) и дает изображение, хорошее по своей отчетливости и ахроматичности, почти до самого края поля.

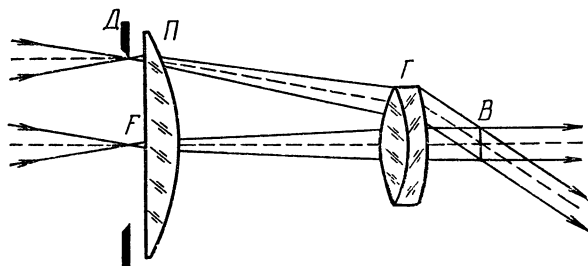


Рис. 73. Схема окуляра Кельнера и ход лучей в нем.

Его недостатками являются малое расстояние выходного зрачка от глазной линзы и близость фокальной плоскости к поверхности полевой линзы (иногда она даже «утоплена» в ней, что делает невозможным пользование микрометром).

Наилучшим из двухлинзовых окуляров был до сих пор *ортоскопический окуляр* (рис. 74). Он состоит из

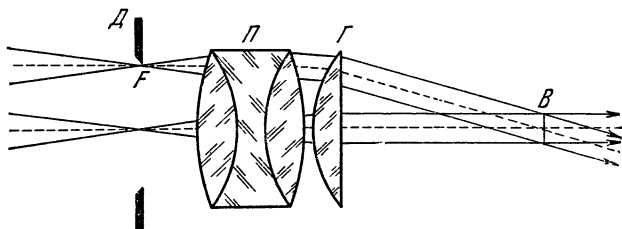


Рис. 74. Схема ортоскопического окуляра и ход лучей в нем.

тройной ахроматической полевой линзы и очень близко расположенной к ней простой плоско-выпуклой глазной линзы. Фокальная плоскость вынесена здесь вперед, и выходной зрачок также находится на значительном

расстоянии от глазной линзы, что особенно важно для сильных окуляров; поле зрения свыше 40° ; оно плоское, а изображение чрезвычайно резкое и без дисторсии. Стремление вынести выходной зрачок как можно дальше за пределы глазной линзы привело к созданию новых типов окуляров сложной конструкции. Так, созданный в ГОИ окуляр «с вынесенным зрачком» (рис. 75) обладает рядом преимуществ, главным из которых является большое расстояние выходного зрачка, что особенно важно, конечно, для самых сильных (короткофокусных) окуляров. А мы видели, что у большинства систем окуляров вынос зрачка при коротких фокусных

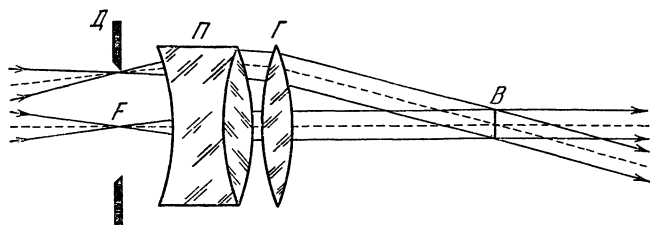


Рис. 75. Схема окуляра Государственного оптического института с вынесенным выходным зрачком.

расстояниях становится настолько малым, что работа с ними делается крайне неудобной. Значение сколь угодно большего расстояния выходного зрачка особенно велико для рефлекторов, требующих для получения разрешающего увеличения более сильных окуляров (как мы знаем, в этом случае $f = 0,7 \text{ В мм}$, т. е. в избранных нами примерах 6 и даже 5 мм).

Все перечисленные окуляры, состоящие из отдельных линз, страдают не раз уже отмеченными недостатками, происходящими от отражения света на поверхностях линз. Ахроматической комбинацией, свободной от этого недостатка, является *моноцентрический* окуляр Штейнгейля. Он рассчитан таким образом, что все его четыре поверхности имеют один общий центр; благодаря этому при склейке линз центрировка получается сама собой. Обладая всего двумя свободными поверхностями, он почти так же мало страдает от отражений, как и сплошной окуляр. Кроме того, он может быть без вреда для качества изображений не очень точно центрирован по отношению к оптической оси телескопа.

Очень хороший, притом простой по конструкции, моноцентрический окуляр рассчитан по предложению Д. Д. Максудова; этот окуляр хорошо исправлен в отношении аберраций.

От этого краткого описания свойств главных типов окуляров у читателя должно, конечно, получиться впечатление, что было бы правильнее всего, если бы окуляры изготавливались по особому заказу для применения в комбинации с определенным объективом. Так оно отчасти и есть. Большинство окуляров предназначено для обычных рефракторов с относительным отверстием около 1:15; это и определяет конструктивные элементы окуляров. Для инструментов с большим относительным отверстием, т. е. для рефлекторов, строго говоря, нужны ахроматические окуляры. Наиболее высокие относительные отверстия применяются, впрочем, главным образом для крупных инструментов с целью укорочения трубы и удешевления всей конструкции. (Как правило, такие инструменты не предназначаются для визуальных наблюдений в первичном фокусе)

Любитель, как мы видели, поставлен в особо затруднительное положение, так как для него особенно важно иметь большое поле зрения с хорошим качеством изображения от края до края. Между тем обычно ему приходится пользоваться случайно приобретенными окулярами. Неплохие результаты дают окуляры от микроскопа, обычно гюйгенсовского типа (более слабые) или ортоскопические (более сильные). К сожалению, они редко изготавливаются достаточно сильными (наименьшее фокусное расстояние у них равно 8 мм). Не удивительно, что многие любители стремятся самостоятельно изготовить окуляры, которые могут быть рассчитаны с учетом характера телескопа и предполагаемых наблюдений. Изготовление малых линз неизмеримо проще изготовления зеркала. Главную трудность представляет изготовление оправы для окуляра, которая должна быть непременно точеная, так что необходимо воспользоваться токарным станком. Те из любителей, которые имеют эту возможность, могут рассчитывать на успех; нет никакого сомнения в том, что, овладев трудным искусством шлифовки и полировки зеркала, любитель без труда научится изготавливать линзы для окуляров. Есть, разумеется, возможность подобрать и готовые линзы, встречающиеся в продаже. Плоды долгого труда любите-

теля над главной частью телескопа, объективом, могут быть сведены на нет случайными плохими окулярами. Поэтому если нет надежды на приобретение или изготовление окуляров, обеспечивающих наилучшее использование объектива, то лучше с самого начала пойти по иному пути: постараться, чтобы объектив не отличался особой «требовательностью» по отношению к окулярам, т. е. прежде всего избегать больших относительных отверстий. В случае самодельного рефлектора это, как мы знаем, сильно облегчит изготовление зеркала, но, конечно, затруднит осуществление всей механической части телескопа из-за громоздкости и тяжести его трубы.

Г Л А В А VI

СЕРЕБРЕНИЕ ЗЕРКАЛ

При изготовлении астрономической оптики в наше время применяется покрытие отражающих поверхностей слоем алюминия. Алюминиевый слой обладает рядом преимуществ перед серебряным, в частности, он прочнее и более стоек против атмосферных влияний.

Однако техника покрытия алюминием требует сложного оборудования, недоступного любителю. Поэтому любитель непременно должен хорошо уметь сам серебрить свои зеркала, так как серебряный слой необходимо возобновлять не реже раза в год, а в большинстве случаев и чаще. Следует также отметить, что серебряный слой резко отличается от алюминиевого по характеру отражаемого и поглощаемого света: тонкий серебряный слой пропускает ультрафиолетовые лучи, алюминиевый же их отражает, что надо принимать во внимание при астрофотографии, когда, при серебряном покрытии, ультрафиолетовые лучи теряются. Алюминиевый слой, наоборот, обеспечивает наиболее полное отражение ультрафиолетовых лучей.

Техника серебрения стеклянных поверхностей не так уж сложна, но для того, чтобы действительно хорошо посеребрить зеркало, нужны опыт и тщательное соблюдение ряда правил работы.

Существует много рецептов так называемого «мокрого» способа серебрения, но суть процесса всегда состоит в том, что из раствора соли серебра под действием добавляемого раствора восстанавливающих веществ выделяется металлическое серебро, прочно оседающее на полированном стекле в виде тончайшей зеркальной пленки.

Астрономическое зеркало отличается от обычных зеркал, знакомых нам из повседневной жизни, тем, что серебряный слой не спрятан у него под стеклом, как у обычных зеркал, а находится снаружи, и отражение света происходит непосредственно от него; астрономические зеркала принадлежат, как говорится, к зеркалам с наружным покрытием.

Наружное серебрение создает ряд трудностей, главная из которых состоит в необходимости получения как можно более блестящей, следовательно, обладающей наиболее высоким коэффициентом отражения наружной поверхности серебряной пленки. Известно, что внутренняя, обращенная к стеклу поверхность серебряного слоя почти всегда получается чистой и ярко блестящей. На внешней же поверхности, единственно важной для астрономического зеркала, очень легко появляются налеты, муть или «побежалость», в высшей степени вредно влияющие на отражательную способность зеркала. Избегать этих дефектов можно только в том случае, если весь процесс серебрения от начала и до конца ведется правильно, при строгом соблюдении необходимых условий.

Основное условие успеха работы состоит в образцовой чистоте во всем, начиная с поверхности самого зеркала и кончая посудой, употребляющейся для серебрения. Все вещества, применяющиеся для серебрения, должны быть химически чистыми: вода годится только дистиллированная, в крайнем случае — дождевая, но отнюдь не водопроводная или речная, так как в них содержатся различные вещества, прежде всего хлористые соли, вызывающие помутнение серебряного слоя.

Для серебрения нужны следующие материалы:

1. Азотнокислое серебро (ляпис, AgNO_3).
2. Едкое кали (KOH) или едкий натр (NaOH), химически чистые.
3. Чистый нашатырный спирт (водный раствор аммиака, NH_4OH).
4. Сахар-рафинад колотый.
5. Азотная кислота крепкая, химически чистая (HNO_3).
6. Винный спирт (ректификат).
7. Дистиллированная вода (лучше свежeproкипаченная).
8. Гигроскопическая вата.

9. Фильтровальная бумага.
10. Хорошая, плотная бумага типа чертежной.
11. Парафин.
12. Кусок мягкой замши или бумазеи.
13. Резиновые перчатки (хирургические) или напальчники.

14. Тонкий хлопчатобумажный шнурок.

Для серебрения 150-мм зеркала нам потребуется следующая посуда:

1. Банка емкостью около полулитра.
2. Три или четыре склянки емкостью от $\frac{1}{4}$ л до 1 л.
3. Две мензурки (одна на 100—200 мл, другая — на 10—25 мл).
4. Колба химическая или чистая эмалированная кастрюля емкостью около 1 л.

5. Капельница.

Работу мы начнем с того, что приготовим следующие растворы:

1. Раствор азотнокислого серебра:
азотнокислого серебра 10 г
дистиллированной воды 200 мл
2. Раствор едкой щелочи:
едкого кали 10 г
(или едкого натра 7 г)
дистиллированной воды 200 мл
3. Восстанавливающий раствор:
сахара-рафинада 70 г
дистиллированной воды 250 мл

По растворении сахара добавить крепкой азотной кислоты 3,5 мл (можно заменить 3,5 г виннокаменной кислоты, употребляющейся, между прочим, в фотографии для приготовления кислого фиксажа) и кипятить в колбе или эмалированной кастрюле на легком огне до появления светлой желтой окраски; по остывании добавить 50 мл спирта-ректификата и долить дистиллированной воды до общего объема 1 л. Восстанавливающий раствор перед употреблением должен постоять хотя бы несколько дней; хранить его можно в закупоренной склянке в течение неопределенно долгого времени*).

*) Еще лучше вместо сахара пользоваться раствором чистой глюкозы. Непосредственно перед употреблением готовится 5%-ный раствор глюкозы в дистиллированной воде.

Растворы 1 и 2 приготавливаются лишь непосредственно перед употреблением, так как они при хранении портятся.

Посуда, употребляемая для растворов, а также для самого серебрения, должна быть тщательно вымыта сначала мылом, потом водой с плавающими в ней кусочками бумаги, азотной кислотой, раствором едкой щелочи, тщательно промыта большим количеством воды и, наконец, ополоснута дистиллированной водой. Посуду не следует вытирать во избежание заноса какого-либо загрязнения, а нужно высушить.

Все растворы и чистую посуду необходимо защищать от пыли. Сухие реактивы также надо предохранять от попадания туда пыли или каких-либо иных посторонних веществ. Сухое азотнокислое серебро следует хранить плотно закупоренным и в темноте; едкая щелочь должна быть закупорена, а пробка залита парафином во избежание проникновения влаги и углекислоты из воздуха.

Одна из основных операций, от которой зависит успех серебрения, — это чистка поверхности зеркала.

Сняв ручку (как говорилось выше, это делают резким боковым ударом по ней), удаляют остатки смолы с задней поверхности зеркала. На фаске зеркала обычно также имеется плотный смоляной налет, окрашенный крокусом в темно-красный цвет. Его, как и остатки смолы на задней поверхности зеркала, смывают небольшим количеством бензина или керосина с помощью тряпки.

Затем все зеркало моется со всех сторон теплой водой с мылом и тщательно протирается азотной кислотой (концентрированная кислота разводится равным количеством воды). Протирание азотной кислотой — основная операция при чистке. Мыть азотной кислотой надо с помощью клочка гигроскопической ваты; разумеется, прямо голыми руками делать это нельзя, так как азотная кислота разъедает кожу; нужно остерегаться также и брызг, которые могут причинить ожоги и прожечь дыры на платье. Если нет резиновых перчаток, то можно плотно наvertеть тампон ваты (лучше гигроскопической) на лучинку и тереть им зеркало, обмакивая по мере надобности в азотную кислоту. Азотной кислотой моют не только лицевую поверхность, но и бока зеркала. Лицевую поверхность надо тереть

ватой с азотной кислотой до тех пор, пока она не будет везде одинаково скрипеть.

По окончании протирки азотной кислотой зеркало надо тщательно обмыть во многих сменах воды, затем несколько раз ополоснуть в дистиллированной воде и поставить на ребро. Если поверхность достаточно чиста, вода должна удерживаться на ней в виде равномерной пленки; в противном случае вода будет местами скатываться со стекла, оставляя сухие островки, которые помешают равномерному покрытию серебром. В таком случае надо повторить протирку азотной кислотой, добившись равномерного смачивания водой всей поверхности.

Само собой разумеется, при чистке нужно остерегаться попадания пыли (особенно в вату!), которая может поцарапать зеркало. Вымытое зеркало надо держать под слоем воды до самого серебрения во избежание попадания на стеклянную поверхность каких-либо веществ, могущих помешать осаждению равномерного зеркального слоя серебра. Необходимо запастись специальной посудой, в которую можно положить зеркало немедленно по окончании мытья, залив его дистиллированной водой. Удобнее всего воспользоваться стеклянным кристаллизатором, диаметр которого должен быть приблизительно на 2 см больше диаметра зеркала. Чтобы зеркало можно было легко вынуть из кристаллизатора, туда предварительно кладут два чистых плотных хлопчатобумажных или капроновых шнурка (лучше тщательно постиранных и прополосканных в дистиллированной воде), за связанные концы которых зеркало можно удобно поднимать и опускать. Разумеется, кристаллизатор должен быть так же тщательно вымыт, как и вся остальная посуда.

Если кристаллизатор достать не удастся, то можно легко изготовить посуду из пропарафинированного картона или чертежной бумаги. К кружку диаметром в 170 мм (для нашего 150-мм зеркала) пришивают борт высотой около $\frac{2}{3}$ диаметра зеркала (100 мм) и пропитывают получившуюся бумажную посуду парафином, сильно разогретым в мисочке. Еще теплую посуду ставят на стекло, стараясь, пока парафин еще не вполне затвердел, выправить ее хорошенько, если она измялась. Затем с помощью кисти замазывают горячим расплавленным парафином снаружи все швы, чтобы обеспечить

водонепроницаемость. По остывании парафина кладут в посуду зеркало лицевой стороной вверх, не забыв о шнурах для поднимания, и наливают столько воды, чтобы поверхность зеркала была ею покрыта на высоту около 5 мм. Затем накрывают посуду с зеркалом листом чистой бумаги и приступают к приготовлению серебрящего раствора.

Нужно особенно остерегаться прикосновения пальцев к очищенному зеркалу. Ни во время мытья зеркала, ни тем более по его окончании касаться лицевой поверхности нельзя, иначе неминуемо загрязнение жиром, всегда имеющимся на коже; загрязненные жиром места не покроются хорошим серебряным слоем. Во избежание помех лучше не касаться голыми руками также и боков зеркала, а браться за него в резиновых перчатках, которые, конечно, должны быть чистыми, а за неимением перчаток подкладывать кусочек чистой бумаги.

Для изготовления серебрящего раствора в банку емкостью около 0,5 л вливают раствор азотнокислого серебра (№ 1) в таком количестве, чтобы на каждые 100 см^2 поверхности зеркала пришлось 3—4 г азотнокислого серебра (для 150-мм зеркала, поверхность которого составит около 175 см^2 , потребуется, следовательно, не менее 100 и не более 140 мл раствора), и начинают прибавлять к нему при постоянном взбалтывании по каплям (из капельницы) нашатырный спирт. Вследствие выделения коричневой окиси серебра сразу произойдет помутнение раствора. Вначале нашатырный спирт можно прибавлять довольно быстро, но как только начнется просветление жидкости вследствие начавшегося растворения выделившегося ранее осадка окиси серебра, дальнейшее добавление нашатырного спирта нужно производить очень осторожно, чтобы не допустить его избытка. Нашатырного спирта надо добавлять столько, чтобы после тщательного взбалтывания еще осталось чуть-чуть осадка. Если жидкость стала совершенно прозрачной, то это значит, что спирта прилито слишком много; тогда надо добавить к раствору по каплям азотнокислого серебра (раствор № 1), пока жидкость не замутится слегка; приняв несколько желтоватый оттенок.

Теперь отмеривают столько же раствора едкой щелочи (раствор № 2), сколько было взято раствора азотнокислого серебра, и вливают его, все время взбалтывая,

в раствор азотнокислого серебра с нашатырным спиртом; при этом снова выпадает обильный коричневый осадок. Этот осадок опять переводят в раствор, добавляя понемногу нашатырного спирта. Как и вначале, нужно остерегаться избытка нашатырного спирта. Получившийся раствор должен быть мутноватым и иметь желтовато-буроватый оттенок. Если же он стал совершенно бесцветным и прозрачным как вода, то это значит опять-таки, что нашатырного спирта прибавлено слишком много. Добавлением небольшого количества раствора азотнокислого серебра устраняют этот недостаток, добиваясь того, чтобы раствор замутился и приобрел указанный оттенок.

Отмерим теперь вдвое меньшее количество восстанавливающего раствора (раствор № 3), чем было взято раствора азотнокислого серебра (т. е. от 50 до 70 мл).

Теперь все готово для серебрения; достаточно смешать восстанавливающий раствор с серебрящим раствором, чтобы немедленно началось выделение металлического серебра.

Здесь необходимо сделать несколько существенных замечаний.

Прежде всего работающий должен знать, что подсыхающий или вообще долго стоявший раствор азотнокислого серебра со щелочью и аммиаком иногда приобретает способность взрываться; взрывчатая сила образующихся в нем чрезвычайно неустойчивых соединений серебра (так называемых азидов) настолько значительна, что может привести к неприятным последствиям. Поэтому рекомендуется работать в очках, которые предохраняют глаза от разбрызгивающейся едкой жидкости в случае взрыва. Главное же, надо твердо запомнить, что раствор ни в коем случае нельзя заготавливать впрок, а можно готовить лишь непосредственно перед употреблением, иначе от долгого стояния в нем могут образоваться эти опасные взрывчатые вещества. Возможность образования взрывчатого соединения особенно повышается при высыхании раствора, а также при работе в сильную жару.

Другое обстоятельство заключается в том, что осадок, оставшийся в растворе, а особенно тонкие пленки, обычно плавающие на его поверхности, могут прилипнуть к поверхности зеркала и помешать равномерному выделению серебряного слоя. Поэтому полезно про-

фильтровать готовый раствор через вату, предварительно смоченную дистиллированной водой.

Обращаемся к главному моменту всей работы.

Вливаем отмеренное количество восстанавливающего раствора в посуду, в которой под слоем воды лежало наше зеркало (разумеется, слив бывшую там воду), быстро вливаем туда же серебящий раствор, энергично покачивая, чтобы растворы смешались (если посуда сделана из парафинированной бумаги, то качать надо, взявшись за стекло, на котором она стоит). Смесь на наших глазах начнет менять цвет: сначала она покраснеет, потом побуреет и вскоре начнет чернеть. Через 1—2 минуты на ее поверхности начнут появляться пленки с металлическим блеском, а на поверхности зеркала и на внутренних стенках посуды (если она стеклянная) начнет отлагаться серебряный слой, приобретающий все более сильный блеск. Вместе с тем жидкость начнет сереть, и в ней начнут появляться хлопья осадка. По мере развития процесса надо как можно энергичнее качать посуду с зеркалом, иначе выделяющийся осадок начнет приставать к серебряному слою и оставит на нем пятна, мешающие равномерному отложению серебра.

Начиная с этого момента в жидкость быстро бросают гигроскопическую вату, заранее нащипанную кусочками размером с грецкий орех. Поскольку в этот момент особенно важно поддерживать жидкость в непрерывном движении, необходим помощник, который и будет бросать кусочки ваты один за другим; тонущие кусочки ваты, движущиеся при этом по поверхности зеркала, сметают падающий на нее хлопьевидный осадок, не давая ему приставать. Для того чтобы эта часть работы была успешна, надо стараться производить как можно более сильное движение жидкости, лучше вращательное. Постепенно кусочки ваты проваливаются в щель между зеркалом и боковыми стенками посуды и перестают делать свое дело. Поэтому лучше предварительно заполнить эту щель ватой до уровня лицевой поверхности зеркала; чтобы зеркало не могло двигаться или качаться, полезно предварительно вложить между его краем и стенками посуды три резиновые пробки подходящего размера.

Учитывая некоторые неудобства этого способа, можно (особенно, если приходится работать без помощника)

просто осторожно обмахивать поверхность серебрующего зеркала большим рыхлым комком ваты, опущенным в жидкость.

Процесс серебрения должен быть прекращен вовремя, т. е. тогда когда серебряный слой приобрел уже достаточную толщину и плотность, но до того, как началось неизбежное образование на нем мутноватого налета, происходящего от выделения мелких кристалликов серебра. Определить этот момент поможет опыт; если пользоваться всегда одним и тем же рецептом и работать при более или менее одинаковых условиях (ход процесса больше всего зависит от температуры; см. ниже), то не так трудно научиться узнавать его наступление по ряду признаков. Как правило, серебрение заканчивается, когда жидкость начинает просветляться и сквозь нее хорошо просвечивает блестящая поверхность зеркала.

Когда процесс серебрения закончится (на что требуется от 3 до 10 минут, в зависимости от температуры), зеркало надо быстро вынуть и тщательно обмыть в большом количестве воды (лучше тепловатой, чтобы ускорить последующую сушку). При обмывании полезно в воде обмахнуть поверхность серебряного слоя клочком ваты (конечно, без всякого нажима) для удаления оставшихся частиц осадка. После мытья простой водой следует ополоснуть зеркало дистиллированной водой и осторожно обсушить его фильтровальной бумагой.

Чтобы не повредить серебряного слоя (который особенно нежен, пока влажен), делать это надо так: зеркало кладется плашмя на стол и на его лицевую посеребренную поверхность осторожно накладываются два-три слоя фильтровальной бумаги. Затем, прижав бумагу к краю зеркала левой рукой, чтобы не давать ей скользить по зеркалу, проводят ребром правой ладони по бумаге слева направо, чтобы она плотно прижалась к поверхности зеркала, и осторожно снимают бумагу (прямо вверх!). Быстро повторив эту операцию со свежей порцией бумаги, обычно удается достаточно обсушить зеркало, чтобы его можно было поставить на окончательную сушку. Сушить зеркало надо стоймя во избежание оседания пыли на серебряный слой. Обсушивание серебряного слоя описанным способом требует очень хорошей фильтровальной бумаги. Если такой нет, то надежнее просто поставить зеркало на ребро и с

помощью куска фильтровальной бумаги убирать воду, стекающую к его нижнему краю.

Высохший слой серебра должен быть равномерным, без пятен, полос или потеков. Легкий желтоватый оттенок, заметный на влажном серебряном слое, при высыхании должен совершенно исчезнуть. На просвет не должно быть видно в слое слишком много дырочек (остающихся в тех местах, где серебро не отложилось из-за мелких пузырьков воздуха или осевших зернышек осадка), а также мест, пропускающих свет. Хороший серебряный слой почти непрозрачен, и только самые яркие источники света (например, спираль электролампы) просвечивают сквозь него голубоватым светом. Если окажется, что слой слишком прозрачен (т. е. очень тонок), можно повторить серебрение; однако это надо делать немедленно, пока серебряный слой еще не высох. Поэтому зеркало сейчас же кладется в дистиллированную воду и готовится новая порция серебрующего раствора.

Хороший серебряный слой обладает сильным блеском полированного металла. Однако очень часто, особенно у начинающих, его поверхность оказывается покрытой мутноватым налетом, который можно удалить хотя бы отчасти при помощи полировки. Полировать можно лишь совершенно высохший слой, когда он станет наиболее прочным. Лучше отложить поэтому полировку до следующего дня. Перед полировкой тщательно обмахивают зеркало ваткой для удаления пыли, которая непременно исцарапала бы нежную поверхность, и затем, взяв большой комок сухой и чистой гигроскопической ваты, осторожно, почти без всякого нажатия, начинают легко тереть им серебряный слой, описывая круги и эллипсы по всей поверхности. При этом беловатый налет, покрывающий поверхность, вскоре начинает как бы сходить, и зеркало на наших глазах «яснеет».

После нескольких минут такой обработки берут тампон из замши (в кусок тщательно постиранной и хорошо высушенной замши заворачивают клочок ваты) и, взяв на него чуть-чуть сухого крокуса (предварительно отмученного), продолжают им полировку. Прочный серебряный слой обычно удается довести полировкой до сильного блеска, но если он получился рыхлым, то полировка его повредит, на нем появятся дырочки, темные пятна и пр. Вообще говоря, полировка серебряного слоя —

дело деликатное, и нужно стремиться к тому, чтобы обходиться, насколько возможно, без нее. При тщательном соблюдении всех правил вполне возможно получить настолько блестящий слой серебра, что полировка оказывается излишней.

Описанный способ, при котором зеркало лежит в серебрящем растворе «лицом» вверх, хотя и удобен, но имеет тот недостаток, что на серебряный слой выпадает осадок, который с помощью ваты, бросаемой в раствор, не всегда удается полностью и вовремя удалить. Особенно это относится к краевым частям зеркала, ибо они хуже «обмываются» плавающими в жидкости клочками ваты, которые упираются в стенки посуды и задерживаются на краях зеркала. В силу этого на серебряной поверхности образуются портящие ее пятна, дырочки и пр.

Избежать вредного действия осадка, выделяющегося из серебрящего раствора, очень легко, если помещать зеркало в серебрящий раствор лицевой стороной вниз. Для этого придется лишь прикрепить (с помощью смолы) к задней поверхности зеркала достаточно длинную и широкую планку, на концах которой, лежащих на краях посуды или на соответствующих

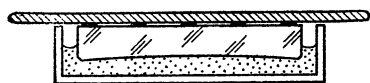


Рис. 76. Серебрение зеркала лицевой стороной вниз.

подпорках, зеркало может висеть в горизонтальном положении лицевой стороной вниз (рис. 76). Конечно, в интересах экономии дорогого серебрящего раствора не следует

подвешивать зеркало слишком высоко над дном посуды; совершенно достаточно, чтобы между лицевой поверхностью зеркала и дном посуды было расстояние в 5 мм. Вымытое, как обычно, зеркало опускают в дистиллированную воду; ее надо налить в посуду в таком количестве, чтобы лицевая поверхность зеркала была под водой. После приготовления серебрящего раствора зеркало вынимают, вливают вместо бывшей в посуде воды отмеренное количество восстанавливающего раствора, смешивают энергичным покачиванием с быстро влитым серебрящим раствором и погружают зеркало, немного его наклонив, с тем, чтобы под его лицевую поверхность, соприкасающуюся с раствором (рис. 76) не попали пузырьки воздуха. Немедленно после опуска-

ния зеркала надо начать энергично покачивать посуду, однако не с такой силой, чтобы загнать под зеркало воздух. При серебрении зеркала лицом вниз очень хорошо виден ход отложения серебряного слоя, за которым можно следить с задней стороны сквозь стекло зеркала (особенно в том случае, если задняя поверхность нематированная). В остальном процесс серебрения ничем не отличается от уже знакомого нам.

Напомним еще раз в конспективной форме правила работы и заодно подчеркнем еще некоторые обстоятельства, которые следует иметь в виду при серебрении.

1. Абсолютная чистота при работе. Зеркало должно быть чистым со всех сторон, иначе возможен занос грязи на лицевую поверхность. Хорошей проверкой чистоты служит такая проба: если подышать на сухую поверхность зеркала, то влага оседает на нем равномерно лишь в случае полной чистоты поверхности; при малейшем же загрязнении на поверхности появляются пятна, полосы и пр. Загрязнение посуды может перейти на зеркало, поэтому никогда не надо пренебрегать мытьем посуды.

2. Чистота реактивов и воды. Надо пользоваться только химически чистыми реактивами, тщательно оберегать их от загрязнения, никогда не употреблять остатков. Дистиллированную воду надо испытывать на чистоту (добавленная капля раствора азотнокислого серебра не должна производить ни малейшей мути; капля дистиллированной воды должна испаряться на стекле, не оставляя никакого следа). Лучше употреблять свежeproкипяченную дистиллированную воду, чтобы избежать вредного влияния газов, которые могли быть растворены в ней.

3. Постоянная и оптимальная температура. Надо стараться производить серебрение при одной и той же температуре, что наилучшим образом обеспечит получение постоянных результатов. Лучше всего серебрить при температуре около 20° Ц. Ни в коем случае нельзя допускать, чтобы зеркало было холоднее серебрующего раствора, иначе на нем может вовсе не отложиться серебряный слой. Чем выше температура, тем быстрее идет выделение серебра и тем больше опасность образования мутного слоя; при слишком низкой температуре отложение происходит очень медленно и слой получается тонким и прозрачным. Чем выше

температура, тем меньше надо брать восстанавливающего раствора.

4. При неудаче не следует спешить с выводами и пытаться наугад вносить изменения в технику серебрения. Надо спокойно повторить процесс серебрения, начиная с отмывки зеркала и стараясь строго следить за соблюдением всех правил. В случае повторной неудачи — искать ее причину путем систематической проверки каждого реактива и всего хода операций. При сознательном и спокойном отношении к делу успех серебрения обеспечен. В спешке что-нибудь существенное легко забывается, и это является обычной причиной неудачи. Это, разумеется, не значит, что операции, требующие быстроты, можно делать медленно: к процессу серебрения лучше всего приложимо древнее изречение: «торопись без поспешности».

5. Опасность взрыва легко свести на нет, если ни одной лишней минуты не оставлять стоять серебящий раствор. При смешении растворов со щелочью надо добавлять щелочь понемногу и при постоянном взбалтывании. При появлении на поверхности растворов заметного количества черных пленок, которые могут быть взрывчатыми соединениями серебра, лучше раствор вылить. Ни в коем случае нельзя оставлять стоять, а тем более доводить до высыхания остатки после серебрения; лучше пожертвовать содержащимся в них серебром, чем рисковать взрывом, который в данном случае не только вполне возможен, но даже вероятен.

Малое вспомогательное зеркало серебрить, разумеется, гораздо легче, чем главное зеркало телескопа. Его можно серебрить лицевой стороной как вверх, так и вниз. В первом случае, после того как влита серебящая смесь и началось выделение хлопьев осадка, вместо того, чтобы бросать в жидкость куски ваты, надо просто двигать по поверхности зеркала рыхлым клочком ваты, прикрепленным к палочке, разумеется, держа его на весу, без нажима. В остальном серебрение диагонального зеркала ничем не отличается от серебрения главного зеркала.

В заключение этой главы надо еще раз напомнить читателю о том, что серебряный слой очень нежен и легко повреждается простым прикосновением. Поэтому он требует осторожного обращения. Трогать серебряный слой руками ни в коем случае нельзя: жир,

остающийся на зеркале от прикосновения пальцев, не только оставляет пятна, но и вызывает со временем порчу и отставание серебряного слоя. Надо защищать зеркало от дождя и росы, не держать его без надобности открытым, так как пыль тоже вредит серебряному слою. Вытирать зеркало как стекло ни в коем случае нельзя, так как при этом царапины неминуемы. Пыль можно удалять только мягкой кистью, осторожно обмахивая ею поверхность. Злейшими врагами серебряного слоя являются некоторые газы, содержащиеся в воздухе, особенно сероводород, вызывающий быстрое потемнение серебра. Рекомендуется поэтому закрывать зеркало крышкой, высланной фильтровальной бумагой, предварительно пропитанной раствором уксуснокислого свинца и высушенной; свинцовая соль поглощает сероводород, предохраняя таким образом серебро от потемнения. Очень быстро темнеет серебряный слой в фабричных районах и на берегу моря, где в воздухе содержится много веществ, вызывающих потемнение серебра.

Для покрытия зеркала новым серебряным слоем надо осторожно смыть серебро ваткой, намоченной в азотной кислоте, а затем поступать как обычно.

Любителю нередко приходится встречаться с затруднениями при приобретении некоторых необходимых для серебрения реактивов. Особенно это относится к азотно-кислому серебру. Если приготовление других реактивов (едкой щелочи и аммиака) собственными средствами затруднительно, да и не нужно (при желании их можно достать), то азотно-кислое серебро можно легко приготовить самому из куска сломанной серебряной ложки и т. п.

Для этого надо растворить серебро в азотной кислоте (крепкую, химически чистую азотную кислоту разбавить примерно двойным количеством дистиллированной воды), стараясь избегать избытка кислоты. На серебро, положенное в фарфоровую чашку (можно при осторожности и в стеклянную колбу), наливают горячей дистиллированной воды и добавляют крепкую азотную кислоту; по мере прекращения выделения бурого газа (двуокиси азота) подливают понемногу кислоты, пока все серебро не растворится (на растворение 1 весовой части серебра уйдет до 1½ частей крепкой азотной кислоты).

Полученный темно-синий (от содержания меди в изделии) раствор выпаривают досуха в фарфоровой чашке и оставшуюся сухую массу осторожно нагревают до расплавления (на жаровне, плитке), причем из нее начинают выделяться пузырьки бурой двуокиси азота, а совершенно жидкая расплавленная масса чернеет от выделения окиси меди. Немедленно по прекращении выделения двуокиси азота (когда вся медь выделилась) сплав выливают (лучше всего в алюминиевую ложку, кастрюльку и т. п.) и по остывании растворяют в дистиллированной воде.

После отстаивания от осадка окиси меди прозрачный раствор азотнокислого серебра сливают, а на осадок наливают еще небольшое количество дистиллированной воды для извлечения остатков азотнокислого серебра. После выпаривания раствора останется чистое азотнокислое серебро. Надо заметить, что для удаления следов хлористых соединений следует растворять черное от окиси меди сплавленное азотнокислое серебро в большом количестве воды, беря не менее 20 частей воды на одну часть сплава.

При работе надо соблюдать осторожность: выделяющаяся двуокись азота очень вредно действует на дыхательные пути, поэтому, если нет тяги, работать необходимо на открытом воздухе. Точно так же следует остерегаться брызг азотной кислоты и раствора азотнокислого серебра, оставляющего неотмывающиеся черные пятна на платье и на руках. Впрочем, если смочить их йодной настойкой, они обычно легко потом удаляются раствором гипосульфита.

Г Л А В А VII

МОНТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ ТЕЛЕСКОПА. ЮСТИРОВКА И ИСПЫТАНИЕ

1. Основная задача

Итак, мы обладаем обеими наиболее ответственными оптическими частями: главным (вогнутым) и вспомогательным (плоским) зеркалами. Кроме того, подберем подходящий окуляр.

Теперь перед нами стоит главная задача — создать хорошо выверенную оптическую систему телескопа. Для этого надо прочно закрепить (монтировать) зеркала и окуляр, установив их в нужных местах и придав строго определенные наклоны каждому из элементов системы (юстировать). Надо заметить, что качество телескопа зависит не только от качества оптических его элементов, но и от правильности юстировки. Поэтому от монтажа мы требуем прочности и устойчивости, а для юстировки мы должны предусмотреть в монтаже все возможные и нужные приспособления для плавного изменения положений, поворотов и наклонов зеркала и окуляра с последующим прочным закреплением.

При установке главного зеркала мы должны так его укрепить, чтобы пучок лучей, параллельных оптической оси, создал после отражения от зеркала изображение в главном фокусе на той же оси. Для этого в оправе зеркала надо укрепить три винта, которые позволили бы изменять его наклон.

Затем для ньютоновского рефлектора надо установить между главным зеркалом и его главным фокусом плоское зеркало под углом, точно равным 45° . При этом оптическая ось изменит свое направление на 90° . Правильная установка плоского зеркала, пожалуй, самая сложная часть юстировки.

Далее, мы должны установить окуляр таким образом, чтобы его оптическая ось совпадала с «отраженной» оптической осью зеркала и чтобы можно было перемещать окуляр вдоль оптической оси для фокусировки. Решение этой задачи требует сооружения жесткой трубы телескопа. Трубу можно делать по-разному в зависимости от вкуса и возможностей конструктора. Она может быть круглой, шестигранной, с квадратным сечением, а можно соорудить совсем простую конструкцию типа «чикинской доски». Но в ньютоновском рефлекторе неизбежна необходимость создания оправы главного зеркала, стойки с оправой малого зеркала и окулярной части. Чем тщательнее они изготовлены, тем проще и надежнее юстировка.

2. «Чикинская доска»

Желание поскорее увидеть хоть часть того, что способны показать наши зеркала, настолько естественно и закономерно, что никто не обвинит нас в нетерпеливости. Не составляет особых затруднений устроить временную установку, которая позволит не только проверить

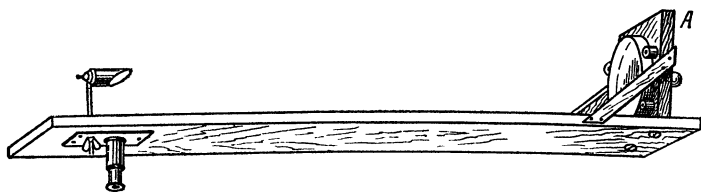


Рис. 77. «Чикинская доска» (по А. А. Чикину; 1915).

созданную нами оптику, но и произвести попутно некоторые наблюдения.

Общее представление об этой установке, рекомендованной в свое время А. А. Чикиным, дают рис. 77 и 78.

Возьмем хорошо выстроганную сухую доску шириной на 2 см больше диаметра главного зеркала, толщиной около 25 мм и длиной немногим более его фокусного

расстояния; следовательно, главное фокусное расстояние зеркала должно быть заранее известно. Впрочем, мы уже умеем его определять. К одному из концов этой доски привинчивается перпендикулярно к ней другая, квадратная доска (А) со стороной, равной ширине первой доски. Для прочности она укрепляется косынками из деревянных планок, фанеры или железными полосами. Эта доска заменяет оправу главного зеркала. Три пробки на шурупах или три шурупа, обтянутые резиновыми трубками, будут служить для удержания зеркала на этой доске совершенно так же, как удерживался шлифовальник на столе. Только надо их укрепить так, чтобы зеркало не могло смещаться при самых разнообразных поворотах всей конструкции; иными словами, упоры должны достаточно плотно прилегать к краям зеркала. Хорошо под шляпки шурупов подложить упругие, слегка выступающие шайбы (из резины), чтобы зеркало не могло вывалиться. Сквозь эту же доску надо пропустить насквозь, с ее тыльной стороны, три шурупа, расположенных в вершинах равностороннего треугольника.

Концы шурупов следует закруглить напильником. Таким образом, зеркало будет опираться своей тыльной стороной на три точки; ввинчивая или вывинчивая шурупы и осаживая зеркало, мы сможем регулировать его наклон относительно доски, осуществляя таким простым способом один из элементов юстировки. Нашей целью на данном этапе должна быть регулировка направления оптической оси зеркала; мы ее должны «выставить» тремя шурупами таким образом, чтобы она была параллельна средней продольной прямой линии, прочерченной на доске.

Теперь надо измерить вынос центра зеркала над плоскостью доски. Именно на таком расстоянии от нее должен будет находиться центр плоского зеркала. При

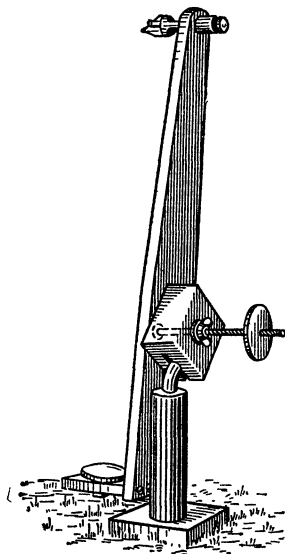


Рис. 78. Один из вариантов установки «чикинской доски» на простейшем азимутальном штативе.

такой конструкции плоское зеркало должно быть укреплено на стойке, которая детально изображена на рис. 79.

Берем металлическую прочную пластину, в которой продельваем два отверстия: одно маленькое (ee), а второе большое (dd). В отверстии (dd) должна быть сделана нарезка, в которую ввинчивается окулярная труба.

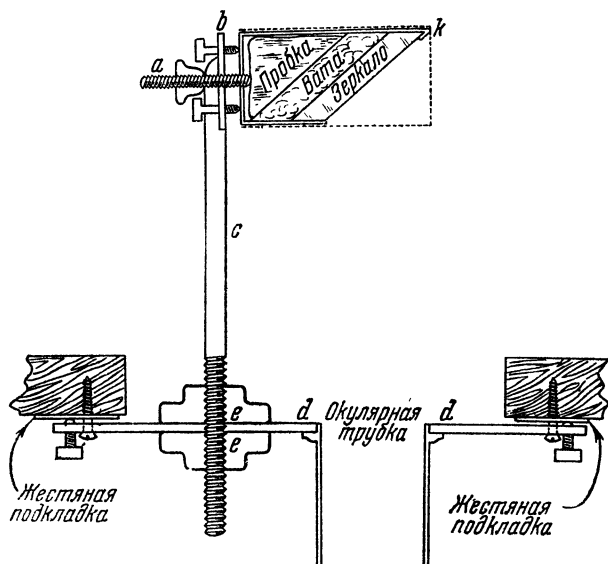


Рис. 79. Монтировка диагонального зеркала на стойке по А. А. Чикину.

В отверстие (ee) вводится металлический стержень (c) с двумя гайками (e). Эти гайки с помощью нарезок дают возможность плоскому зеркалу перемещаться перпендикулярно к плоскости «чикинской доски». К верхнему концу стержня припаян кружок, к которому прикрепляется оправа плоского зеркала (k). Винт (a) закрепляется гайкой, а три винта (b), установленные через 120° по окружности, позволяют наклонять плоское зеркало под нужным углом при выполнении второго этапа юстировки.

Как мы увидим дальше, такая установка не идеальна, но для чикинской доски она, пожалуй, единственная, которую можно рекомендовать.

Как видно из рис. 79, окулярная часть должна быть привинчена к продольной доске, в которой должно быть

сделано отверстие. Где его расположить? Это зависит от того, как далеко мы хотим вынести изображение за плоскость доски. Если диаметр главного зеркала D , его главное фокусное расстояние F , расстояние края главного зеркала от плоскости доски g , толщина доски h и желаемый вынос изображения от плоскости доски k , то, как легко сообразить, центр отверстия должен отстоять от поверхности главного зеркала на

$$F - \left(\frac{D}{2} + g + h + k \right).$$

Естественно, что надо было предварительно согласовать с этим выносом изображения и размеры плоского зеркала (см. § 3 гл. IV).

При укреплении окулярной части следует внимательно проверить ее положение на доске с тем, чтобы не сделать какой-либо ошибки. Полезно также нанести тушью в центре главного зеркала небольшой кружок диаметром около 1 см *) и на оправу плоского зеркала наклеить (временно) крест из двух взаимно перпендикулярных черных ниток так, чтобы этот крест нитей располагался на 2—3 мм выше поверхности зеркала. Эти метки помогут при уточнении юстировки. Остается последнее — вставить окуляр в окулярный тубус и навести на фокус.

При юстировке может оказать существенную помощь так называемая центрировочная трубка. Это трубка длиной около 25 см, вставляемая в окулярный тубус вместо окуляра. На переднем крае трубки натягиваются две нити, которые образуют крест. В глазном (заднем) конце трубки помещается маленькая диафрагма, сквозь которую крест хорошо виден. При юстировке, которая будет подробно описана далее, наблюдатель воспользуется всеми наблюдающимися крестами и черным пятнышком в центре зеркала для совмещения оптической оси зеркала с геометрической осью телескопа.

После того как «чикинская доска» готова, надо изготовить хотя бы простейшую установку телескопа. Один из вариантов такой установки изображен на рис. 78. Чтобы наш примитивный телескоп был удобным в работе, его надо уравновесить. Для этого, установив все оптические

*) Эта метка ничему не вредит, потому что центр зеркала «не работает»: излучение небесных светил на него не падает, так как оно загорожено плоским зеркалом.

части — зеркала и окулярную часть, — пристроив искатель (см. ниже), мы должны опытным путем найти положение центра тяжести всего нашего сооружения и отметить его на продольной доске. В этом месте мы укрепим горизонтальную ось штатива.

Штатив простейшей азимутальной установки состоит из прочно укрепленной вертикальной оси, которую можно сделать из обточенной водопроводной трубы диаметром 35—40 мм. Годится и алюминиевая труба (иногда из таких труб изготавливают карнизы для занавесей). Ее проще всего наглухо заделать в кирпичный или деревянный столб, прочно вкопанный в землю; если же надо убирать всю установку после каждого наблюдения, то можно сделать деревянную подставку в виде массивного трехногого табурета (высотой около полуметра).

На эту ось плотно надевается массивная деревяшка — «куб», которая может вращаться вокруг вертикальной оси. В ней следует сделать в перпендикулярном направлении сквозное отверстие, в которое вставить прочный стержень, оканчивающийся нарезкой. На эту нарезку навинчивается барашек. Стержень должен быть продлен с тем, чтобы на нем можно было укрепить груз, уравнивающий вес телескопа (противовес). Второй конец стержня должен иметь уширение.

В центре тяжести «чикинской доски» надо просверлить отверстие такого диаметра, чтобы стержень плотно вошел в него и закрепился уширенной частью. После этого стержень вводится в отверстие, сделанное в «кубе», и на него навинчивается барашек. Трущиеся поверхности смазываются густой смазкой или натираются мылом.

Такой, хотя и примитивный, штатив позволяет наводить инструмент в любую точку неба. Наведение ньютоновского рефлектора на нужный нам объект — задача не очень простая. Лучше всего укрепить параллельно оптической оси «искатель» — небольшую зрительную трубку, имеющую небольшое увеличение и большое поле зрения. При этом надо так отрегулировать положение искателя, чтобы наблюдаемое светило одновременно находилось в центре поля зрения как искателя, так и телескопа.

Одно из преимуществ «чикинской доски» состоит в том, что ее легко после наблюдений уносить в помеще-

ние. Достаточно снять с вертикальной оси всю конструкцию, что легко могут сделать два человека. При этом центрировка и юстировка не испортятся. Описанный простейший вариант «чикинской доски» может быть при желании усовершенствован.

Способы юстировки мы опишем позднее, а теперь перейдем к описанию более совершенных монтировок.

3. Устройство трубы рефлектора

Чикинская доска может удовлетворить любителя только на первых порах. Она позволяет ему сделать исследование зеркал и выполнить некоторые наблюдения. Несомненно, что каждый из любителей захочет изготовить более совершенную монтировку, и в первую очередь он встретится с необходимостью сделать трубу рефлектора.

Она должна удовлетворять двум основным условиям 1) обеспечивать возможность приведения всех оптических частей рефлектора в правильное взаимное положение, т. е. его центрировку и юстировку, а также прочно сохранять это положение, и 2) насколько возможно, уменьшить вредное влияние токов воздуха неодинаковой плотности.

Прежде всего надо решить вопрос о том, какую форму трубы мы выберем. Здесь может быть много различных решений.

Если мы можем изготовить трубу из металла, то лучше всего сделать ее круглой. Правда, выгибание трубы из листового материала достаточной толщины (2—3 мм) — задача не очень простая.

При выборе между металлической и деревянной трубами многие отдадут предпочтение последней ввиду ее большей доступности. В самом деле, если не гнаться за особенно «профессиональным» видом телескопа, надо, пожалуй, предпочесть деревянную трубу квадратного или шестигранного сечения; плоские грани гораздо удобнее для крепления окулярной части и осей. Жесткость же деревянной трубы вполне достаточна. Основным требованием к материалу для деревянной трубы будет, конечно, сухость; труба, сделанная из сырого леса, обязательно покоробится. Прекрасным материалом является толстая многослойная фанера,

Стенки трубы квадратного сечения мы скрепим при помощи шурупов с четырьмя продольными брусками, расположенными внутри нее. Для большей прочности можно стянуть трубу в нескольких местах железными полосками наподобие того, как укрепляются упаковочные ящики. На переднем и заднем концах трубы укрепим фланцы — по четыре поперечные планки шириной 60—80 мм и толщиной 30 мм, создавая как бы дополнительную окантовку трубы. Если их скрепить угольниками, употребляемыми, например, для укрепления рам, то труба приобретет очень большую прочность. Для большего изящества в оба конца трубы можно вставить сделанные из фанеры квадратные наличники с выпиленными в них круглыми отверстиями; диаметр отверстия должен быть подобран так, чтобы не допустить виньетирования.

Более длинную и тяжелую трубу 250-миллиметрового телескопа, во избежание гнутия, лучше укрепить еще снаружи диагональными планками крест-накрест также при помощи шурупов.

Теперь еще надо предусмотреть приспособление для закрывания зеркала крышкой. Для этого в задней части трубы, там, где будет находиться главное зеркало, надо сделать продольный вырез и в нем укрепить на петлях дверцу; ее длина должна быть немногим больше диаметра главного зеркала.

Длину трубы, как уже говорилось, надо сделать примерно равной фокусному расстоянию. При такой длине, правда, диагональное зеркало не будет обеспечено от запотевания, так как окажется очень близко от конца трубы. Поэтому надо предусмотреть устройство «противоросника» — легкой насадки из картона или тонкой жести длиной в 2—3 поперечника трубы, которая могла бы в случае надобности надеваться на передний конец трубы, соответственно удлиняя ее. Внутренние стенки трубы должны быть оклеены черной матовой бумагой или выкрашены в черный цвет клеевой краской с добавлением сажи для устранения рассеянного света. Для матового чернения внутренности трубы, оправы главного и плоского зеркал служит матовый лак; еще лучшие результаты дает спиртовой раствор шеллака, к которому добавлено достаточное количество хорошей сажи. Полезно также сделать крышку, которая закрывала бы передний конец трубы.

Значительно труднее изготовить деревянную трубу шестиугольного или восьмиугольного сечения. Особых преимуществ перед квадратной трубой, кроме более красивого вида, такие трубы не имеют.

Главное зеркало укрепляется в задней части трубы с помощью оправы, устроенной таким образом, чтобы зеркало можно было слегка наклонять для юстировки и надежно закреплять в правильном положении.

Основное требование, предъявляемое к оправе, — ее прочность. Как бы ни была оправка сделана, она состоит из прочной основной пластины, окруженной бортом, удерживающим зеркало от боковых сдвигов.

Простейшая оправка изображена на рис. 80. Ее дно — круглая пластина толщиной не менее 40 мм — изготавливается из прочного дерева (дуб, береза). Можно сделать ее и из 10-миллиметровой фанеры, многослойной клееной; надо

взять не менее четырех слоев. Борт оправы придется сделать металлическим из полосы толщиной 5 мм. Для удержания зеркала от бокового скольжения надо сделать в борту оправы три отверстия на расстоянии 120° друг от друга с винтовыми нарезками, в которые пропустить винты. На их концы зеркало сможет опираться тремя точками боковой поверхности; винты никоим образом не должны быть сильно «затянуты». Полезно проложить между оконечностями винтов и боковой поверхностью зеркала прокладки из твердой резины.

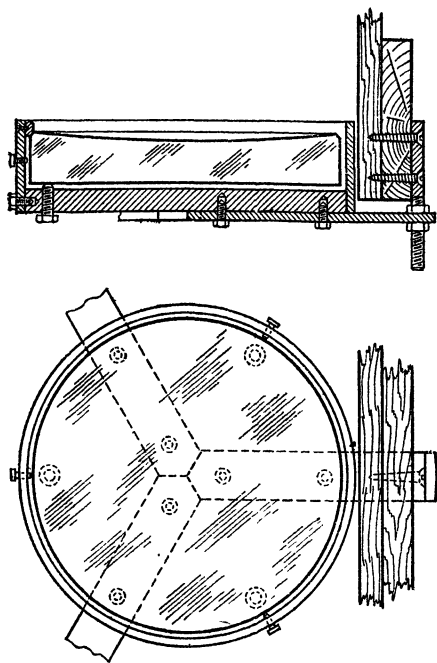


Рис. 80. Устройство несложной оправы для главного зеркала.

Верхняя оконечность борта должна иметь диаметр на 2—3 мм меньший диаметра зеркала, чтобы последнее не могло вывалиться из оправы.

Теперь возможны два решения. Первое из них предполагает, что оправа наглухо прикреплена к трубе. В таком случае зеркало должно лежать не на дне оправы, а опираться на три установочных винта. Они ввинчиваются в дно оправы и, как в случае чикинской доски, позволяют изменять наклон зеркала. В этом случае зеркало «разгружено на три точки». Для прикрепления оправы к трубе изготавливают три металлических

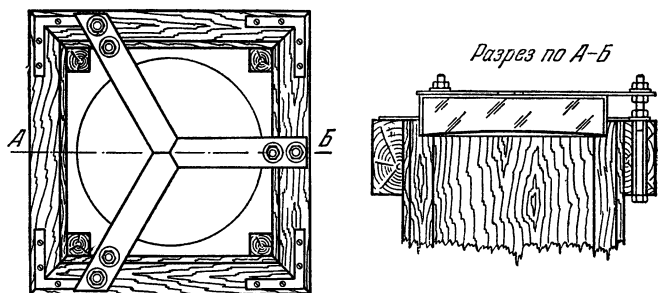


Рис. 81. Крепление оправы, изображенной на рис. 80 на заднем конце деревянной трубы квадратного сечения: вверху—вид сечения, перпендикулярного к оптической оси; внизу—вид сбоку.

полоски, которые привинчивают шурупами ко дну оправы и к фланцу трубы (см. рис. 80).

При втором решении зеркало прочно закрепляется в оправе, а оправа целиком перемещается относительно трубы при помощи регулировочных винтов. В этом случае зеркало можно положить на дно оправы, можно опереть его, как и в первом случае, на оконечности трех винтов, но можно использовать и разгрузку на девять точек, как это было описано на стр. 92 (см. рис. 23). Это особенно важно в том случае, если зеркало тоньше нормы.

Теперь регулировочные винты должны быть укреплены в местах сцепления оправы с трубой. К тыльной стороне оправы прикрепляются три планки при помощи шурупов, как и в предыдущем случае, но теперь на внешних концах каждой из планок надо сделать по два отверстия, из которых одно должно иметь винтовую нарезку. В это отверстие войдет отжимной болт, который

позволит регулировать наклон оправы по отношению к продольной геометрической оси трубы. Во второе отверстие (без нарезки) надо ввести прижимной болт, который должен ввинчиваться в отверстие, сделанное в фланце трубы (рис. 81).

Описанное устройство оправы является лишь одним из многих возможных вариантов. Если представляется

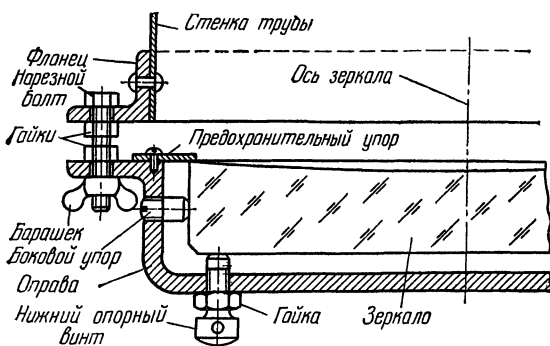


Рис. 82. Устройство и крепление более совершенной металлической оправы главного зеркала.

возможность сделать металлическую оправу, то можно использовать схему, изображенную на рис. 82.

Теперь обратимся к конструкции крепления плоского зеркала и окулярной части. Поскольку мы имеем дело с рефлектором системы Ньютона, мы будем выводить изображение из трубы под прямым углом к продольной оси трубы. Следовательно, в одной из четырех ее сторон надо сделать отверстие. Где его расположить, мы уже говорили. Можно использовать такую же конструкцию крепления плоского зеркала и окулярной части, как уже было описано, но она обладает одним недостатком. Как мы видели, стойка, несущая оправу плоского зеркала, может перемещаться только в одном направлении.

Лучше предпочесть другой способ крепления, состоящий в подвеске диагонального зеркала на растяжках, укрепленных на стенках трубы (рис. 83).

Часто рекомендуют делать три растяжки, расположенные по радиусам под углом 120° друг к другу, но лучше применить схему четырех растяжек, хотя бы потому, что она удобнее при трубе квадратного сечения.

Растяжки изготавливаются из тонких металлических полос, лучше из пружинной стали. В центре конструкции надо поместить выточенный из мягкого металла (латуни или меди) цилиндр с диаметром, равным диаметру оправы плоского зеркала. В центре цилиндра делается небольшое отверстие для ввода стержня (а, см. рис. 79),

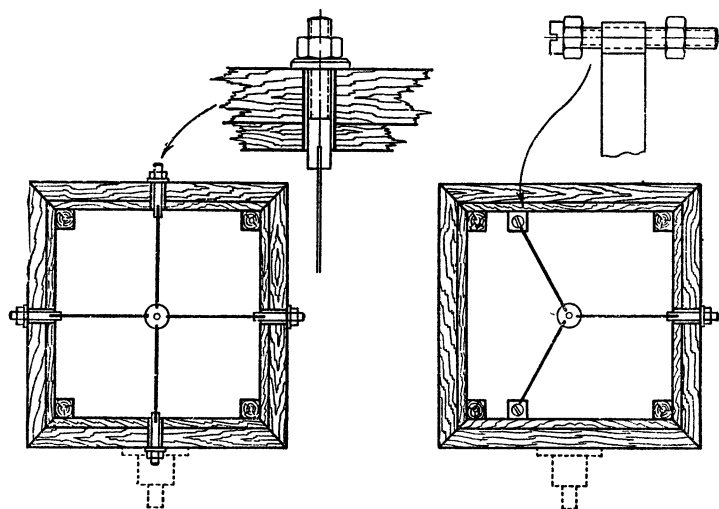


Рис. 83. Крестовина из растяжек для укрепления в трубе оправы с диагональным зеркалом (слева — из четырех стальных полосок, справа — из трех). Вверху изображены детали креплений.

скрепленного с оправой плоского зеркала. Надо также сделать три отверстия (b) для регулировочных винтов.

Растяжки должны быть приклепаны или припаяны к этому цилиндру. Второй конец каждой растяжки должен быть скреплен с натяжным болтом, прикручивающимся к стенке трубы (см. рис. 83). Сама оправа плоского зеркала не отличается от уже описанной. Нужно выточить цилиндр и срезать его под углом 45° . Для круглого плоского зеркала надо выточить на станке круглую коробочку; на ее наружной стенке надо сделать нарезку, на которую навинтить кольцо с закраиной, которая не позволяла бы зеркалу выпасть из оправы. В дне этой коробочки нужно сделать два или три отверстия, сквозь которые пропустить болтики, при помощи которых оправу малого зеркала можно привинтить к срезу цилиндра. Мы уже говорили, что для улучшен-

ной юстировки полезно на кольцо, снаружи, укрепить две черные взаимно перпендикулярные нити, образующие крест.

При креплении диагонального зеркала на растяжках окулярная часть уже не связана с плоским зеркалом, и

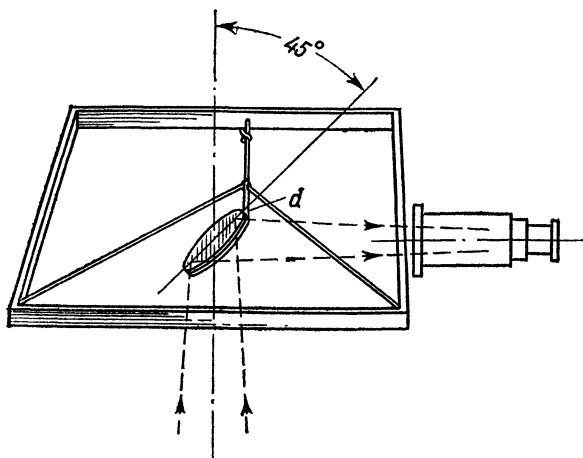


Рис. 84. Принципиальная схема крепления плоского зеркала.

потому надо быть особенно внимательным при устройстве прорези в боковой стенке трубы, предназначенной для крепления окулярного тубуса.

На рис. 84 изображена принципиальная схема установки плоского зеркала и окулярной части.

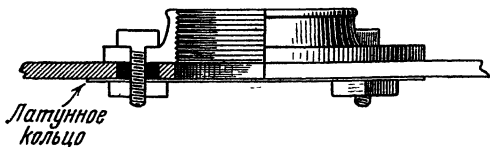


Рис. 85. Устройство основания для окулярной трубки, допускающее передвижения с целью регулировки (левая половина показана в разрезе).

Остается устроить приспособление для окуляра. Металлическую окулярную трубку без токарного станка, конечно, изготовить нельзя. Основание для окулярной трубки хорошо устроить наподобие того, как показано на рис. 85, чтобы окуляр можно было для регулировки передвигать параллельно самому себе во все стороны и

закреплять в правильном положении. Трубка, в которую вставляется окуляр, ввинчивается в это основание, причем нужно устроить ее так, чтобы она пружинила, плотно удерживая окуляр, и в то же время допускала плавные передвижения последнего. Для этого с наружной стороны обращенного к наблюдателю конца трубка стачивается до толщины в 0,5 мм, а с другого конца — немного растачивается изнутри; сделав узкие продольные пропилы на том конце, где трубка сточена снаружи, получим то, что надо — вставляемый в трубку окуляр будет упруго удерживаться в ней и плавно передвигаться при фокусировке.

Можно также использовать оправу от проекционного или фотографического объектива при наличии в ней фокусировочной кремальеры.

В связи с только что сказанным следует напомнить о том, что окуляры различных систем при точной наводке на фокус оказываются на различном расстоянии от главного фокуса. Так, окуляр Гюйгенса, у которого фокус находится между линзами, должен быть вдвинут глубже в окулярную трубку, чем окуляр Рамсдена, у которого фокус находится впереди линз. Это надо принять во внимание при расчете окулярной трубки и при определении «выноса» изображения, а следовательно, и расстояния от центра диагонального зеркала до главного фокуса. При слишком малом выносе есть опасность, что при пользовании окулярами Гюйгенса окулярную трубку придется вдвинуть настолько глубоко, что наблюдать будет неудобно и даже передний конец трубки окажется в просвете трубы, на пути лучей. Чрезвычайно большой вынос невыгоден. Он потребует очень длинной окулярной трубки и преувеличенного размера диагонального зеркала.

Если изготовление металлической окулярной части окажется затруднительным, то придется воспользоваться деревянной дощечкой со вставленной в проделанное в ней отверстие картонной трубкой, что, конечно, менее прочно.

Для защиты зеркал от пыли необходимо устроить легко надевающиеся, не портящие юстировки крышки. Их лучше всего сделать из жести, но в крайнем случае можно склеить и из картона, пропитав его парафином или выкрасив спиртовым лаком. Крышки должны быть такой глубины, чтобы, будучи надетыми до упора, они

не доходили бы до верхнего края бортов оправ на 10 мм; этот запас пространства внутри крышек позволит не опасаться повреждения серебряного слоя, а также может понадобиться, если мы захотим вложить в крышки предохранительный слой бумаги с поглотителем вредных для серебра газов, таких, как сероводород и др.

Надевать крышки, особенно на главное зеркало, надо осторожно; прорезь в трубе и дверка делаются узкими, и вводя крышку внутрь трубы, приходится ее поворачивать. Возникает опасность повреждения покрытия главного зеркала боковой поверхностью крышки.

Теперь коснемся последнего вопроса: о токах воздуха, возникающих внутри трубы и портящих изображение.

Первые же наблюдения небесных объектов откроют нам на опыте значение колебаний температуры. Вынеся зеркало из теплой комнаты под открытое небо (особенно, если дело происходит зимой!), мы первое время вообще увидим вместо звезд волнующиеся размытые пятна — настолько сильно будет портить изображения деформация зеркала и струи теплого воздуха, исходящие от него. По мере выравнивания температуры изображения становятся все более отчетливыми, но еще долгое время мы будем замечать, что фокусное расстояние зеркала изменяется. Пройдет не менее 20—30 минут, прежде чем зеркало «успокоится» и можно будет приступить к наблюдениям по-настоящему. Здесь надо обратить внимание на два обстоятельства. Во-первых, чикинская доска совсем не защищена от влияния атмосферных помех, тех токов воздуха в приземном слое, которые будут портить изображения. Это ее основной недостаток. Во-вторых, зеркала соприкасаются с влажным воздухом и потому легко покрываются росой — «запотевают». Росу стирать с зеркала нельзя, так как мы попортим серебряный слой. Вообще же роса очень вредна для серебряного слоя, так как он от росы быстро темнеет. Если же внести зеркало после наблюдения в теплую комнату, оно обязательно покроется росой. Вот для чего особенно нужны крышки на зеркалах.

Но и в трубе рефлектора могут возникать воздушные токи. В трубе, замкнутой с нижнего конца (где находится главное зеркало), вследствие охлаждения ее стенок, а также в силу замещения внутреннего (более теплого) воздуха наружным, более холодным, возникают

токи воздуха, неоднородного по своей температуре, а следовательно, и по показателю преломления, что портит изображения. Чтобы устранить этот неприятный фактор, надо прежде всего обеспечить свободный сток холодного воздуха; для этого ни в коем случае не следует заделывать наглухо задний конец трубы, а, наоборот, оставить широкую щель вокруг оправы с зеркалом. Далее, чем выше теплопроводность стенок трубы, тем, очевидно, легче и быстрее будут передаваться внутрь трубы изменения наружной температуры. Поэтому металлическая труба будет скорее принимать температуру окружающего воздуха, но зато будет и легче передавать внутрь ее изменения. Деревянная труба, наоборот, будет менее чувствительна к колебаниям температуры, но будет медленнее принимать температуру окружающего воздуха.

4. Центрировка и юстировка телескопа

Наиболее наглядно можно ознакомиться с сущностью отладки рефлектора (центрировки и юстировки) на чикинской доске.

Установив главное зеркало в его оправе, направим телескоп на Солнце и поймает изображение на кусочек белого картона. Если зеркало уже посеребрено, то с изображением Солнца надо соблюдать большую осторожность, настолько велики яркость и количество тепла, собираемого зеркалом в фокусе.

Очень удобно взять в качестве экрана небольшой картонный кружок диаметром, в два раза большим изображения Солнца (в случае зеркала диаметром 150 мм с фокусным расстоянием в 1275 мм изображение Солнца имеет диаметр около 11 мм). Экран надо укрепить на куске жесткой проволоки; второй конец проволоки должен быть заострен с тем, чтобы его можно было воткнуть в доску. Проволока должна быть такой длины, чтобы при втыкании заостренного конца на некоторую глубину центр картонного кружка находился на одном уровне с центром главного зеркала над поверхностью доски.

Проведем на поверхности чикинской доски продольную среднюю линию — ее «геометрическую» ось. Воткнув проволоку где-то вблизи конца доски, наведем телескоп на Солнце так, чтобы тень от кружка упала в центр главного зеркала (мы предполагаем, что плоское

зеркало и окулярная часть еще не установлены). Если на кружке мы увидим изображение Солнца, то все в порядке. Если же его не окажется, то это означает, что наклон главного зеркала неправилен. Регулируя упорные винты в оправе главного зеркала, т. е. изменяя его наклон, мы должны добиться, чтобы изображение Солнца (пусть внефокальное) попадало на экран, если тень от экрана падает в центр зеркала. Это будет означать, что оптическая ось главного зеркала параллельна «геометрической» оси доски.

Теперь установим вместо пробного экрана всю окулярную часть вместе со стойкой диагонального зеркала. Мы предполагаем, что нами уже установлена нужная длина стойки. Экран больше нам не нужен. Теперь, если тень плоского зеркала падает в центр главного зеркала, то плоское зеркало должно быть освещено отраженными лучами Солнца. Центрировка закончена.

Однако это еще не означает, что отраженные от него солнечные лучи попадут в окулярную трубку. Мы увидим «зайчик» на внутренней стороне доски. Регулируя болтиками b и a (см. рис. 79) наклон плоского зеркала, мы должны добиться, чтобы изображение Солнца попало в окулярную трубку. *Смотреть сквозь окулярную трубку на изображение Солнца категорически запрещено* — можно навсегда ослепнуть. Поэтому надо смотреть на экран (или матовое стекло), поставленный вместо окулярной трубки.

Конечно, это еще не точная юстировка рефлектора; ее надо улучшать, но как это сделать, мы скажем ниже.

Описывая этот способ, мы только хотели сделать более ясной сущность процесса отладки телескопа. На практике рефлектор центрируется и юстируется иначе, хотя принцип остается тем же самым.

Ход юстировки зависит от способа крепления диагонального зеркала. Сначала рассмотрим его крепление на стойке. В этом случае вся окулярная часть вместе со стойкой составляет одно целое (см. рис. 79). Устанавливаем длину стойки в соответствии с расчетными данными при помощи гаек (ee). Далее вводим в окулярный тубус центрировочную трубку. Не устанавливая окулярную часть на предназначенное ей место, расположив ее на столе, посмотрим в центрировочную трубку. Мы увидим плоское зеркало, в центре которого виден небольшой ромбик; он образован натянутым на оправе плоского

зеркала крестом нитей и их отражением от зеркала. Поворачивая плоское зеркало вокруг оси c и действуя болтиками b и гайкой a , добиваемся такого положения плоского зеркала, при котором мы увидим крест нитей центрировочной трубки совпавшим с центром ромбика. После этого прочно закрепляем гайки (ee), подтягиваем болтики b и гайку a так, чтобы вся окулярная часть вместе с плоским зеркалом составляла одно целое.

Теперь ставим всю окулярную часть на предназначенное ей место в трубе рефлектора. Снова смотрим в центрировочную трубку, наведя телескоп на участок дневного неба. Мы увидим отражение главного зеркала в диагональном. Наша задача состоит теперь в том, чтобы так наклонить всю окулярную часть, чтобы черная метка в центре главного зеркала проектировалась в центре ромбика и на кресте нитей центрировочной трубки. Этого можно достигнуть, наклоняя и, может быть, слегка поворачивая всю окулярную часть нижними болтами, укрепленными в основной пластине окулярной части (см. рис. 79).

Остается последнее — выверить наклон главного зеркала. Для этого надо пронаблюдать следующую картинку. Глядя в центрировочную трубку, мы увидим отражение диагонального зеркала в главном зеркале. Это отражение должно совместиться с центральной черной меткой главного зеркала. Если оно не совмещено, то надо изменить наклон главного зеркала, действуя болтами в его оправе. Отражение диагонального зеркала передвигается при этом в направлении, обратном наклону оси главного зеркала: наклоняя, скажем, ось кверху, мы смещаем отражение книзу и наоборот. Поэтому, нажимая какой-либо из трех винтов, мы передвигаем отражение диагонального зеркала в направлении к той точке зеркала, где находится этот винт. Попеременно действуя винтами, мы быстро добьемся того, что отражение диагонального зеркала будет видно точно в центре главного зеркала. Здесь нужно добиваться наивозможной большей точности, не пренебрегая даже смещением в 1—2 мм (при $f = 1275$ мм смещение на 2 мм означает наклон оси в $0^{\circ},11$ (рис. 86)).

В том случае, если диагональное зеркало укреплено на растяжках, мы не сможем согласовать его положение с положением окулярной части до установки последней на телескоп. Эту операцию придется производить в со-

бранном телескопе, подвигая окулярную часть и плоское зеркало (вдоль оси трубы) и меняя наклон. Все остальные операции остаются теми же самыми.

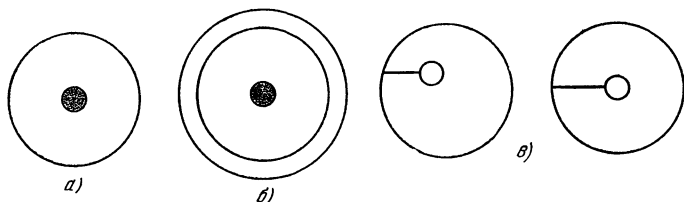


Рис. 86. Юстировка рефлектора системы Ньютона: а — картонный круг одинакового диаметра с главным зеркалом, наложенный на главное зеркало; центр круга отмечен черным кружком; б — вид (из центра окулярной трубы) отражения этого круга в диагональном зеркале при правильном положении последнего (видимые очертания диагонального зеркала показаны внешней охватывающей окружностью); в — вид отражения диагонального зеркала (эллиптического, смонтированного на стойке, при неправильном наклоне главного зеркала — слева и при правильной установке последнего — справа (картонный круг убран).

Окончательную проверку юстировки можно, как советует А. А. Чикин, произвести следующим образом. Смотрим в центрировочную трубку, установив в ее окончании более широкую диафрагму, диаметром, скажем, равным 1 см. Осветим лампочкой глаз: Тогда наблюдатель увидит такую картину, которая изображена на рис. 87. Он увидит нити, стороны ромба, малое зеркало, проектирующееся в центре большого, и кроме того, свой глаз! Если изображение глаза совпадает с изображением черной метки главного зеркала и попадает на крест нитей центрировочной трубки и в центр «ромба», то центрировка и юстировка сделаны хорошо.

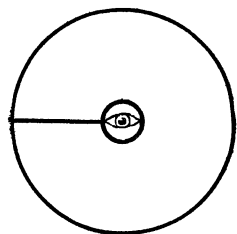


Рис. 87. Отражение глаза наблюдателя, смотрящего из центра окулярной трубки при правильной юстировке рефлектора (по А. А. Чикину; 1915).

И все же о правильности настройки телескопа мы будем судить по виду изображения звезд. Проверку юстировки рефлектора приходится часто повторять.

5. Испытание телескопа

Испытание телескопа лучше всего произвести, наблюдая звезды. Однако навести ньютоновский рефлектор на нужную звезду очень трудно, если нет искателя. И даже если искатель есть, то надо его предварительно

установить так, чтобы его оптическая ось была параллельна оптической оси телескопа. В этом нам поможет Луна. Дело в том, что рефлектор очень легко навести на Луну и без искателя. «Шаря» по небу, мы увидим, что по мере приближения телескопа к Луне фон неба (засветка поля зрения) становится все более ярким. Перемещая телескоп в ту сторону, куда увеличивается яркость фона, мы найдем такое же положение, при котором Луна будет в центре поля зрения. Закрепив телескоп, немедленно посмотрим в искатель и при помощи приспособлений, которые будут описаны в дальнейшем, такотрегулируем искатель, чтобы Луна была одновременно видна как в центре его поля зрения, так и поля зрения рефлектора. После этого мы без труда, пользуясь искателем, будем находить нужную нам звезду. Кроме того, по изображению Луны легко телескоп отфокусировать.

Итак, мы навели телескоп на яркую звезду, поместив ее в центре поля зрения. Прежде всего надо еще раз проверить юстировку. Выведем окуляр из фокуса. Если

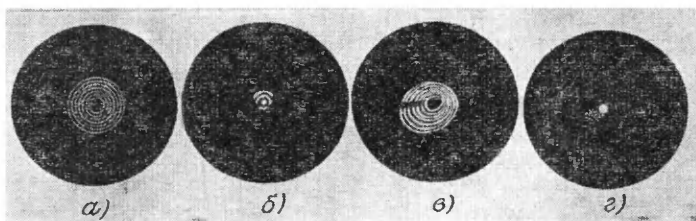


Рис. 38. Вид внефокальных изображений звезды (а, в) и изображений при наилучшей фокусировке (б и г) в рефлекторе системы Ньютона; а, б — при точной юстировке; в, г — при неточной юстировке. На фоне внефокальных изображений виден силуэт диагонального зеркала на стойке (по А. А. Чикину; 1915).

юстировка сделана правильно, то мы увидим яркий кружок с черной дырочкой в середине. Эта дырочка — тень от диагонального зеркала. Будут также видны темные «тени» стойки или растяжек. Если изображение круглое и «дырочка» находится в его центре, то юстировка выполнена правильно (рис. 88). Снова наведя окуляр на фокус, мы, при его достаточно большом увеличении, увидим небольшой дифракционный диск звезды, окруженный симметричными кольцами. При хороших атмосфере-

ных условиях будут отчетливо видны одно-два кольца (рис. 88, б).

Если внефокальное изображение вытянутое, отличное от кругового, то это может зависеть от трех причин: от неправильной юстировки, от астигматизма главного зеркала или от того, что поверхность диагонального зеркала не плоская, а вогнутая или выпуклая. Сначала надо попробовать улучшить юстировку. Вид звезды при неточной юстировке изображен на рис. 88, в, г. При улучшении юстировки не надо удивляться, что при изменении наклонов зеркал звезда будет уходить из поля зрения. Каждый раз придется приводить звезду в центр поля зрения заново и регулировать направление искателя.

Если улучшение невозможно, то надо исследовать проблему всесторонне.

Астигматичными могут быть как окуляр, так и глаз наблюдателя. Вращая окуляр вокруг его продольной оси, мы сразу выясним, не он ли внес искажения. Если вытянутость внефокального изображения при этом вращается, то виноват окуляр. Если причина не в нем, то надо менять положение головы — это позволит выявить астигматизм глаза.

Вращая диагональное зеркало (если оно круглое) в его оправе и снова настраивая телескоп, можно выяснить, не является ли оно причиной порчи изображения. Наконец, астигматизм главного зеркала выявляется при его вращении относительно оправы. Таким образом, исследование рефлектора займет несколько суток: днем мы будем снова его центрировать и юстировать, а ночью проверять картину по звездам. Кстати, астигматизм глаза можно практически исключить, применяя сильные окуляры (со зрачком выхода не более 0,7 мм).

По звезде можно проверить фигуру главного зеркала. Для этого достаточно вынуть из окуляра линзы (оставив только его тубус), вставить его в окулярную трубку и совместить выходную диафрагму окуляра с главным фокусом телескопа. Мы увидим все главное зеркало залитым светом звезды. Теперь достаточно ввести нож Фуко, и мы сразу увидим теневую картину. Если зеркало параболическое, то при пересечении ножом Фуко пучка лучей все зеркало должно сразу потемнеть, подобно тому как темнеет сферическое зеркало при его разглядывании из центра кривизны. Если оно темнеет не

как одно целое, то это поможет выявить его отклонение от параболоида.

Допустим, что первое испытание прошло удачно. Тогда надо испытать наш телескоп по наблюдениям тесных двойных звезд; так мы установим его разрешающую способность. Зная, что телескоп с зеркалом 150 мм должен разделять звездные пары с угловым расстоянием компонент около $0''{,}9$, а 250-миллиметровый телескоп — около $0''{,}6$, подберем нужные нам двойные звезды, пользуясь их каталогами, а затем найдем их на небе, используя звездный атлас. Достаточно подробный каталог двойных звезд можно найти в книге П. Г. Куликовского «Справочник любителя астрономии» («Наука», 1971) и в Постоянной части Астрономического Календаря (изд. 6-е, «Наука», 1973). При выборе объектов надо помнить, что звездная пара разделяется тем труднее, чем больше различие в блеске компонент; но и при равенстве составляющих разделение сильно затрудняется, если блеск очень велик. Для испытания телескопа среднего размера наиболее удобны двойные звезды, компоненты которых 5—6-й звездной величины. Нужно подобрать несколько двойных звезд, чтобы среди них были пары, различающиеся как по расстоянию составляющих, так и по их блеску и цвету.

По двойной звезде с предельно малым угловым расстоянием компонент одинакового умеренного блеска (5—6-й зв. вел.) мы сделаем заключение о разрешающей силе телескопа, обращая внимание на то, насколько ясно разделены оба звездных изображения.

При резком различии блеска компонент мы сможем оценить, насколько свободен наш инструмент от вредного ореола вокруг ярких предметов; если есть ореол, то слабый спутник скроется в нем.

Укажем, что для 150-миллиметрового рефлектора удобными пробными объектами являются следующие двойные звезды: пара двойных ϵ_1 и ϵ_2 Лиры. Первая из них состоит из двух компонент, 5,1 и 6,2 зв. величины, отстоящих друг от друга на угол порядка $2''{,}5$. Компоненты второй пары, 5,1 и 5,4 зв. величины, отстоят на угол порядка $2''$.

В высшей степени удобна ζ Большой Медведицы (расстояние компонент $2''{,}2$, блеск — 4,4 и 4,8 зв. вел.). Предельными для разрешения в 150-миллиметровом рефлекторе являются ζ Волопаса и ϵ Малого Коня. Блеск

составляющих первой пары 4,6 и 4,6 зв. величины, а второй 5,9 и 6,2 зв. величины; их угловые расстояния порядка секунды. Чрезвычайно интересен пробный объект, рекомендованный еще А. А. Чикиным — ϵ Волопаса (угловое расстояние $3'',0$) при большом отличии в блеске компонент (2,7 и 5,1 зв. вел.) и резко различных их цветах (яркая составляющая — желтая, слабая вследствие контраста кажется голубовато-зеленой). Похожа на нее α Геркулеса; ее компоненты, желтая и зеленая, 3,1 и 5,4 зв. величины, отстоят друг от друга на $4'',5$. Это две очень красивые звездные пары. При их наблюдении мы убедимся, насколько хорошо передает окраску небесных объектов рефлектор.

Нам предстоит еще оценить проникающую силу телескопа. Она может отличаться от расчетной. Аберрации, даже незначительные, увеличивающие размеры изображения звезды и уменьшающие яркость центрального дифракционного диска, ведут к потере видимости слабых звезд, которые теоретически должны быть доступны данному инструменту.

К ослаблению яркости приводит также потускнение серебряного (или алюминиевого) покрытия, которое неизбежно и усиливается с течением времени; так, например, за 2—3 месяца свежий вначале серебряный слой может настолько потемнеть, что проникающая сила рефлектора уменьшается на целую звездную величину. Серебряный слой особенно быстро тускнеет для сине-фиолетовых лучей, так что зеркала фотографических телескопов требуют более частой смены металлического покрытия.

Увеличению рассеянного света и ослаблению яркости изображения также способствует недополировка зеркал.

Для определения проникающей силы телескопа рекомендуется пронаблюдать какое-либо рассеянное звездное скопление, хотя бы Плеяды, и установить звездную величину самой слабой из видимых на пределе зрения звезд. Карты звездных скоплений и каталоги входящих в них звезд можно найти в «Справочнике любителя астрономии» П. Г. Куликовского.

Один из очень удобных стандартов звездных величин — созвездие Волосы Вероники. Карту этого звездного скопления и звездные величины «желтые» (V) и «синие» (B) мы приводим в Дополнении 8.

Вернемся теперь к вопросу о причинах возникновения рассеянного света в поле зрения рефлектора. Мы видели, что укрепить диагональное зеркало без стойки или растяжек нельзя. Вместе с тем именно они являются одной из причин появления рассеянного света. Они вызывают сильный дифракционный эффект, выражающийся в появлении у изображений звезд, особенно, если звезды яркие, светлых «хвостов».

В случае использования стойки таких «хвостов» два; они расположены в направлениях, перпендикулярных к стойке.

Три растяжки, расположенные под углом 120° друг к другу, вызывают появление шести «хвостов». Четыре взаимно перпендикулярные растяжки создают четыре хвоста (правда, несколько более ярких).

Закончив испытание телескопа по наблюдениям звезд, можно приступить к наблюдениям планет.

Особенно сказываются недостатки инструмента на различимости тонких, бледных деталей на поверхности планет. Самый трудный из объектов — Марс, на оранжевой поверхности которого хороший телескоп должен отчетливо показывать белую полярную шапку и темные «моря»; наблюдения Марса надо, конечно, проводить около его противостояния.

Большой интерес представляет Юпитер, картина полус которого позволит очень хорошо судить о качествах телескопа. Самая же строгая проба — наблюдения прохождения спутников Юпитера и их теней по диску планеты. Только отличный инструмент позволит проследить за тенью спутника при ее перемещении по всему диску. Она должна представляться в виде крошечного черного кружка. Наконец, вид кольца Сатурна — тоже прекрасный показатель качеств инструмента; при помощи 150-миллиметрового рефлектора должна быть совершенно отчетливо видна щель Кассини, конечно, при достаточном раскрытии кольца.

Само собой разумеется, что испытания телескопа по небесным объектам имеет смысл производить только при хороших изображениях; беспокойствие атмосферы скроет от наблюдателя как раз те тонкие детали, по видимости которых единственно можно судить о качестве инструмента.

Г Л А В А VIII

САМОДЕЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП СИСТЕМЫ КАССЕГРЕНА*)

Определенные преимущества телескопа системы Кассегрена перед телескопом системы Ньютона, а именно: компактность всего инструмента, возможность применять более длиннофокусные окуляры при больших увеличениях и, кроме того, желание создать своими руками более сложную оптическую систему с двумя асферическими зеркалами, — все это привело к тому, что многие любители берутся теперь, и успешно, за стройку такого телескопа.

Всесоюзное астрономо-геодезическое общество редакции научно-популярных журналов получают много писем, в которых любители просят рассказать, как построить телескоп системы Кассегрена.

Схема телескопа системы Кассегрена показана на рис. 89. Главное вогнутое параболическое зеркало 1 имеет в середине отверстие. Вторичное, выпуклое зеркало, имеющее форму гиперboloида 2, отражает лучи, идущие от главного зеркала, и направляет их сквозь отверстие в главном зеркале в фокальную плоскость $A''B''$, где расположен эквивалентный фокус всей системы. Система, по определению Д. Д. Максудова, является предфокальной, так как вторичное зеркало расположено перед фокусом главного, и удлиняющей, так как эквивалентное фокусное расстояние системы значительно больше фокусного расстояния главного зеркала.

*) Глава написана М. М. Шемякиным.

Для расчета телескопа введем следующие обозначения: D — диаметр главного зеркала; f — фокусное расстояние главного зеркала; d — диаметр вторичного зеркала; s и s' — сопряженные отрезки (соответственно расстояния от вершины выпуклого зеркала до фокальной плоскости главного зеркала и фокальной плоскости всей системы); a — расстояние от вершины главного

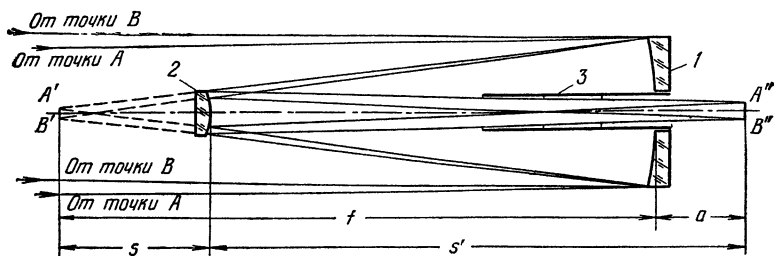


Рис. 89. Схематическое изображение системы рефлектора Кассегрена: 1—главное параболическое вогнутое зеркало; 2—вторичное гиперболическое выпуклое зеркало; 3—светозащитная трубка (бленда). Ход лучей в этой системе.

зеркала до фокальной плоскости системы (эквивалентного фокуса). Оно зависит от толщины главного зеркала и разгрузочного механизма вместе с дном оправы и желательного выноса фокальной плоскости.

Относительный фокус главного зеркала $V = \frac{f}{D}$ следует брать в пределах от 4 до 6. Более короткое фокусное расстояние осложняет изготовление и испытание зеркала, а более длинное нерационально, так как чрезмерно увеличит длину всего инструмента.

Величину эквивалентного относительного фокуса, т. е. отношение $\frac{F}{D}$, мы выбираем в зависимости от назначения телескопа. Для наблюдения протяженных объектов ее следует брать порядка 10, а, например, для наблюдения планет — порядка 15 или более.

Для удобства расчетов лучше всего построить на миллиметровке рабочую схему телескопа в любом, но не слишком мелком масштабе, исходя из выбранных нами величин: D , f и a .

Введем еще необходимые для расчета телескопа величины: $\alpha = \frac{f}{s}$ и $\beta = \frac{s}{s'}$. Отношение $\frac{f}{s}$ Д. Д. Мак-

сутов рекомендует брать равным 4. Отсюда $s = \frac{f}{4}$.
 Величина отрезка $s' = f - s + a$.

Диаметр поля зрения в миллиметрах в эквивалентном фокусе связан с наибольшим полем зрения имеющих окуляров или размерами кадра используемой при фотографировании фотопленки. Для телескопов с диаметром главного зеркала порядка 200—300 мм оптимальная величина его равна 20—30 мм (для визуальных наблюдений и фотографирования на 35-миллиметровой пленке).

Если для эквивалентного фокуса мы выберем некоторое угловое поле зрения (обозначим его 2ω), то линейный диаметр поля зрения (в миллиметрах) в эквивалентном фокусе можно вычислить, зная, что для угла в 1° он будет равен

$$l' = \frac{F}{\rho},$$

где ρ равно 57,3, или же по формуле $l' = 2F \operatorname{tg} \omega$. В обеих формулах эквивалентное фокусное расстояние (F) выражено также в миллиметрах, ω — половина угла поля зрения. При выборе угла поля зрения полезно помнить, что для телескопа система Кассегрена при диаметре главного зеркала порядка 150—250 мм не искаженное аберрациями (полезное) поле зрения составит около $20'$.

Из отношения $\frac{f}{s} = 4$ следует (из геометрического построения), что диаметр выпуклого зеркала должен быть равен $\frac{D}{4}$, но величина его на самом деле должна быть больше, так как надо учитывать линейный диаметр поля зрения в главном фокусе (см. рис. 89). Зная величину линейного поля зрения l' в мм в эквивалентном фокусе, определяем по формуле $l = l' \frac{f}{F}$ линейное поле зрения в главном фокусе (l). Отложив эту величину (отрезок $A'B'$) в фокальной плоскости главного зеркала и проведя прямые от его концов к краям главного зеркала (крайние лучи), проведем перпендикуляр к оптической оси телескопа на расстоянии s от $A'B'$. Точки пересечения этого перпендикуляра с крайними лучами дадут диаметр вторичного зеркала.

Радиус кривизны вторичного зеркала вычислим по формуле

$$r = \frac{R}{\alpha(\beta - 1)},$$

где $R = 2f$ (радиус кривизны главного зеркала).

Чтобы посторонние лучи света не попадали в поле зрения окуляра, в телескопе системы Кассегрена применяется светозащитная трубка (3 на рис. 1). Ее размеры определяются графически. Тщательно вычертив ход лучей для крайних точек поля зрения, трубку размещают в пространстве так, чтобы она не производила виньетирования. Внутри трубки устанавливают диафрагмы с тем, чтобы ни один однократно отраженный от стенок трубки луч не попал в поле зрения окуляра. Место расположения диафрагм определяется геометрическим построением. Первая диафрагма ставится на наружном срезе трубки. При строгих требованиях к качеству изображения приходится ставить еще одну трубку около второго зеркала, хотя она и заслоняет часть лучей.

Приступая к изготовлению главного зеркала, мы должны знать диаметр отверстия в нем, который мы определяем также на чертеже; он связан с диаметром поля зрения и диаметром и системой крепления светозащитной трубки (см. ниже). Его величина должна быть в пределах от $\frac{1}{3,6} D$ до $\frac{1}{3,8} D$. Наружный диаметр его и светозащитной трубки ни в коем случае не должен превышать $\frac{1}{3} D$, так как заслонение центра зеркала на большую величину заметно портит дифракционную картину.

Отверстие в главном зеркале вырезается трубчатым сверлом соответствующего диаметра. Сверло должно быть точно центрировано, например, фанерным или пластмассовым кругом с отверстием в середине, наложенным на стеклянный диск. Сверлить можно после грубой шлифовки (обдирки). Сначала просверливают отверстие с лицевой стороны будущего зеркала, но не до конца, оставив недосверленными 8—10 мм. Затем точно напротив этого прореза сверлят с противоположной стороны, оставив небольшой недосверленный «поясок» шириной в 2—3 мм. Полностью отверстие высверливается после окончания тонкой шлифовки. На время тонкой шлифовки щель заливают гипсом или алебастром.

Поверхность главного зеркала — параболоид. В связи с тем, что мы будем добиваться астигматизма на оси в эквивалентном фокусе путем ретуши вторичного зеркала в собранной системе (и это наиболее доступный для любителя способ), главное зеркало можно немного «недопараболизировать» или «перепараболизировать», но его поверхность должна быть совершенно плавной.

Шлифовка выпуклого зеркала не отличается в принципе от шлифовки вогнутого, но тот диск, который служит заготовкой при изготовлении вогнутого зеркала (верхний), здесь служит шлифовальником, а нижний диск будет зеркалом. Стрелка кривизны измеряется в шлифовальнике, а не в зеркале.

Полировальник для выпуклого зеркала также будет вогнутым.

Полировка главного зеркала с отверстием ведется как обычно, но полировальник в центральной части освобожден от смолы, причем отверстие в смоле должно быть немного больше, чем отверстие в зеркале.

Для шлифовки и полировки вторичного зеркала хорошо сделать специально отдельный станочек с вращающимся столиком (см. гл. IV).

Изготовление выпуклого гиперболоида при помощи вогнутого эталона представляет для любителя очень большие трудности, поэтому этот способ здесь не описан и мы не вычисляем эксцентриситет поверхности вторичного зеркала. Нам нужно знать только радиус кривизны. Нужная форма поверхности получается ретушью, и мы судим о соответствии ее нашим требованиям по теневому или другому испытанию в эквивалентном фокусе системы, т. е. по полученным результатам.

Когда главное зеркало совершенно готово и алюминировано или посеребрено, а вторичное отполировано, нужно собрать телескоп. При этом должны быть соблюдены следующие требования: оба зеркала и окулярный тубус должны быть укреплены очень устойчиво в их креплениях; уже при этой предварительной сборке должна быть предусмотрена плавная регулировка для юстировки. Выпуклое зеркало, кроме того, должно быть вставлено в оправу так, чтобы его можно было легко вынимать для ретуши и снова точно вставлять на место, без люфта, но с достаточным трением.

Наиболее удобным и надежным способом испытания вторичного зеркала в процессе ретуши, как показала

практика, является испытание «вторым методом щели и нити» по Д. Д. Максудову в эквивалентном фокусе в собранной системе. Но для этого нужно иметь вспомогательное вогнутое (параболическое или сферическое, если это позволяет его относительный фокус) зеркало, имеющее диаметр не меньший, чем у главного зеркала. Для коллективов и для любителей, изготовлявших ранее зеркала для телескопов (а к постройке телескопа системы Кассегрена обычно приступает любитель, уже имеющий опыт), эта проблема решается легче.

Схема испытания показана на рис. 90. Оптические оси всех трех зеркал и окулярного тубуса должны точно

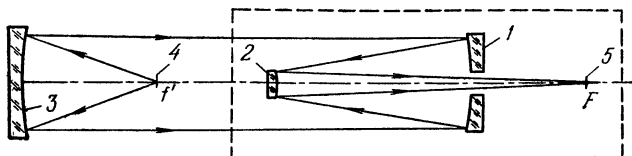


Рис. 90. Испытание телескопа Кассегрена: 1—главное зеркало, 2—вторичное зеркало, 3—вспомогательное зеркало, 4—светящаяся щель в фокусе вспомогательного зеркала, 5—нить в эквивалентном фокусе системы F .

совпадать. Светящаяся щель 4 располагается в фокусе f' вспомогательного зеркала 3, а нить 5 в области эквивалентного фокуса. Щель и нить должны быть вертикальными и строго параллельными. Можно при испытании заменить щель искусственной звездой, а нить ножом Фуко, добываясь ретушью выпуклого зеркала получения плоской картины в эквивалентном фокусе, но второй способ щели и нити является более удобным и наглядным.

Как и отполированное полностью вогнутое зеркало перед фигуризацией, так и выпуклое зеркало до ретуши имеют какую-то приблизительно сферическую форму, «какая получилась». Чтобы понять, в каком направлении вести ретушь (при любом виде испытания: теньевым методом со вспомогательным зеркалом или по внефокальным изображениям), мы должны понять, какая поверхность получилась. Здесь хочется еще раз напомнить и подчеркнуть слова А. А. Чикина: «Понять теньевую картину — значит, сделать хорошее зеркало». Ведь результат испытания здесь показывает уже не форму поверхности одиночного зеркала, а картину, полученную после отражения пучка лучей от двух зеркал. Если неплоская

теневая картина или непрямая тень нити при испытании одного зеркала показывает на те или иные отклонения от сферы, то здесь мы видим отклонения от гиперboloида, так как именно при этой форме выпуклого зеркала



рис. 91. К определению фигуры вторичного зеркала. Прерывистой линией изображен контур готовой сферической заготовки для выпуклого зеркала. Сплошная линия — контур гиперболической поверхности, к которой надо привести сферическую поверхность заготовки. Сфера по отношению к гиперboloиду имеет «завал на краю» и «яму» в середине.

(главное зеркало — параболоид) должен быть достигнут стигматизм на оси. Так, например, если вторичное зеркало имеет форму, близкую к сферической, то теневая картина будет показывать «завал на краю» и «яму в середине», так как относительно гиперboloида края и середина поверхности опущены (рис. 91). Тексеро рекомендует в этом случае применять для ретуши кольцевой полировальник со средним радиусом кольца около

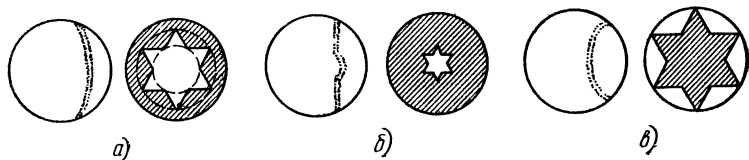


рис. 92. Различные формы полировальника. Слева изображены виды теней при испытании выпуклого зеркала по методу щели и нити Д. Д. Максутова; а — форма тени нити при сферической поверхности заготовки и нужная форма полировальника для приведения заготовки к гиперболической поверхности, б — ямка в середине и полировальник для ее устранения, в — край и середина заготовки приподняты по сравнению с гиперboloидом и форма полировальника для устранения дефекта,

0,7 радиуса зеркала. Этот полировальник выбирает некоторую промежуточную зону и работает очень эффективно и быстро, но здесь есть некоторая опасность, что поверхность может получиться недостаточно плавной. Внутренний диаметр кольцевого полировальника может быть равным примерно 0,5, а внешний — 0,8 диаметра зеркала. Кольцо можно сделать, например, не круглым, а придать ему форму пятиугольника. Успешно применяется также звездчатый полировальник (рис. 92), предложенный Стронгом и проверенный в любительской практике. Он отформовывается путем выдавливания углубления в

разогретой смоле на зеркале при помощи картонной звездочки, смоченной водой. Если любитель хорошо усвоит связь между теневой картиной и формой зеркала, то для каждого отдельного случая он сумеет подобрать форму полировальника.

Ретушь может быстро привести к заметному изменению формы поверхности, поэтому, особенно при приближении к требуемой форме (судя по результатам испытания), следует вести ретушь короткими «порциями» и чаще подвергать поверхность испытанию в эквивалентном фокусе. Все, что говорится о процессе полировки, качестве смолы, подрезке полировальника и пр. в главах III, IV, V, относится в полной мере и к полировке выпуклого зеркала в телескопе системы Кассегрена.

Станочек для полировки зеркала следует расположить вблизи «чикинской доски», чтобы иметь возможность оперативно проверять в собранной системе вторичное зеркало во время ретуши.

Для любителей, не имеющих возможности применить для испытания телескопа в сборе вспомогательное зеркало, можно рекомендовать способ испытания по виду внефокальных изображений удаленного источника света*). Телескоп должен быть собран так, как это описано выше, но вспомогательное зеркало, дающее пучок параллельных лучей, щель и нить отсутствуют, а в окулярный тубус вставлен сильный окуляр. Главное зеркало алюминировано, а выпуклое полностью отполировано и готово к ретуши.

Наблюдая достаточно удаленный яркий источник света, имеющий небольшие размеры (лампа, фонарь), мы имеем как бы искусственную звезду, свет от которой идет к нам практически параллельным пучком. Теневое испытание при таком источнике света на практике неосуществимо, так как вместо теневой картины мы увидим картину «бегущих теней», возникающих вследствие колебаний (турбулентции) воздуха, отделяющего нас от источника света. Кроме того, при испытании выпуклого зеркала, еще не алюминированного, теневая картина будет иметь малую яркость.

При наблюдении внефокальных изображений яркость будет достаточной, а турбулентция сказывается значи-

*) Этот способ был успешно применен и проверен С. Д. Чувахиным. См. журнал «Земля и Вселенная», № 3, 1970.

тельно меньше. Передвигая окуляр вперед и назад в отношении фокуса, мы будем получать светлый кружок, яркость которого по мере удаления от фокуса будет уменьшаться, а диаметр увеличиваться. (При определенном удалении в центре кружка появится тень, силуэт вторичного зеркала.) На первый взгляд может показаться, что метод испытания по виду внефокальных изображений не может дать более или менее точные результаты по сравнению с теневым методом, однако опыт показал, что если мы будем рассматривать внефокальные изображения на сравнительно небольшом расстоянии от фокуса при сильном окуляре, то можно определить и малые отклонения от требуемой формы поверхности зеркала. Итак, мы должны добиваться, чтобы как предфокальное, так и зафокальное изображения имели вид равномерно освещенных кружков без сгущений или ослаблений света.

Приведем примеры. Если предфокальное изображение имеет более яркую середину и размытый край, то это указывает, что центральная часть зеркала имеет более короткое, чем нужно, фокусное расстояние, а периферические зоны более длинное. Для ретуши здесь следует применить полировальный тип, показанного на рис. 92, а. В этом случае зафокальное изображение будет более ярким к краям и более слабым к середине. Если вид внефокальных изображений будет противоположным, то центральная часть зеркала имеет более длинное фокусное расстояние, чем краевые зоны.

Кое-что следует сказать о креплении выпуклого зеркала, которое должно обеспечивать плавную и точную его юстировку. На рис. 93 показана конструкция крепления, которое отвечает этим требованиям и вместе с тем дает возможность при испытании выпуклого зеркала, используя отверстие в центре его оправы, легче определить соосность всех зеркал, щели и нити.

Такая оправа выпуклого зеркала 1 имеет отверстие в центре*) и три стержня 2 с винтовой резьбой, шайбами 3 и гайками 4. В чашечку-кольцо 5 ввинчены три юстировочных винта 6, на которые опирается оправа. Оправа притянута пружинами 7 к держателю (чашечке с отверстием в середине) 5; его лучше всего укрепить

*) При вставленном зеркале оно должно быть закрыто кружком из непрозрачного материала.

внутри трубы на трех или четырех плоских растяжках 8 так же как крепится диагональное зеркало в ньютоновском телескопе (см. рис. 83).

Оправа главного зеркала также должна быть сделана тщательно и обеспечивать плавную юстировку (например, оправа, показанная на рис. 82). Конечно, она должна иметь отверстие, расположенное против отверстия в главном зеркале. Окулярный тубус крепится

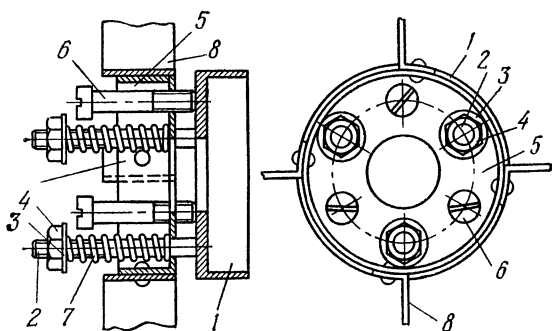


Рис. 93. Оправа для вторичного зеркала: 1—оправа с отверстием в середине, 2—стержни, 3—шайбы, 4—гайки, 5—держатель (чашечка с отверстием в середине), 6—юстировочные винты, 7—пружины, 8—растяжки для крепления оправы в трубе.

также против этого отверстия способом, обеспечивающим его самостоятельную юстировку (см., например, рис. 85).

Крепление светозащитной трубки может быть осуществлено различными способами. Трубка может быть укреплена непосредственно в отверстии зеркала любым способом, не создающим давления трубки на стекло. При таком способе положение трубки в отношении зеркала можно отрегулировать, смотря на отражение трубки в зеркале. При рассмотрении с любой стороны отражение трубки должно служить продолжением самой трубки. Трубку можно также укрепить на оправе главного зеркала так, чтобы ее можно было самостоятельно юстировать. Трубка может быть выполнена и как продолжение окулярного тубуса. Наконец, трубка может быть укреплена на самостоятельных растяжках аналогично креплению диагонального ньютоновского или выпуклого кассегреновского зеркал. Последний способ создает дополнительные помехи в изображении из-за крестообразных растяжек.

Юстировку телескопа следует начинать со светозащитной трубки и производить при вынутом окуляре. Конечно, процесс юстировки будет связан со способом крепления трубки. Конечной целью должно быть такое положение главного и вторичного зеркал, дальнего и ближнего концов светозащитной трубки и окулярного тубуса, при котором все эти окружности будут концентричными и отражение зрачка глаза расположено в центре. Для облегчения юстировки полезно на вторичном зеркале и на конце трубки на время юстировки укрепить кресты нитей. Но окончательную юстировку надо обязательно производить по наблюдениям звезд (Полярной или другой, расположенной в полярной области) с окуляром. До этой окончательной юстировки обычно изображение звезды имеет неправильную форму, например, в виде «кометы» со сгущением света сбоку, в «ядре». Эта окончательная юстировка требует терпения, так как даже при сравнительно небольших изменениях наклона зеркал юстировочными винтами звезда будет уходить из поля зрения. Нужно добиваться, чтобы изображение звезды было совершенно симметричным и имело круглую форму. Только после такой юстировки изображение любых объектов становится совершенно отчетливым и резким.

Любитель, взявшийся за постройку телескопа системы Кассегрена, несомненно, столкнется с некоторыми неизвестными ему при постройке ньютоновского телескопа трудностями, но опыт показал, что эти трудности могут быть успешно преодолены.

Г Л А В А IX

УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ ТЕЛЕСКОПА

1. Общие соображения

Теперь обратимся к устройству установки (штатива) для телескопа.

Значение качества установки телескопа известно каждому, кто хоть немного знаком с литературой, относящейся к технике астрономических наблюдений. Но только тот, кто сам пробовал наблюдать в плохо смонтированный телескоп, знает в полной мере, как важно иметь хорошую установку. Как бы ни были хороши оптические части инструмента, они совершенно бесполезны, если не смонтированы должным образом.

Перед тем как приступить к этой работе, надо хорошо оценить свои возможности. Если окажется, что постройка сколько-нибудь основательной установки нам пока не под силу, то лучше до поры до времени ограничиться «чикинской доской», постаравшись сделать ее как можно лучше. Пусть трудно держать светило в поле зрения, но если телескоп на него направлен, мы можем более минуты наблюдать его без всякой помехи, не боясь ни ветра, ни случайного толчка.

Обратимся теперь к сооружению более совершенной установки.

Мы уже достаточно подчеркивали, что основное условие, которому должна удовлетворять установка телескопа, — это устойчивость. Поэтому при постройке штатива можно жертвовать чем угодно, но только не устойчивостью. Сравнение двух штативов, изображенных на рис. 94, сразу дает общее представление об устойчивой

конструкции и конструкции неустойчивой, шаткой. Между тем в основу устройства явно негодного штатива была положена совершенно правильная и остроумная выдумка — использование водопроводных (или газовых) тройников; ошибка конструктора состояла в том, что он забыл о самом главном — об устойчивости и взял тройники и трубы слишком малого сечения. В противном случае получился бы вполне хороший штатив.

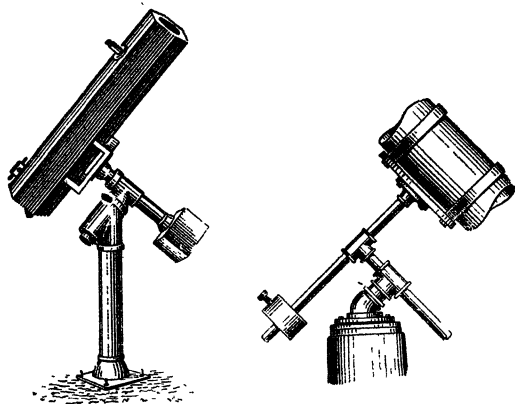


Рис. 94. Сравнение двух экваториальных установок. Слева — устойчивая, справа — неустойчивая.

Чтобы наблюдать, надо иметь возможность навести телескоп на объект и удерживать его в течение всего времени наблюдения в поле зрения окуляра. Чем сильнее увеличение телескопа, тем это важнее, потому что, во-первых, угловой диаметр поля зрения уменьшается пропорционально увеличению, и, во-вторых, незначительные передвижения, совершенно не заметные простым глазом, увеличиваются также пропорционально увеличению. Уже при 20-кратном увеличении, даваемом небольшой зрительной трубой, дрожание рук и качание тела делают наблюдения с рук невозможными. Самый маленький телескоп, даже с 50-мм объективом, совершенно бесполезен, если он не опирается на устойчивую подставку.

В начале книги мы говорили о тех колоссальных трудностях, которые испытывали прежние наблюдатели, вынужденные работать, в сущности, без штативов при громадных фокусных расстояниях.

Понятно, что чем крупнее инструмент, тем заметнее погрешности его установки.

Установки телескопов разделяются на два основных типа: азимутальные и экваториальные (параллактические). У азимутальной установки основная ось вращения вертикальна, а у экваториальной она параллельна оси вращения Земли, почему и называется полярной или часовой осью. Экваториальные установки в свою очередь могут быть одного из двух типов: немецкой и английской. Далее эти установки будут подробно описаны. Кроме того, особенно распространены вилочные установки рефлекторов.

2. Азимутальные установки

Азимутальная установка дает возможность поворачивать трубу вокруг двух взаимно перпендикулярных осей: вертикальной и горизонтальной. Поворачивая трубу вокруг вертикальной оси, мы изменяем азимуты; вращение вокруг горизонтальной оси изменяет высоты (и зенитные расстояния).

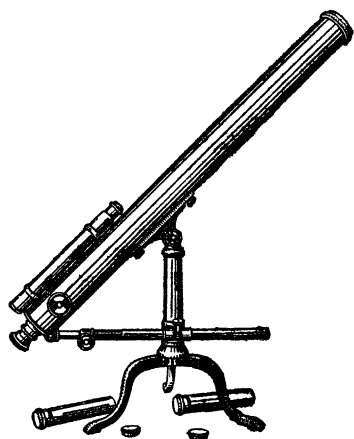


Рис. 95. Малая азимутальная переносная установка с шарниром.

Старинная форма штатива изображена на рис. 95. В ней горизонтальная ось заменена шарниром, на котором укреплена металлическая планка; к этой планке прикрепляется винтами труба телескопа. Шарнир обычно имеет приспособление для стягивания его щечек с целью регулирования трения. И вертикальная ось и шарнир смазываются густой смазкой для обеспечения

плавности движений. Для устойчивости и возможности передвижений по высоте с помощью кремальеры окулярный конец трубы подвижно соединяется со втулкой вертикальной оси стержнем, позволяющим плавно вращать трубу вокруг горизонтальной оси. С помощью такого штатива можно не только навести трубу на нужное место неба, но и следить за звездой в ее суточном

движении, для чего необходимо поворачивать трубу одновременно вокруг обеих осей.

Существует несколько типов азимутальных штативов, из которых наиболее распространенный состоит из очень массивной деревянной раздвижной треноги, напоминающей штатив для фотоаппарата, несущей на вершухе металлическую прочную вилку, наклоненную к вертикальной оси и могущую вращаться вокруг нее. На концах этой вилки устроены открывающиеся подшипники, в которых помещается горизонтальная ось инструмента, состоящая из двух стержней (цапф), вделанных в кольцо, охватывающее трубу телескопа. Чтобы цапфы приходились в центре тяжести трубы, последняя может передвигаться в кольце. Лучшие инструменты снабжены приспособлениями для более тонкой наводки по высоте и азимуту. На рис. 96 изображен небольшой телескоп на такой установке.

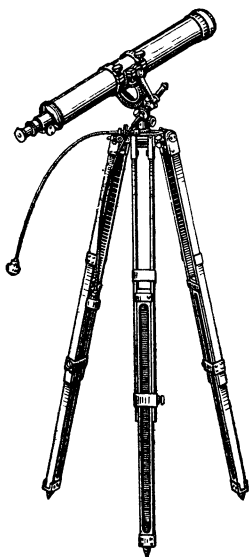


Рис. 96. Малая переносная азимутальная установка с вилкой.

Азимутальные установки описанного типа применяются, как правило, для рефракторов небольшого размера, объективы которых редко превышают 100 мм в диаметре. Если они хорошо выполнены, то с ними удобно вести наблюдения, хотя, конечно, необходимость во время наблюдения двигать трубу сразу в двух направлениях затрудняет работу.

Как нетрудно видеть из рис. 95 и 96, оба эти штатива не дают возможности навести трубу на светило, находящееся вблизи зенита.

Рефлектор системы Кассегрена монтируется так же, как рефрактор, так что может быть в принципе установлен на штативах этого типа. Ньютоновский же рефлектор на таких штативах монтировать не стоит, так как окуляр у него расположен вблизи верхнего конца трубы и тренога штатива должна быть сделана низкой.

Простейшим видом азимутальной установки ньютоновского рефлектора немецкого типа является монтированная чикинская доска, изображенная на рис. 78. Она

дает возможность наблюдать и околозенитную область неба.

По ряду соображений технического порядка (читатель в случае желания познакомиться с ними из литературы) на первых порах разумнее выбрать азимутальную

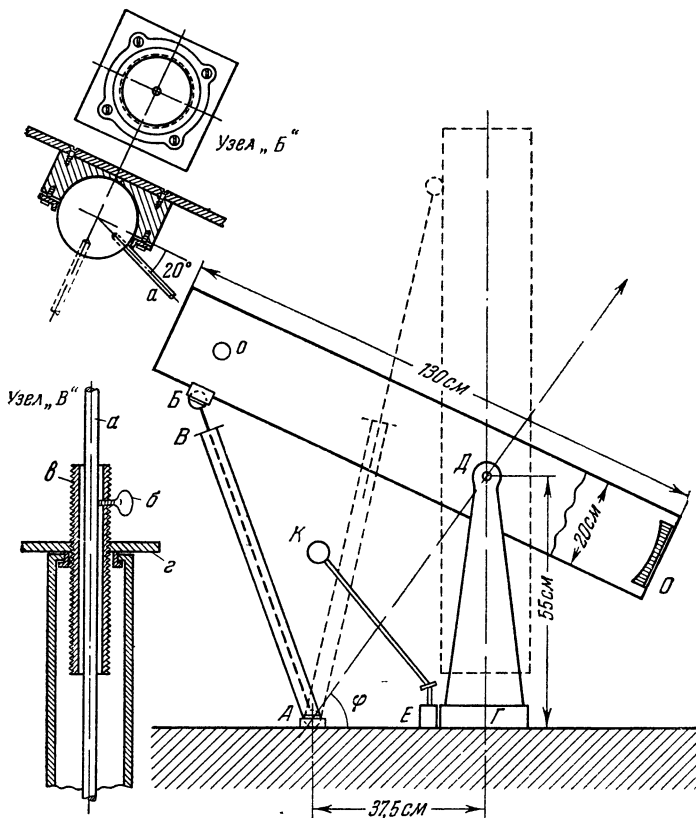


Рис. 97. Схема простой монтировки для рефлектора системы Ньютона с использованием вилки. Соединяет большую устойчивость с удобством использования.

установку, тем более, что ее ничего не стоит заставить действовать наподобие экваториальной при одновременном выигрыше в устойчивости и удобстве пользования. Рассмотрим поэтому устройство такой установки для 150-мм рефлектора (рис. 97).

Главную ее часть представляет массивная вилка Д, основание которой Г является вертикальной осью, вокруг

которой телескоп может вращаться по азимуту, а концы плеч несут втулку для горизонтальной оси, к которой прикреплена труба, могущая вращаться вокруг нее по высоте. Скажем прежде всего о размерах и форме вилки. Как мы уже говорили, длина плеч вилки определяется длиной задней части трубы от места прикрепления горизонтальной оси до заднего конца. Поскольку горизонтальная ось должна помещаться близ центра тяжести трубы, распределение веса последней определяет высоту вилки, а так как для достижения максимальной устойчивости вилка должна быть как можно короче, то центр тяжести трубы должен быть максимально смещен к заднему концу. Посмотрим, каково его положение у нашей трубы.

Деревянная труба квадратного сечения длиной в 130 см при внутреннем поперечнике 18,5 см и при толщине стенок в 1 см будет весить около 10 кг, зеркало с оправой и приспособлением для крепления — около 2 кг. Учитывая нагрузку передней части трубы (малое зеркало, окулярное приспособление), которая составит не менее 0,5 кг, мы легко сообразим, что для достаточного смещения центра тяжести трубы к заднему концу потребуется дополнительно нагрузить последний, так как одного веса главного зеркала с его оправой едва хватит на то, чтобы сместить центр тяжести трубы на 10 см. Чтобы центр тяжести трубы переместился к заднему концу хотя бы на 15 см, т. е. оказался в точке, удаленной на 50 см от последнего, потребуется дополнительная нагрузка заднего конца трубы, достигающая 1 кг. Если мы захотим сдвинуть центр тяжести еще на 10 см, т. е. поместить его на расстоянии 40 см от заднего конца, то нужно будет добавить к заднему концу около 2,5 кг. На такой нагрузке можно остановиться, так как, хотя возможность еще большего укорочения вилки и привлекательна, не следует забывать, что чрезмерная длина свободного конца трубы тоже невыгодна, поскольку она усиливает дрожание. Кроме того, общий вес трубы и так уже достигает достаточной величины, составляя около 15 кг.

Таким образом, чтобы пропустить заднюю часть трубы, прямая вилка должна иметь плечи длиной до 45 см.

Что касается самого изготовления вилки, то здесь, конечно, многое зависит от возможностей. Нет нужды

говорить о том, что лучше всего удовлетворяет своему назначению литая или сварная металлическая вилка (из двутаврового или корытного железа), но ее сможет изготовить далеко не всякий. Однако вполне хороша будет и деревянная вилка из сухого дерева твердой породы; ей можно придать большую жесткость, не боясь чрезмерной тяжести, а для большей прочности скрепить ее железными полосами. В нижней части вилки устроим втулку, через которую насквозь пройдет ось, укрепленная в основании (подставке) штатива. «Настоящие» штативы обычно снабжаются конической осью для исключения качки; но изготовление ее — дело сложное, хотя и не невозможное. Вообще говоря, любителю, не располагающему токарным станком, надо больше рассчитывать на то, чтобы подобрать что-нибудь из старых частей машин, особенно от автомобилей. При некоторой изобретательности в авторемонтной мастерской среди утиля можно найти все необходимое для устройства прекрасной оси; пусть штатив будет менее красив, чем «настоящий», но в работе он может оказаться лучше иной установки, выпущенной специальной мастерской. Самое трудное, конечно, — это обработка трущихся поверхностей, которая должна быть настолько хороша, чтобы обеспечить плавность хода; в то же время должно быть достаточное трение, иначе телескоп будет поворачиваться от малейшего толчка или от порыва ветра. Поэтому если мы воспользуемся осью от автомобильного или иного колеса с шарикоподшипниками, то необходимо будет придать нижнему концу вилки форму широкой площадки, которая легла бы на основание, чтобы обеспечить необходимое трение. Эти трущиеся поверхности должны быть хорошо обработаны. Надо, впрочем, сказать, что опыт, приобретенный нами при шлифовке стекла, очень поможет и здесь: вовсе не так уж трудно пришлифовать две металлические поверхности друг к другу, хотя мы не забудем, конечно, что металл шлифуется во много раз медленнее, чем стекло.

При устройстве горизонтальной оси главная трудность заключается в том, что эта ось не цельная, а состоит из двух частей, между которыми помещается труба; в сущности говоря, такую же трудность составляет и устройство втулок для нее, расположенных на концах плеч вилки. (В этом отношении установка немецкого типа, у которой труба помещается на одном конце цельной

оси, представляет известное преимущество.) Для укрепления обеих половинок горизонтальной оси служит массивный пояс из толстых (50-мм) планок, охватывающий трубу в области ее центра тяжести. Ось ложится концами в вырезы (лагеры) на вершукше вилки, служащие втулками. Регулировка трения производится либо затягиванием гаек на концах оси либо посредством зажима-ния оси сверху, с помощью скоб, перекрывающих вырезы на вилке и снабженных затяжными винтами. Горизонтальная ось, конечно, не столь ответственная часть, как вертикальная, поэтому удовлетворительно устроить ее не составит особых затруднений. Разумеется, она также должна быть достаточно основательна. Заметим, что большую услугу нам могут оказать гладкие дюймовые трубки с фланцами. Два куска таких трубок, прикрепленных с помощью своего фланца к трубе телескопа, образуют отличную ось; их фланцы могут при этом быть очень полезны в качестве боковых трущихся поверхностей, но для этого они должны быть достаточно хорошо обработаны. В противном случае лучше наложить на них гладкие шайбы или спрятать их, пропустив трубки сквозь планки указанного выше пояса на трубе, чтобы фланцы оказались изнутри.

Дно вырезов на вершукше вилки можно сделать металлическим; если удастся подобрать подходящего диаметра отрезок трубки, то, распилив его вдоль, можно получить желаемые опоры для оси, которые, после шлифовки будут отлично служить. Можно выйти из положения, отлив их из цинка или баббита, причем в качестве модели послужит трубка или стержень, из которых изготавливается ось. Но не следует бояться и просто деревянных втулок, которые при аккуратной обработке будут служить очень хорошо. Можно, наконец, сделать втулки и просто клиновидной формы, так что ось будет касаться их малой частью своей поверхности; для увеличения трения надо тогда, очевидно, обеспечить контакт боковых поверхностей.

Каковы бы ни были затруднения, которые придется преодолевать при сооружении установки этого типа, и как ни велики окажутся несовершенства его выполнения, они, безусловно, окупятся возможностью прибегнуть к подпорке *АВ*, которая в комбинации с вилкой придает трубе максимальную устойчивость. В самом деле, покоясь цапфами своей горизонтальной оси на втулках

вилки, отделенных друг от друга значительным расстоянием (в нашем случае около 30 см), труба получает еще третью точку опоры, находящуюся недалеко от ее переднего конца. Это чрезвычайно повышает устойчивость по сравнению с тем случаем, когда труба, как на штативе немецкого типа, укреплена лишь в одной точке. Подпорка *АВ*, связывающая передний конец трубы с основанием штатива, может быть устроена так, чтобы вместо азимутального движения труба получила автоматически движение по суточной параллели в результате поворачивания ее вокруг вертикальной оси. Лежащий в основе этого принцип очень прост (см. рис. 97).

Если придать точке *А*, в которой подпорка присоединена к неподвижному основанию штатива, такое положение, чтобы прямая *АД*, проведенная от этой точки к середине горизонтальной оси телескопа, составила с горизонтом угол, равный широте места наблюдения (φ), и лежала в плоскости меридиана, то, очевидно, телескоп при поворачивании его вокруг вертикальной оси будет описывать дугу, совпадающую с суточной параллелью. Для этого надо лишь выбрать соответствующее высоте вилки расстояние точки прикрепления подпорки от вертикальной оси.

Труба рефлектора (см. рис. 97) монтирована на прямой вилке, могущей вращаться на своей вертикальной оси. К массивному основанию штатива с помощью шаровой головки в точке *А* присоединена раздвижная подпорка, другим своим концом тоже посредством шаровой головки *В* присоединенная к нижней стороне трубы под окуляром. Благодаря шаровым головкам подпорка *АВ* может свободно изменять свой наклон при любом положении трубы. Для присоединения подпорки можно воспользоваться обычными шаровыми головками для фотокамер, произведя в них небольшую переделку, именно, срезав слишком высокий бортик, мешающий придавать достаточно большие наклоны, нужные в тех случаях, когда труба направлена на зенит или повернута далеко от меридиана (см. рис. 97). Кроме того, полезно произвести пришлифовку шара мелким абразивом, так как шары эти весьма грубо изготовлены. Подпорка *АВ* состоит из металлической трубки *АВ*, в которую входит стержень *а* (см. деталь налево внизу), закрепляемый близ конца трубки *В* с помощью винта *б* в том положении, которое определяется направлением трубы. На этом

конце трубки желательно устроить приспособление, позволяющее производить мелкие передвижения трубы по высоте посредством регулировки длины подпорки. Оно состоит из промежуточного патрубка *в*, снабженного снаружи резьбой и ввернутого в муфточку *г*, которая держится на конце трубки *АВ* с помощью фланца, позволяющего этой муфточке свободно вращаться. Стержень, присоединенный к трубе, проходит сквозь патрубок *в* и может быть закреплен в нем в нужном положении с помощью винта *б*. Вращением муфточки *г* можно таким образом удлинять или укорачивать всю подпорку, так как при этом будет вывинчиваться или ввинчиваться патрубок *в*; последний необходимо снабдить шпонкой, не дающей ему проворачиваться вместе с муфточкой *г*. Такое устройство позволит с большим удобством производить точную наводку телескопа по высоте.

Как уже указано, положение точки *А* должно быть таким, чтобы угол *ДАГ* равнялся широте места наблюдения, а линия *АГ*, соединяющая центр шаровой головки *А* с центром оси *ГД*, была горизонтальна и лежала вместе с серединой горизонтальной оси в плоскости меридиана. Определяя расстояние *АГ*, будем иметь в виду, что, очевидно, $ГД : АГ = \operatorname{tg} \varphi$ (φ — широта места наблюдения).

Примерные расчетные данные такого штатива для нашего 150-мм рефлектора указаны на рис. 97 (предполагается, что штатив предназначен для широты Москвы). Положение точки *Б* произвольно и определяется лишь требованиями удобства; шаровую головку *А* следует устроить так, чтобы ее можно было слегка передвигать вдоль линии *АГ* для регулировки.

Описанная установка будет очень прочна и устойчива, а все ее части окажутся легко доступными наблюдателю, смотрящему в окуляр. Поворачивание инструмента вокруг вертикальной оси можно сделать более точным и удобным, устроив на основании штатива колесико *Е*, плотно касающееся обода на нижней части вилки. Если его обтянуть резиной для увеличения трения, то, вращая колесико с помощью ключа *К*, можно осуществить плавное движение трубы вдоль суточной параллели.

При всех своих удобствах описанная установка не лишена недостатков. Прежде всего она, конечно, пригодна лишь для наблюдения светил к югу от первого

вертикала. Для наблюдений к северу от него, очевидно, придется пользоваться этим штативом как простым азимутальным, отъединив трубу от подпорки; поэтому нужно предусмотреть такое устройство, которое позволило бы легко разнимать подпорку где-либо близ точки *Б*. Другим недостатком будет то, что подпорка *АБ* своей тяжестью будет выводить трубу из равновесия, притом тем сильнее, чем больший угол с меридианом труба составляет; поэтому по мере удаления от меридиана труба будет испытывать все увеличивающееся стремление к самопроизвольному вращению вокруг вертикальной оси; с этим, впрочем, нетрудно бороться либо повышая трение либо передвигая дополнительный груз, устроенный на задней части трубы; такой груз вообще очень желательно иметь для уравнивания окулярной части, если она окажется нагруженной какими-либо дополнительными приспособлениями (фотокамера, солнечный экран и пр.). Надо, однако, сказать, что недостатки эти вовсе не столь серьезны; большая часть наблюдений производится к югу от первого вертикала, а в околополярной области неба линейная скорость суточного движения светил настолько мала, что обычная азимутальная установка почти не представляет неудобств.

Относительно отделки штатива надо сказать следующее. Деревянные части, кроме внутренней поверхности трубы, о которой мы скажем особо, лучше всего выкрасить масляной или эмалевой краской, предварительно хорошо загрунтовав; то же относится и к железным частям. Латунь оставим, конечно, некрашеной. Части штатива лучше всего выкрасить в более темный цвет, равно как и поперечный пояс, которым труба прикрепляется к своей оси, а также концевые фланцы на трубе.

Основные недостатки азимутальной установки таковы. Во-первых, при длительных наблюдениях приходится перемещать телескоп вращением вокруг двух осей — вертикальной и горизонтальной, что не дает возможности автоматизировать слежение за звездой.

Во-вторых, изображение небесного тела (особенно это заметно при наблюдениях звездных полей) вращается вокруг центра поля зрения. Поэтому производить какие-либо снимки небесных светил с длительной экспозицией при помощи телескопа, смонтированного на азимутальной установке, нельзя.

Следует рекомендовать любителю изготовить хотя бы простейшую экваториальную установку.

Вместе с тем надо заметить, что при конструировании в СССР крупнейшего в мире 6-метрового телескопа-гиганта была принята азимутальная установка. Все перемещения огромной трубы и повороты фотографических кассет управляются счетно-решающими электронными машинами по заданной программе.

3. Экваториальная установка

При более значительных размерах инструмента или при наблюдениях, требующих измерений, не говоря уже о фотографических работах, необходимо устройство такой установки, которая обеспечивала бы точное ведение инструмента за суточным движением светила. Это достигается *экваториальной* (параллактической) установкой. Чтобы получить такую установку, нужно наклонить вертикальную ось к горизонту под углом, равным широте места наблюдения, и расположить в плоскости меридиана. Иными словами, одна из осей устанавливается параллельно оси мира; вращаясь вокруг нее, телескоп описывает дуги суточной параллели. Другая ось, перпендикулярная к первой, позволяет поворачивать телескоп по склонению. Первая ось, параллельная оси мира, называется полярной или часовой, вторая — осью склонения. Таким образом, телескоп, наведенный на какое-либо светило, будет следовать за ним при поворачивании лишь вокруг одной полярной оси.

Устройство экваториальной установки может быть выполнено различными способами. Простое наклонение оси азимутального штатива неудобно по двум причинам: во-первых, наклоненная втулка под тяжестью трубы перекашивается и начинает «заедать», и, во-вторых, область неба в окрестностях полюса становится недоступной, так как нацеленная на полюс ось не дает возможности навести туда же трубу. Чтобы избежать этих недостатков, полярную ось экваториальной установки делают особенно устойчивой против бокового давления, и всю установку стараются устроить так, чтобы трубу можно было навести на любую точку неба, включая и окрестности полюса.

В так называемой немецкой установке (рис. 98) длинная полярная ось *П* вращается в прочной втулке. На

верхнем ее конце укреплена втулка оси склонения. Ось склонения C проходит насквозь и на одном конце несет трубу T , а на другом — уравнивающий ее груз Γ (противовес). Такое устройство дает возможность свободно наводить телескоп на любую точку неба, причем он сохраняет равновесие при любом положении трубы.

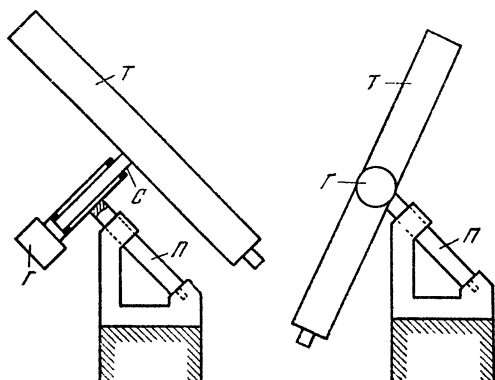


Рис. 98. Схема экваториальной установки немецкого типа.

Немецкая установка довольно сложна и требует очень хорошего механического выполнения. На рис. 99 изображена типичная немецкая установка для рефрактора средней величины.

На чугунной пустотелой колонне, стоящей, во избежание сотрясений, на бетонном или кирпичном основании, укреплен прочный металлический клин, верхняя площадка которого образует с горизонтом угол, равный широте места. У небольших штативов наклон оси делается переменным, чтобы установку можно было использовать на любой широте. Для этого полярная ось со своими подшипниками присоединена к массивному шарниру, поворачивая который можно установить ось под любым углом к горизонту. К верхнему концу полярной оси прикреплена ось склонения со своими подшипниками. На одном ее конце укреплена труба, на другом — противовес, который может передвигаться вдоль оси на резьбе; таким образом, трубу можно точно уравновесить в случае присоединения к ней каких-либо дополнительных приспособлений или, наоборот, при удалении какой-либо части, например фотографической камеры.

Еще один противовес меньшего размера находится на специальном стержне у передней части трубы для уравновешивания трубы относительно оси склонений.

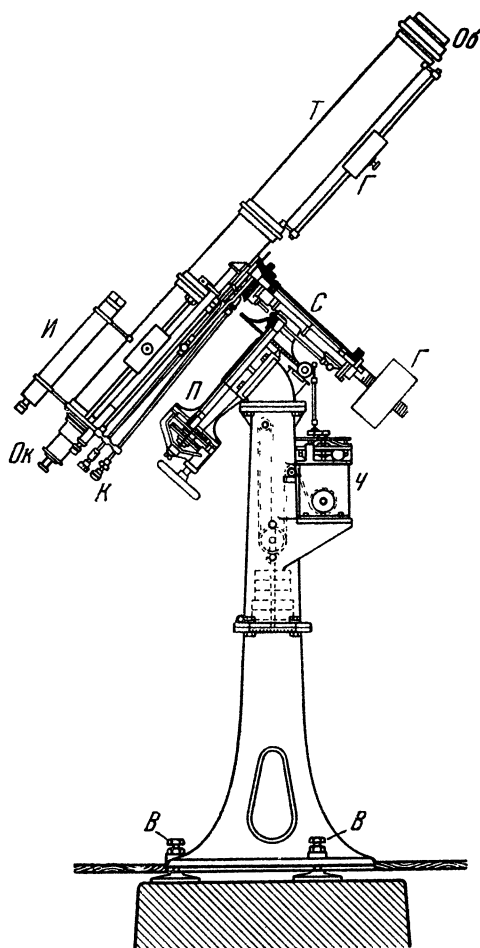


Рис. 99. Стационарная (непереносная) экваториальная установка немецкого типа для среднего рефрактора: Т — труба; И — искатель; Об — объектив; Ок — окуляр; Г — уравнивающие грузы; С — ось склонения; П — полярная (часовая) ось; Ч — часовой механизм; К — микрометрические ключи; В — установочные винты.

Поворачивание инструмента вокруг полярной оси производится при помощи зубчатой передачи, соединенной с полярной осью. По склонению инструмент может

поворачиваться просто рукой за окулярный конец трубы. Грубо установив трубу таким образом, закрепляют обе ее оси при помощи зажимов, управляемых длинными ключами, головки которых находятся около окуляра, и точно наводят телескоп на нужное место неба при помощи микрометрических ключей, тоже подведенных к окуляру. Обычно головки ключей делаются различного размера и неодинаковой формы, чтобы их легко было различать на ощупь во время ночных наблюдений. Более совершенные инструменты движутся в направлении видимого вращения небесного свода часовым механизмом, укрепленным на колонне. Для небольших поправок работы часового механизма и компенсации других возможных ошибок установки наблюдатель пользуется микрометрическими ключами по прямому восхождению и по склонению.

Для наводки телескопа служит искатель — небольшая труба с большим полем зрения, укрепленная на главной трубе параллельно последней. Для отыскания слабых объектов, невидимых в искатель, на обеих осях насажены разделенные круги, показывающие часовой угол и склонение той точки неба, которая видна в центре поля зрения телескопа. Эти круги, конечно, выполняют и обратную задачу: с их помощью наблюдатель может определять экваториальные координаты объекта, видимого в телескопе.

Описанная экваториальная установка принадлежит к числу стационарных. Раз установленная, она уже должна оставаться на месте. Чтобы хорошо работать, она должна быть тщательно отрегулирована: полярная ось должна быть установлена точно в плоскости меридиана и иметь наклон, равный широте места наблюдения.

Переносные экваториальные установки делаются проще. Так как они предназначены для самых малых инструментов, то они могут быть более легкими и менее точными. В большинстве случаев такие штативы не преследуют иной цели, кроме обеспечения возможности удерживать светило в поле зрения достаточно долго.

Совершенная установка обеспечивает такое точное ведение инструмента, что светило, приведенное в центр поля зрения, лишь незначительно смещается в процессе наблюдения в силу неизбежных погрешностей зубчатых передач, соединяющих полярную ось с часовым механизмом. Впрочем, никакой часовой механизм не в силах

обеспечить вполне точное совпадение движения трубы с видимым движением светила, потому что видимое движение светил неравномерно вследствие действия атмосферной рефракции, меняющейся с высотой над горизонтом. Кроме того, Луна и планеты обладают собственным движением. Поэтому в тех случаях, когда необходимо точно удерживать светило в одной и той же точке поля зрения, например, при фотографировании светил с длительной экспозицией, наблюдатель все время должен выправлять возникающие отклонения при помощи микрометрических ключей.

подавляющее большинство рефракторов, включая и самые крупные, монтировано на немецкой установке.

Другой тип экваториальной установки носит название *английской* (рис. 100). Главная особенность английской установки заключается в том, что ее полярная

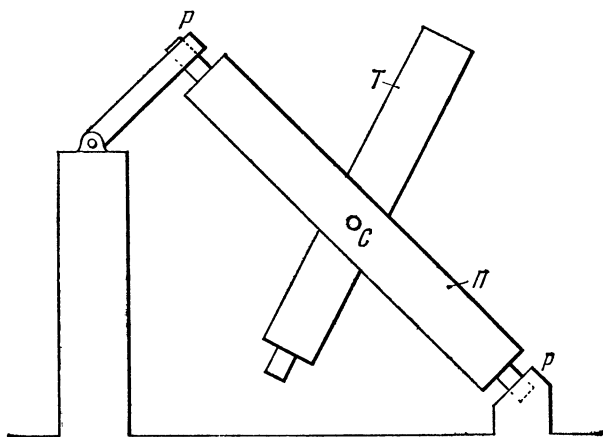


Рис. 100. Схема экваториальной установки английского типа.

ось Π имеет вид вытянутой рамы или ярма; концы ее покоятся на подшипниках P , укрепленных на самостоятельных подставках, а внутри этой рамы помещается труба T , которая может вращаться вокруг перпендикулярной к ней оси C . Достоинство английской установки состоит в ее чрезвычайной устойчивости и в отсутствии излишней нагрузки, производимой противовесами. Перед немецкой установкой у нее есть еще одно важное преимущество, состоящее в том, что тренога или колонна

немецкой установки при некоторых положениях инструмента мешает наблюдениям, так как окулярный конец трубы оказывается слишком близким к ней и может даже в нее упереться. Когда инструмент оказывается в таком положении, приходится прерывать наблюдения и переводить трубу на другую сторону от подставки. Действительно, начав наблюдать звезду, когда она еще к

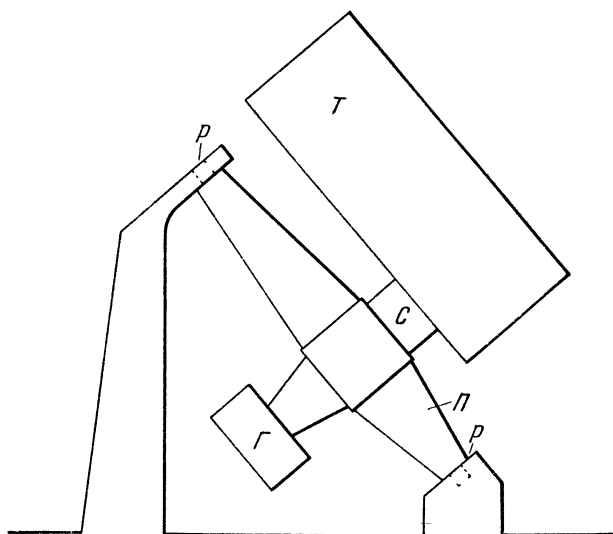


Рис. 101. Схема варианта экваториальной установки английского типа, позволяющей наблюдать околополярную область неба.

востоку от меридиана, в трубу, находящуюся справа от колонны (или треноги), мы через некоторое время вынуждены будем повернуть трубу вокруг часовой оси, чтобы она оказалась слева от колонны, иначе, если звезда близка к зениту, конец трубы упрется в колонну. Для этого трубу придется поставить параллельно полярной оси, повернуть вокруг последней и снова навести на наблюдаемый объект. Нечего и говорить, что это серьезный недостаток для фотографических работ, где выдержка иногда длится часами, а описанная операция перевода трубы делает продолжение экспозиции, конечно, невозможным. Английская установка свободна от этих недостатков, но зато лишена главного достоинства немецкой установки: ей недоступен значительный участок неба, окружающий полюс.

Другая разновидность английской установки (рис. 101) представляет собой громадную трубчатую полярную ось Π , подшипники P которой установлены на двух столбах: около середины к ней приделана на подшипниках ось склонения C , несущая на одном конце трубу T , на другом — противовес G .

Достоинство этой установки очевидно: оно состоит в доступности околополярной области неба и в то же время в отсутствии помехи со стороны колонны, как у немецкой установки. На установке этого типа монтированы многие крупнейшие рефлекторы.

Английская установка первого типа очень широко применяется для малых любительских рефлекторов и может быть сделана почти целиком из дерева.

Очень широко распространена и чрезвычайно удобна установка на вилке (рис. 102).

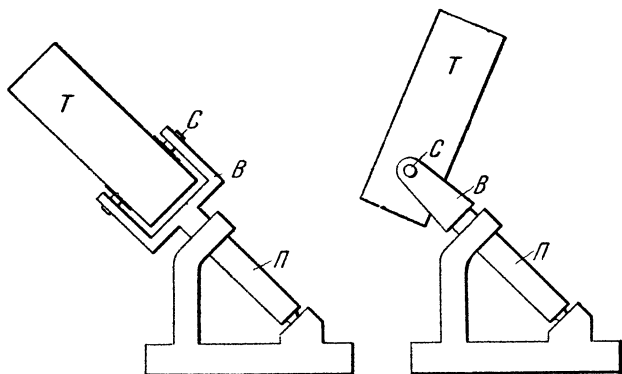


Рис. 102. Схема экваториальной установки на вилке.

Для рефлектора вилка особенно удобна. Ввиду того, что центр тяжести трубы рефлектора из-за большого веса зеркала находится ближе к нижнему концу, вилка может быть короткой. Так как окуляр рефлектора (при системе Ньютона) находится у верхнего конца трубы, то вилка не мешает наблюдению любого участка неба, в том числе и полярного. Поэтому многие крупнейшие рефлекторы монтированы на вилке.

При громадном весе зеркала и трубы большого инструмента, давящем односторонне на подшипники полярной оси, установка не смогла бы хорошо работать.

если бы не остроумное и смелое устройство, применяемое в данном случае. На верхнюю часть полярной оси насаживается большой пустотелый железный барабан, погруженный в ртуть, налитую в находящийся под ним резервуар. Этот железный барабан является подшипником, поддерживающим верхнюю часть полярной оси и ослабляющим вредное одностороннее давление на нее тяжести трубы.

Установка на вилке для небольших рефлекторов чрезвычайно удобна, хотя и труднее для выполнения, чем примитивная английская установка.

Рис. 103 показывает простой вариант экваториальной установки английского типа, вроде в свое время рекомендованной А. А. Чикиным. Сделанная из дерева (за

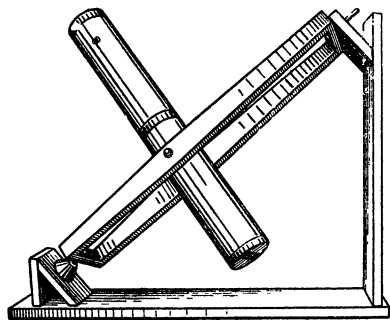


Рис. 103. Вариант простой установки английского типа (по А. А. Чикину).

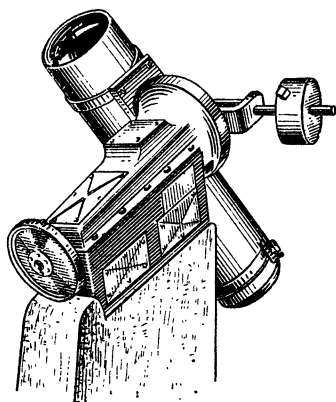


Рис. 104. Установка немецкого типа с часовой осью, сделанной из старых частей (блок цилиндров, коленчатый вал, маховик) автомобильного двигателя.

исключением наконечников осей), она очень недорога и проста в изготовлении. Недостатком этой установки является недоступность довольно значительного околополярного участка неба.

Любопытное решение вопроса о придании устойчивости установке немецкого типа показано на рис. 104; в качестве полярной оси здесь использован коленчатый вал от старого автомобильного мотора вместе с блоком цилиндров.

Сделаем еще одно довольно важное замечание, относящееся ко всем установкам рефлектора Ньютона. Оно

касается размещения окулярной части. Оказывается, что для удобства наблюдений далеко не безразлично, как укрепить на трубе окулярную часть. Она должна быть укреплена на трубе так, чтобы быть параллельной «последней» оси вращения установки: в азимутальной установке — параллельной горизонтальной оси, а в экваториальной — оси склонений. С этой точки зрения описанная выше чикинская доска вполне удовлетворяет этому требованию. Если же труба круглая, то здесь при выборе места размещения окулярной части приходится считаться с этим пожеланием. Если этого не сделать, то при вращении телескопа вокруг оси склонений мы будем видеть поле зрения перемещающимся под углом к направлению перемещений, что создает для наблюдателя известные неудобства.

При конструировании установки открывается самое широкое поле для личной изобретательности. Нет и не может быть, однако, раз навсегда установленного типа любительской установки для телескопа, настолько различны в каждом случае возможности и даже личные склонности любителя телескопостроения. Любительский инструмент может быть снабжен совершенной установкой, отлично выполненной по образцу лучших «профессиональных» инструментов, если за ее постройку возьмется коллектив, имеющий доступ к механической мастерской.

4. Регулирование экваториальной установки

Азимутальная установка не требует специальных приспособлений для регулирования положения осей вращения. В самом деле, совершенно не обязательно, чтобы вертикальная ось вращения была точно установлена вдоль линии отвеса, т. е. занимала строго вертикальное положение.

Для правильной работы экваториальной установки она должна быть так расположена, чтобы часовая ось была строго параллельной оси мира. Иными словами, она должна располагаться точно в плоскости небесного меридиана и быть наклоненной к плоскости математического горизонта под углом, равным географической широте места наблюдения. Установив полярную ось на глаз, например, нацелив ее на Полярную звезду, мы вскоре заметим, что удаленная от полюса звезда не

будет долго задерживаться в центре поля зрения, если за ней следить, поворачивая телескоп вокруг одной лишь часовой оси при закрепленной оси склонений. Звезда, сначала приведенная в центр поля зрения, будет постепенно смещаться и потребуются дополнительное вращение вокруг оси склонений, чтобы снова привести ее в центр поля зрения.

Это смещение вызывается тем, что часовая ось расположена не параллельно оси мира, а образует с ней некоторый угол. При точном ее расположении этого смещения (если пренебречь действием рефракции) быть не должно. Звезда в своем суточном движении описывает на небесной сфере суточную параллель. Центр поля зрения телескопа при вращении последнего вокруг часовой оси также описывает на небесной сфере некоторый круг. При правильной установке часовой оси этот круг совпадает с суточной параллелью. Несовпадение же их и приводит к смещению звезды.

Неточность положения часовой оси можно разложить на две слагающие. Во-первых, часовая ось может быть выведена из плоскости небесного меридиана. Во-вторых, ее наклон к плоскости математического горизонта может отличаться от значения географической широты. В соответствии с этим и процесс регулировки можно разделить на два этапа.

Прежде всего скажем несколько слов о самой конструкции экваториальной установки, которая допускает такую регулировку. Вся установка должна допускать небольшие перемещения как одно целое. Покажем, как предусмотреть такую возможность на примере немецкой установки рефрактора, изображенной на рис. 99. В этом отношении установка рефлектора ничем от нее не отличается.

Внизу колонны расположены три опорных винта *В*, и колонна опирается на них. Они в свою очередь опираются на три прочные и неподвижно установленные «чашки». Винты позволяют наклонять колонну и тем самым изменять направление часовой оси. Как должны они располагаться? Винты отстоят друг от друга на равные углы по окружности, т. е. на 120° . Такое расположение винтов в вершинах равностороннего треугольника является наиболее удобным, и надо их так установить, чтобы один из винтов был закреплен в направлении на юг, а прямая линия, соединяющая два других винта,

была горизонтальной и направленной вдоль линии «запад — восток». Это обязательное требование. По желанию «южный винт» может быть закреплен и в северной части колонны. Иногда это удобнее конструктивно.

Кроме того, предусмотрено приспособление, которое позволяет в небольших пределах поворачивать всю установку вокруг вертикальной линии. Оно на рис. 99 не указано.

Приступим теперь к первому этапу регулировки. Прежде всего необходимо, чтобы путем ввинчивания одного из винтов (например, восточного) часовая ось была приведена в такое положение, чтобы она располагалась в вертикальной плоскости. Для этого надо воспользоваться накладным уровнем с пузырьком.

После этого, поворачивая установку вокруг вертикальной линии, будем добиваться, чтобы часовая ось расположилась в плоскости меридиана. Тут мы воспользуемся следующим обстоятельством. Неточный наклон часовой оси к плоскости горизонта мало сказывается на движении звезды, если последняя расположена вблизи небесного меридиана; зато выход часовой оси из плоскости меридиана сказывается в этом случае очень сильно.

Выбираем звезду, которая расположена вблизи небесного меридиана к югу от зенита и имеет зенитное расстояние около $40-50^\circ$. Наводим на нее телескоп и закрепляем ось склонений. Затем будем следить за звездой, перемещая телескоп вокруг часовой оси. Для большей уверенности наблюдений полезно предварительно натянуть крест нитей в поле зрения окуляра.

Если звезда не смещается по отношению горизонтальной нити, то часовая ось установлена правильно. Если звезда смещается к югу (в поле зрения телескопа кверху), то это означает, что северный конец часовой оси надо подвинуть (вращая установку вокруг вертикальной линии) к западу. Если звезда смещается к северу (в поле зрения книзу), то надо подвинуть ось к востоку. Сделаем небольшой поворот в нужном направлении и будем снова следить за звездой. Так, последовательными приближениями мы должны добиться такого положения, чтобы звезда, находящаяся вблизи верхней кульминации, не отходила от центра поля зрения. После этого можно начинать второй этап регулировки, который состоит в придании часовой оси должного угла наклона.

Теперь мы воспользуемся тем, что неправильный наклон оси сильнее всего сказывается при наблюдениях звезд, находящихся вблизи первого вертикала. Условно назовем «восходящей» звезду, у которой азимут близок к 270° ; такая звезда расположена в восточной части неба. «Заходящей» назовем звезду, расположенную в западной части неба, с азимутом, близким к 90° .

При таких положениях звезды сильно сказывается влияние рефракции, поэтому для наблюдений желательно выбирать звезды, имеющие зенитные расстояния не больше $20\text{--}30^\circ$. На таких зенитных расстояниях рефракция невелика.

Наводим телескоп на звезду, снова закрепляем склонение и начинаем следить за ней, поворачивая вокруг часовой оси. Если звезда не будет уходить из центра поля зрения, то наклон часовой оси правилен. Если же она отходит, на этот раз наклонно и вбок, то наклон надо исправлять.

Рассмотрим сначала «восходящую» звезду. Если она смещается влево, то это означает, что северный конец часовой оси надо поднять, т. е. увеличить ее наклон к горизонтальной плоскости.

Если же звезда смещается вправо, то северный конец часовой оси надо опустить.

Если для наблюдений избрана «заходящая» звезда, то наблюдающиеся смещения вызваны обратной картиной расположения часовой оси. При смещении звезды в левую сторону надо северный конец часовой оси опускать, а если направо, то поднимать.

Эти действия также выполняются последовательными приближениями. Опускание же оси, или ее подъем, осуществляется ввинчиванием или вывинчиванием южного (или северного) винта основания установки.

После окончания второго этапа полезно повторить все действия снова, начиная с первого этапа, т. е. при установке телескопа полезно проделать несколько серий проверок.

Описанный способ — простейший, не требующий дополнительных, часто отсутствующих приспособлений. Существуют и более точные методы, но они требуют наличия разделенных кругов, которые устанавливаются на осях — часовой и склонений. Такой способ описан в «Справочнике любителя астрономии» П. Г. Куликовского (изд. 4-е, «Наука», 1971, стр. 301).

Г Л А В А X

РАБОТА С ТЕЛЕСКОПОМ

1. Принадлежности телескопа

Мы уже упоминали, что наведение рефлектора, особенно ньютоновского, на нужный небесный объект требует использования вспомогательных приспособлений, особенно если поле зрения телескопа невелико.

В простейшем случае можно, конечно, обойтись «прицелом», состоящим из двух диоптров, т. е. попросту из двух укрепленных на трубе стоек, задняя из которых несет кружок с маленьким отверстием, а передняя — колечко. При достаточном расстоянии между диоптрами (не менее 1 м) с помощью такого простого устройства легко наводить небольшую трубу на достаточно яркие объекты. Для этого нужно, глядя в малое отверстие глазного диоптра, так направить трубу, чтобы объект был виден в середине кольца дальнего диоптра.

Однако если диаметр объектива телескопа превышает 75—100 мм и применяется увеличение более чем в 20 раз, необходим искатель. Поле зрения телескопа настолько мало, что непосредственная наводка на нужный объект, в особенности, если он слабый, очень трудна. Искатель, обладающий большим полем зрения, облегчает эту задачу. Он обычно устанавливается сбоку на трубе телескопа, на двух стойках, заканчивающихся кольцами, в которых имеются по три регулировочных винта. Эти стойки изображены на рис. 105. Их назначение состоит в том, чтобы они не только укрепляли трубку искателя, но и давали бы возможность так перемещать его

оптическую ось, чтобы она стала точно параллельной оптической оси главной трубы. В фокальной плоскости искателя натягиваются две образующие крест толстые нити, хорошо заметные на фоне ночного неба. Когда искатель отрегулирован, светило, видимое на перекрестии нитей, одновременно оказывается вблизи центра поля зрения телескопа.

У больших телескопов имеются два искателя разной силы. Маленький искатель, обладающий бóльшим полем зрения, служит для предварительного наведения телескопа на небесное светило. Второй, более мощный иска-

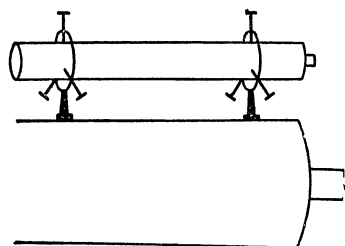


Рис. 105. Установка искателя с регулировочными приспособлениями.

тель, имеющий меньшее поле зрения, но больший масштаб изображений, служит для уточнения наводки инструмента. В этом случае производится двухэтапное наведение.

Сделать искатель можно из трубки теодолита, из карманной зрительной трубы, из половинки бинокля или стереотрубы. В настоя-

щее время в магазинах фотографической оптики имеются хорошие визирные трубки с увеличением около 10 раз. В крайнем случае можно обойтись и самодельной зрительной трубой с объективом из положительного очкового стекла в 2—3 диоптрии; возможно, что для ослабления aberrаций отверстие надо будет задиафрагмировать до 20—30 мм.

Укрепив обычный искатель на ньютоновском рефлекторе параллельно оптической оси, мы создаем известное неудобство. Нам придется отрываться от окуляра, чтобы навести трубу на объект, глядя вдоль нее.

Можно использовать искатель в виде коленчатой трубки со вспомогательным плоским зеркалом и поместить его окуляр неподалеку от окуляра телескопа (рис. 106). Это будет гораздо удобнее, но изображения мы увидим зеркально перевернутыми. Если же удастся достать пентапризму и укрепить ее перед объективом искателя, то изображения уже не будут зеркальными.

Если искатель установлен на переднем конце трубы, то он создает дополнительную нагрузку. Для уравнивания телескопа надо предусмотреть на продольной

оси телескопа сменные или передвигающиеся вдоль трубы противовесы.

Телескопы, предназначенные для фотографических работ, должны иметь, кроме искателя, еще так называемый «телескоп-гид». Это телескоп, часто не уступающий по силе основному инструменту. Глядя в сильный окуляр гида, наблюдатель все время регулирует движение телескопа. Он удерживает светило на кресте нитей гида, следя за фотографируемым объектом во время экспозиции, — «гидирует». Это довольно утомительная работа, если экспозиция

длительная. Кстати, лучше, если гид имеет сильное увеличение, которое позволяет легко замечать мелкие сдвиги изображения. Для фотографических наблюдений необходимо пристроить к рефлектору камеру. Ее лучше всего самому не изготавливать, а использовать обычный пленочный фотоаппарат с затвором.

Если вывинтить из него объектив, то можно поставить камеру вместо окуляра и получить снимки в главном фокусе рефлектора, без увеличения. Правда, для этого нужна прочная металлическая окулярная часть, обеспечивающая плавную фокусировку и возможность отсчета выдвиганий по шкале.

Фокусировать надо по изображениям звезды. Предфокальные и зафокальные изображения звезд будут иметь форму кружка с дырочкой в центре. Фокальное же изображение звезды — точка. Получение снимков Луны часового механизма не требует. Но уже снимки планет или звездных полей производятся с более или менее длительной экспозицией и требуют «ведения» телескопа при помощи часового механизма. К вопросу об устройстве часового механизма мы еще вернемся.

Можно, но несколько труднее, сделать фотокамеру с окулярным увеличением. Эту возможность обеспечит тот же обычный пленочный фотоаппарат, но теперь надо сохранить в нашей оптической системе окуляр, а уже

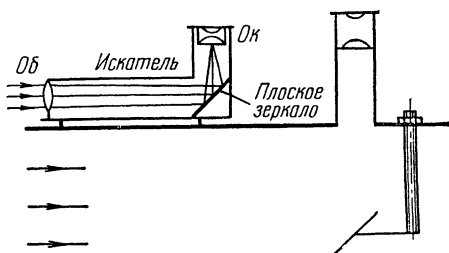


Рис. 106. Удобная схема искателя, применяющегося при работе с рефлектором системы Ньютона.

к нему приспособить камеру, соответствующим образом рассчитав нужные расстояния, после чего тщательно отфокусировать.

Вернемся к вопросу о визуальных наблюдениях. Ньютоновский рефлектор очень удобен для визуальных наблюдений. Как правило, наблюдатель смотрит в окуляр, наклонив голову. Кассегреновский же рефлектор подобен рефрактору. Наблюдатель смотрит вверх, и ему приходится «задирать» голову, что при малых зенитных

расстояниях утомительно. При наблюдении близполюсных объектов и особенно Полярной звезды вилочная установка кассегреновского рефлектора практически не дает возможности выполнения визуальных наблюдений.

Чтобы облегчить наблюдения околозенитных и близполюсных объектов, как в телескопе Кассегрена, так и в обычном рефракторе используется специальный зенитный окуляр (рис. 107).

В тубус вставляется посеребренное снаружи плоское зеркало или прямоугольная стеклянная

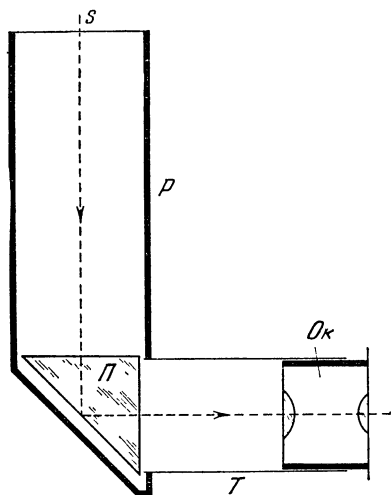


Рис. 107. Схема окуляра с зенитной призмой.

призма Π . Тубус состоит из двух частей. В патрубке T вставляется окуляр O . Лучи s , идущие от объектива, входят в призму, претерпевают в ней полное внутреннее отражение и попадают в окуляр. Таким образом, в телескоп, направленный на близкую к зениту звезду, глядеть очень удобно, так как теперь отраженная призмой (или плоским зеркалом) оптическая ось почти горизонтальна. Если должным образом рассчитать длины патрубков такого приспособления, то можно «поймать двух зайцев»: сделать наблюдения удобными и, более того, вывести лучи в сторону, так чтобы вилочная установка не мешала наблюдениям полярной области неба. Правда, мы будем наблюдать зеркально повернутые изображения, что, в конце концов, не является существенным недостатком.

На долю читателя остался выбор — призма или плоское зеркало. Последнее предпочтительнее, так как мы не стеснены размерами при его изготовлении, а достать призму нужных расчетных размеров часто нелегко.

Теперь коснемся наблюдений Солнца. Прежде всего напомним, что смотреть на Солнце в окуляр нельзя, даже если глаз защищен темным светофильтром — наблюдатель ослепнет. Дифрагмирование объектива рефрактора и главного зеркала рефлектора не поможет. Оно вдобавок ухудшает изображение. Поэтому наблюдения Солнца ведут на экране. Следовательно, прочно укрепленный экран, имеющий возможность значительно (до 0,5 метра или несколько больше) отодвигаться на рейке, перпендикулярно к оптической оси окуляра, — одна из принадлежностей телескопа.

Другое, очень удобное приспособление для наблюдений Солнца — это солнечный окуляр (рис. 108). Его назначение — ослабить яркость изображения Солнца и,

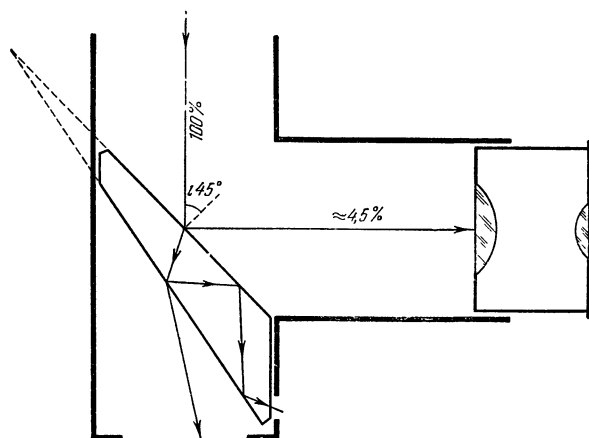


Рис. 108. Схема солнечного окуляра с призмой.

кроме того, не допускать перегрева окуляра, линзы которого могут даже треснуть. Главная часть солнечного окуляра — также призма, но совершенно иного вида, чем в зенитном окуляре. Если там применяется призма полного внутреннего отражения, цель которой — как можно полнее отразить свет в окуляр, здесь задача обратная: отразить как можно меньше света. Для этого один из углов призмы (на рисунке левый) делается малым

(от 7 до 10°). Свет падает на переднюю грань призмы, расположенную под углом в 45° к оптической оси, причем в окуляр отражается всего лишь около 4,5% упавшего пучка лучей, а главная его часть входит в призму, где частично отражается от второй поверхности; большая же часть света (около 90%) проходит насквозь. Отраженный от второй поверхности свет падает опять на первую поверхность, но под углом, большим чем критический, и испытывает вследствие этого полное внутреннее отражение; упав опять на вторую поверхность, он снова претерпевает полное внутреннее отражение. Поэтому никакого света, кроме той его части, которая первоначально отражена от первой поверхности, в окуляр попасть не может. Хотя окуляра при этом достигает меньше 5% солнечного света, изображение Солнца, конечно, еще слишком ярко, чтобы его можно было рассматривать незащищенным глазом. Для дальнейшего ослабления яркости на окуляр надевают темное стекло. Становиться на пути лучей, вышедших в прямом направлении, нельзя; здесь концентрируется 95% собранного объективом солнечного излучения.

Наилучшее решение задачи — установка перед телескопом (т. е. в параллельном пучке лучей) плоскопараллельного диска из оптического стекла, покрытого серебряной или алюминиевой пленкой, частично пропускающей свет. Таким путем можно избежать нагревания зеркал и внутренней поверхности трубы, т. е. получить наименее искаженное изображение Солнца. Но для наших целей потребовалось бы такое стекло более 150 мм в диаметре, что для любителя трудно достижимо.

Принадлежностями, о которых мы говорили, конечно, далеко не исчерпывается весь список вспомогательных приспособлений, желательных при работе с телескопом.

При наличии желания и определенных возможностей коллектив любителей может изготовить фотоэлектрический фотометр. Как его сделать, подробно описано Ю. А. Медведевым в книге «Переменные звезды и способы их исследования» («Педагогика», 1970) и В. П. Цесевичем в Постоянной части Астрономического Календаря (изд. 6-е, «Наука», 1973).

Однако как фотографические, так и фотоэлектрические наблюдения обязательно потребуют устройства часового механизма, который, вращая полярную ось экваториальной установки телескопа, давал бы возмож-

ность автоматически перемещать телескоп, следя за суточным движением звезды.

Основная деталь часового механизма — диск (рис. 109, 3) с нанесенной на его боковой поверхности полной червячной нарезкой, которая должна быть выполнена с максимальной тщательностью и точностью. Обычно на полной окружности нарезают 360 зубьев. С этим диском, который мы будем условно называть

«зубчаткой», находится в прочном зацеплении червяк Ч; червяк — это прочный стальной стержень с очень точной нарезкой, плотно входящей в пазы нарезки зубчатки. Если червяк сделает за 4 минуты звездного времени один оборот вокруг оси, то он сдвинет зубчатку на один шаг бесконечного червячного винта, а их сделано 360. Следовательно, зубчатка повернется за это время на 1 градус и на 360° за звездные сутки. Пропустив через отверстие в диске зубчатки полярную ось, мы добьемся плавного перемещения телескопа в одном темпе с суточным вращением небесной сферы.

Третья деталь часового механизма — правильно рассчитанный редуктор из конических шестерен (Ш). При его расчете надо исходить из свойств того двигателя, которым приводится во вращение ось основной, связанной с ним шестерни. Если этот двигатель — синхронный электромотор, то надо знать, сколько оборотов в минуту он делает, и так подобрать шестерни, чтобы червяк делал один оборот за 4 звездные минуты. Так, например, в ряде телескопов-рефлекторов используется двигатель синхронный конденсаторный типа Д-960 УЗ напряжением 220 вольт, частотой сети 50 герц, у которого вал вращается со скоростью 15 оборотов в минуту.

Изготовление хорошей червячной передачи представляет большие трудности. Особо большие требования предъявляются к червяку. Его нарезка должна быть

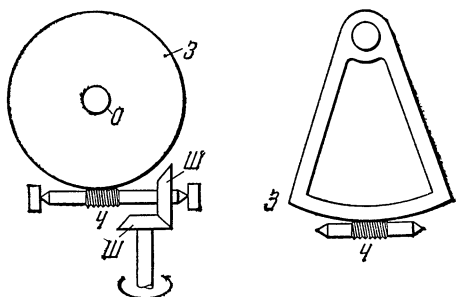


Рис. 109. Схема червячной передачи для вращения часовой оси телескопа (слева — с полным зубчатым колесом, справа — с зубчатым сектором).

строго концентричной с его продольной осью. Червяк и зубчатка должны быть хорошо пригнаны друг к другу. Центр отверстия зубчатки должен точно совпадать с центром вращения полярной оси. Высокие требования предъявляются и к коническим шестерням. Если эти условия не будут соблюдены, то инструмент будет вращаться неравномерно и, возможно, даже испытывать

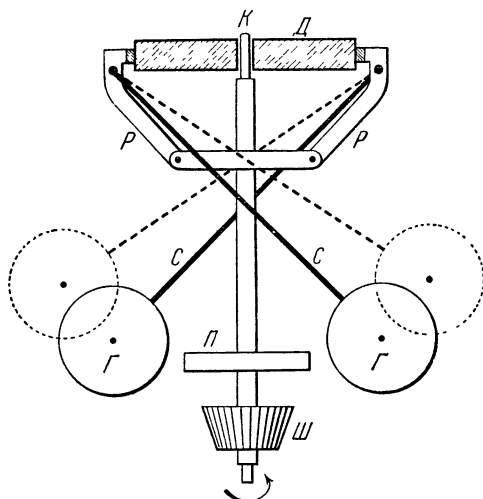


Рис. 110. Схема центробежного регулятора часового хода.

толчки. Неточная подгонка червяка и зубчатки приведет к возникновению «люфтов» — свободному нежелательному ходу телескопа при нажатии на него рукой или от порывов ветра.

Само собой разумеется, что полярная ось не может быть наглухо соединена с зубчаткой. Их скрепляют только после того как телескоп наведен на объект наблюдений.

Каким бы хорошим ни был часовой механизм, его ход требует коррекции. Поэтому при конструировании полярной оси предусматривают возможность микрометрических ее сдвигов относительно зубчатки. Иными словами, в конструкцию вводят приспособления для «мелких» движений.

Заметим, что совершенно не обязательно, чтобы диск зубчатки охватывал все 360 градусов. Можно изготовить часть зубчатки — сектор, который также изображен на

рис. 109. Только в этом случае надо предусмотреть возможность временного отключения червяка от сектора для приведения его заново в рабочее состояние.

Мы предполагали, что двигателем часового механизма служит синхронный электромотор. Однако существуют и гиревые часовые механизмы. Гиря падает ускоренно, и потому, чтобы сделать ход часового механизма равномерным, предусматриваются регуляторы. На рис. 110 изображен такой центробежный регулятор. На вертикальной оси *К*, сцепленной при помощи конических шестерен *Ш* с часовым механизмом, посредством коленчатых рычагов *Р* подвешены на стержнях *С* два груза *Г*. При медленном вращении грузы лежат на подпорках *П*, приделанных к нижней части оси. Но когда скорость вращения переходит критическую, они удаляются от оси и сгибают рычаги *Р*, прижимая их верхние концы, оклеенные деревом или кожей, к неподвижному диску *Д*, окружающему верхнюю часть оси *К*.

Чем больше скорость вращения превосходит нужную, тем сильнее действует этот тормоз, а коль скоро вращение замедляется, грузы опускаются и торможение ослабевает или прекращается вовсе. Регулятор можно установить на нужную скорость вращения.

Однако изготовить гиревой механизм значительно сложнее, чем описанный выше электрический.

2. Атмосферные помехи и условия наблюдений

Условия наблюдений (температура, состояние воздуха и пр.) сильно влияют на работу телескопа. Познакомимся с этими явлениями (о которых мы уже говорили в связи с испытанием телескопа) немного подробнее.

Наведя телескоп на Луну и отфокусировав изображение, мы почти всегда заметим, что край ее диска («лимб») как бы волнуется, струится, напоминая край полощущего на ветру флага. Этот «флаг», как его часто и называют, возникает от оптического влияния пробегающих на пути лучей воздушных волн различной температуры и плотности, имеющих, следовательно, различные показатели преломления и потому заметно отклоняющих лучи. Колебание изображения можно заметить не только на краю диска Луны, но и на планетах, а также на деталях поверхности Луны, на изображении

Солнца. Кроме колебаний, мы заметим и изменчивость отчетливости деталей, наиболее мелкие из которых то появляются, то становятся невидимыми, как бы размываясь. Непокойствие изображений заметно и невооруженному глазу в виде мерцания звезд.

Чем больше поперечник объекта, тем телескоп чувствительнее к состоянию атмосферы и тем заметнее вносимые воздушными неоднородностями искажения хода лучей. При сильных увеличениях вредное влияние оптической неоднородности движущегося воздуха также заметнее.

Атмосфера, без которой жизнь на нашей планете была бы невозможна, является таким образом серьезнейшей помехой для познания Вселенной. Мерцающие звезды как бы напоминают астроному о том, что он отделен от окружающего его космоса оптически вредной средой, мешающей не меньше чем худшая из аберраций. Именно поэтому, чтобы ослабить вредное влияние атмосферы, крупные обсерватории обычно строятся в горах, так сказать, подальше от дна воздушного океана. Кроме того, земная атмосфера поглощает очень интересные для астрофизики лучи, например, ультрафиолетовые. По этим причинам в настоящее время создаются орбитальные космические обсерватории на искусственных спутниках за пределами атмосферы.

При спокойном состоянии атмосферы телескоп дает хорошие изображения небесных светил (как говорят, хорошее качество изображений). Звезды представляются крохотными дисками, окруженными дифракционными кольцами; на желтом диске Марса видны зеленые «оазисы», а на его полюсе сияет шапка полярных снегов; тень от спутника, напоминающая дробинку, медленно ползет по полосатому сплюснутому диску Юпитера, и в кольце Сатурна четко видна узкая, как паутина, щель.

Уже давно разработана схема таких признаков изображения, которые дают возможность объективно оценивать состояние атмосферы. Перед наблюдениями необходимо делать такую оценку по приводимой ниже шкале Пиккеринга (рис. 111), чтобы при обработке наблюдений учесть вредное влияние атмосферных помех.

Изображения, оцениваемые баллами 1—3, очень плохи. Баллы 4—5 соответствуют плохим и удовлетворительным изображениям. Баллами 6—7 оцениваются

удовлетворительные и хорошие изображения, баллами 8—10 — хорошие и превосходные.

Если принять во внимание, что диаметр третьего дифракционного кольца примерно втрое больше диаметра дифракционного диска, то можно себе представить, насколько снижают разрешающую силу телескопа

Шкала Пиккеринга

Балл	Описание изображения
1	Диаметр изображения звезды превосходит вдвое диаметр третьего дифракционного кольца.
2	Диаметр изображения по временам больше диаметра третьего кольца.
3	Изображение примерно того же диаметра, как и третье кольцо, и ярче к центру.
4	Дифракционный диск виден часто, у более ярких звезд по временам заметны дуги (части дифракционных колец).
5	Диск виден постоянно; в изображениях более ярких звезд часто видны дуги.
6	Диск виден постоянно; короткие дуги видны постоянно.
7	Диск по временам резко отчетлив: а) видны движущиеся дуги; б) видны движущиеся полные кольца.
8	Диск все время резко очерчен: а) видны движущиеся дуги; б) видны движущиеся полные кольца.
9	Диск все время резко очерчен: а) внутренние кольца неподвижны; б) наружные кольца неподвижны в отдельные моменты.
10	Диск все время резко очерчен. Все кольца неподвижны: а) между кольцами по временам видны движущиеся детали; б) между кольцами никаких деталей не видно.



Рис. 111. Шкала качества изображений в баллах по Пиккерингу.

плохие изображения. Десятибалльная шкала Пиккеринга не полностью характеризует условия наблюдений — астроклимат. Оказывается, что для небольшого телескопа изображения могут быть хорошими, в то время как большой телескоп даст размытые изображения звезд. В чем причина?

Влияющие на качество изображений оптические неоднородности атмосферы могут иметь диаметр, в несколько раз больший диаметра малого объектива. Тогда

наблюдатель их влияния не заметит. У него изображение будет хорошим, но оно будет дрожать. Именно это дрожание и является причиной размытости изображений при наблюдениях в большой телескоп. Поэтому при изучении астроклимата данного места наблюдения важно наблюдать дрожание изображений, оценивая его в долях секунды дуги. Единственным условием для выполнения таких полезных наблюдений является полная устойчивость инструмента. Наблюдать же лучше всего Полярную звезду, не используя при этом часовой механизм. Можно изготовить и поместить в фокусе окуляра шкалку, которую прокалибровать хотя бы по двойным звездам. Надо будет регулярно оценивать дрожание с точностью до $0'',1$; очевидно, что нужно применять сильный окуляр с увеличением около 250 раз. Кроме того, интересно наблюдать дрожание края солнечного диска на экране, оценивая по пятибалльной шкале Кипенхойера. Если дрожания нет, то пишется балл 1; если на краю солнечного диска дрожание составляет $2''$, то балл 2, если край диска волнуется и пульсирует с амплитудой $4''$ — балл 3. При дрожании с амплитудой $5''$ — балл 4, а если амплитуда еще больше, то балл 5.

За подробностями отсылаем к «Инструкции для наблюдений астроклимата», написанной С. Б. Новиковым и опубликованной в Постоянной части Астрономического Календаря (изд. 6-е, «Наука», 1973).

Ряд других метеорологических факторов также влияет на видимость светил. Наиболее существенные из них — туман и пыль, которые сильно снижают прозрачность атмосферы, отчего проникающая сила телескопа заметно падает. Сильно понижает проникающую силу телескопа и городское освещение. Однако на резкость изображений эти факты прямо не влияют.

Необходимо еще раз напомнить, что атмосферные помехи тем слабее сказываются на качестве изображений, чем меньше диаметр объектива телескопа. Однако те любители, которые обладают телескопами с отверстием объектива в 150 мм и более, должны внимательно отнестись к сказанному.

От качества изображений зависит также и предельное увеличение окуляра, которое можно в данных условиях применять.

В главе I сказано все необходимое о наименьшем полезном увеличении (m) и разрешающем увеличении

(m_p). Из сообщенных там сведений легко сделать вывод о том, какие окуляры понадобятся для нашего телескопа. Более простой вариант рефлектора системы Ньютона со сферическим зеркалом и $V \approx 8$ для получения наименьшего полезного (равнозрачкового) увеличения требует, очевидно, окуляра с фокусным расстоянием около 50 мм ($\approx 8 \times 6$), а для достижения разрешающего увеличения понадобится окуляр с фокусным расстоянием не более 6 мм ($\approx 8 \times 0,7$). В случае параболического зеркала с $V = 7$ понадобятся несколько более сильные окуляры ($f \approx 40$ мм и $f \approx 5$ мм). Что касается предельного (максимального) увеличения, то оно, как мы видели, может достигать величины $2,5 D$ (мм), что требует еще более сильных окуляров, если бы в таком увеличении появилась надобность.

Наш рефлектор с зеркалом диаметром в 150 мм даст соответственные увеличения в 25 и 215 раз, а более сильный инструмент с зеркалом в 250 мм — увеличения в 42 и 360 раз. Полезно в наборе окуляров иметь один-два окуляра, дающих увеличение несколько меньше разрешающего, например $1,0 D$. Равнозрачковое же увеличение можно заменить несколько более сильным (например, вместо $0,167 D$ взять $0,25 D$). При субъективным поле зрения слабейшего окуляра в 40° максимальное действительное поле зрения составит у первого инструмента $1^\circ,6$, а у второго — почти 1° . При окуляре с разрешающим увеличением действительное поле зрения будет у них соответственно около 11 и 7 минут дуги.

При сильных увеличениях видны не только детали изображения, но и мельчайшие искажения, которые вызываются действием атмосферы. Подобно тому как невооруженный глаз не видит «флага» на краю Луны, телескоп при слабом увеличении не вскрывает мелких воздушных течений; при более же сильных увеличениях вместо ожидаемых тонких деталей на поверхности Луны или планеты глаз видит эти течения. Поэтому если атмосферные условия неблагоприятны, изображения светил становятся тем хуже, чем сильнее увеличение. Опытный наблюдатель, приступая к наблюдениям, быстро находит предельное увеличение для данной ночи по изображениям хорошо знакомых «пробных объектов» (например, двойных звезд). Необходимо заметить, что для разных объектов максимальное допустимое увеличение может быть различным; оно устанавливается путем

систематических наблюдений этих объектов при различных атмосферных условиях.

Нужно также отметить, что большое значение имеют не только свойства телескопа, но и свойства глаза. Неправильность формы хрусталика, его неоднородность, дефекты сетчатой оболочки, помутнение сред глаза и наличие в них включений — все это сильно сказывается на различимости деталей. Значительное влияние оказывают также форма наблюдаемого объекта, его яркость, контрасты.

Следует иметь в виду необходимость применения увеличений различной силы для наблюдений звезд и протяженных объектов: при наблюдении звезд, блеск которых практически не ослабевает с возрастанием увеличений, применяются сильные увеличения; для наблюдения слабых протяженных объектов, яркость которых с возрастанием увеличений резко падает, применять сильные увеличения нецелесообразно.

Наконец, необходимо также учесть, что для изучения тонких цветовых оттенков лучше применять умеренные и слабые увеличения.

3. Уход за телескопом

Телескоп необходимо защищать от сырости и пыли посредством чехла, особенно если инструменту предстоит долгое время оставаться без употребления.

Наиболее велика сырость весной, когда температура в помещении зачастую оказывается ниже температуры наружного сырого воздуха, в силу чего в помещении конденсируется влага. В качестве материала для чехла можно посоветовать брезент, просмоленную парусину, клеенку или, лучше всего, пластикат. Резины следует избегать, так как она выделяет сероводород, от которого быстро тускнеет серебряный слой зеркал. Об уходе за серебряным слоем и о мерах его предохранения от влияния вредных газов, содержащихся в воздухе мы уже говорили в главе VII.

В сырые холодные ночи, когда выпадает обильная роса, необходимо принимать особые меры к тому, чтобы защитить от росы главное и вспомогательное зеркала рефлектора. Роса, осевшая на зеркало, чрезвычайно вредна для серебряного слоя. В большинстве случаев запотевание от росы совершенно устраняется, если

главное зеркало телескопа заключено в сплошной трубе длиной в 2—3 диаметра зеркала. Если диагональное зеркало рефлектора установлено достаточно глубоко в сплошной трубе, то оно не запотевает; в противном случае необходима насадка — противоросник. Если инструмент после наблюдений вносится в дом, то, чтобы не было запотевания, необходимо трубу хорошо закрыть и завернуть в чехол, оставив ее в таком виде до тех пор, пока она не согреется.

Все металлические части должны быть хорошо смазаны, лучше всего густой смазкой.

Уход за телескопом состоит главным образом в поддержании его оптических частей в состоянии, обеспечивающем их наилучшую работу. Многие любители думают, что самое главное — как можно чаще чистить линзы. Это не так: при чистке их легко поцарапать, а сеть мелких царапин, как нам уже известно, вредна.

Царапины появляются оттого, что перед протиркой предварительно не снята пыль мягкой кистью. Трогать пальцами поверхности линз или тем более зеркал ни в коем случае нельзя: от пальца остается мутное жирное пятно *), жир окисляется на воздухе и образует кислоты, которые чрезвычайно быстро разъедают серебряный слой и вредно действуют на стекло. Кроме того, на пятно, оставшееся от прикосновения пальца, налипает пыль.

Впрочем, те из читателей, которые имеют опыт в изготовлении оптических поверхностей, не нуждаются в наставлениях по чистке объектива. Оптик (хотя бы и любитель) знает из опыта, сколько вреда может принести одна твердая пылинка, попавшая между полировальником и полируемой стеклянной поверхностью.

Часто грязь образует пятна. Надо попытаться смыть их, несильно нажимая влажным комочком папиросной бумаги, и осторожно протереть сухим комочком. Нужно отличать от грязи красноватые или вообще цветные

*) Жирное пятно со стекла вообще очень трудно стереть: оно размазывается по всей поверхности, о чем хорошо знают люди, носящие очки. Кстати сказать, на стеклах очков можно хорошо видеть результаты неправильного обращения с оптической поверхностью: от постоянного протирания носовым платком стекла покрываются густой сетью мельчайших царапин, которые мешают смотреть при ярком резком свете. Для чистки поверхностей линз лучше всего употреблять смесь петролейного эфира с чистым спиртом или чистый спирт.

пятна, происходящие от выветривания, о которых мы еще будем говорить дальше.

Грязь может накопиться не только на передней поверхности объектива, но и на задней; в старых трубах она почти всегда осаждается и на внутренних поверхностях линз, обращенных друг к другу. Для ее удаления приходится разбирать объектив. Это ответственное дело, требующее большой осторожности. Сборка должна быть произведена очень точно, иначе объектив не будет хорошо работать.

Если после мытья все же обнаруживаются пятна, то их смывают спиртом или, лучше, смесью петролейного эфира со спиртом. Некоторые пятна не поддаются действию спирта; тогда можно вымыть поверхность стекла ватой, смоченной азотной кислотой, разбавленной наполовину водой. После ополаскивания стекло обмывают водой с разбавленным нашатырным спиртом (аммиаком) или слабым раствором едкой щелочи, а затем обязательно обмывают чистой водой. Такая чистка обычно смывает все, кроме пятен от выветривания.

Пятна на поверхности объектива, которые могут появиться вследствие выветривания стекла от старости, лучше всего заметны при рассеянном мягком падающем свете. Они могут быть радужными, но чаще всего бывают красноватыми. Особого вреда эти пятна не причиняют (если не соединяются с помутнением стекла), а могут, как это на первый взгляд ни удивительно, даже способствовать повышению прозрачности линзового объектива. Это настолько интересно, что заслуживает краткого разъяснения. Опытными наблюдателями уже давно было подмечено, что старые, покрытые красноватыми налетами объективы пропускают больше света, чем новые, сверкающие блестящей полировкой. Впоследствии было открыто, что, покрывая оптические поверхности особыми тончайшими пленками, можно почти полностью уничтожать способность стекла отражать лучи, т. е. таким образом значительно уменьшить потери, вызываемые отражением света в линзовых объективах. В настоящее время широко распространена так называемая «просветленная» оптика; она отличается от обычной именно тем, что покрыта такими пленками, ослабляющими отражение света. Просветленную поверхность легко отличить от обычной потому, что она кажется в отраженном свете окрашенной, чаще всего красноватой или лилово-

той. Двухлинзовый объектив (если он не склеенный) теряет вследствие отражения на своих четырех поверхностях около 20% падающего на него света. Поэтому при применении просветленной оптики выигрывается 10—15% света.

Особо надо подчеркнуть, что пленки, покрывающие просветленные поверхности, чрезвычайно нежны и совершенно не выносят самой незначительной, казалось бы, грубости при обращении, например, трения при удалении пыли. Поврежденные места уже не могут быть восстановлены и на просвет выглядят более темными пятнами. Смахивание пыли может производиться только самой мягкой волосной кисточкой типа большой акварельной. Нечего и говорить, что просветленные поверхности линз и зеркал необходимо тщательно оберегать от попадания на них каких-либо липких и едких жидкостей.

Все сказанное выше об обращении с линзами астрономического объектива относится и к линзам окуляра.

4. Астрономический павильон

Если установка телескопа переносная, то необходимости в специальном помещении для него, разумеется, нет. Кроме того, далеко не всегда в городских условиях можно выбрать такое место, откуда видно все небо и где, следовательно, можно было бы установить инструмент постоянно. Если же такое место есть, например, в пригороде или на крыше здания, то многое зависит от наших возможностей. Возникает вопрос о постройке специального павильона. При этом можно предложить самые разнообразные варианты. Они зависят как от характера выбранного места, так и от размеров телескопа и задач, поставленных наблюдателем.

Если телескоп небольшой и место выбрано на лужайке не очень тенистого сада, то можно поступить по примеру участников астрономического кружка Московского планетария. Они соорудили для 200-мм менискового телескопа системы Максутова отодвигающую будку (рис. 112). Она играет роль укрытия для телескопа, когда он не эксплуатируется; перед наблюдениями будка откатывается. Инструмент установлен на массивной, врытой в землю тумбе. Это устройство удобно тем, что можно быстро переводить телескоп с объекта на

объект. На рис. 113 изображен детальный рисунок, из которого можно составить представление о конструктивных особенностях такого укрытия.

Основной каркас будки сварен из стального уголка; каркас дверей — из полосы. Для обшивки применяется стальной лист толщиной 1 мм. Можно, конечно, сделать обшивку из покрашенной масляной краской фанеры. Обшивка прикрепляется к каркасу болтами или заклеп-



Рис. 112. Будка, отодвигающаяся по рельсам. На переднем плане — 200-мм менисковый телескоп Махсутова (астрономическая площадка Московского планетария).

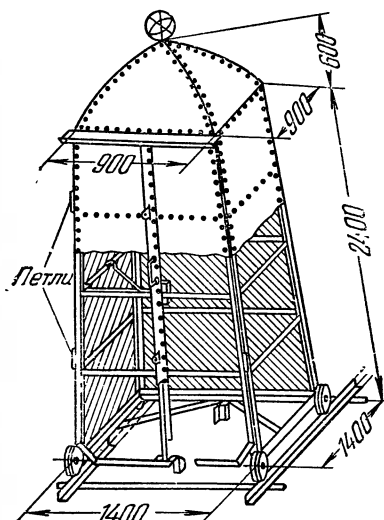


Рис. 113. Устройство каркаса откатной будки, сконструированной Р. И. Цветковым.

ками. Для навески дверей применяются петли. Основание будки надо сделать из более массивного уголка и приварить к нему оси четырех катков. В качестве рельсов можно взять тавровую балочку, уложив ее острой кромкой вверх. Во избежание опрокидывания будки порывами ветра надо предусмотреть крепления основы к рельсам.

Описанная конструкция будки применима к размещению в ней небольшого рефрактора или кассегреновского рефлектора.

Для ньютоновского рефлектора, поскольку его установка ниже, можно сделать такую же будку, но более широкую и менее высокую. При всех достоинствах у этой конструкции есть два недостатка. Порывы ветра делают телескоп неустойчивым, и, кроме того, в зимние ночи наблюдатель будет мерзнуть.

Возможно другое, более примитивное решение. Если можно убирать верхнюю часть телескопа, оставляя лишь основную часть установки, то можно сделать ящик, которым ее прикрывать от непогоды. Однако это нежелательно, так как при съеме рефлектора обязательно будет нарушаться юстировка.

Во многих обсерваториях теперь сооружаются будки с откатной крышей по схеме, изображенной на рис. 114.

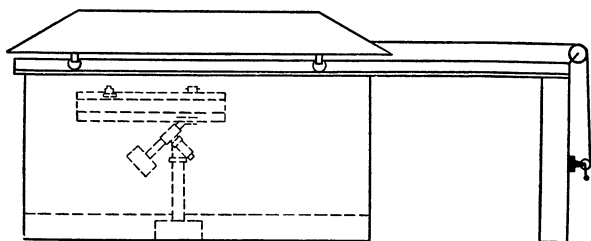


Рис. 114. Будка для телескопа с откатывающейся крышей (схема).

Для 250-мм рефлектора ее размеры будут примерно таковы: длина 3 м, ширина 2 м, высота 1,5 м. Крыша катается на роликах (можно использовать шарикоподшипники) по прочным направляющим, устроенным в виде желобов с плоским дном. Учитывая значительный вес крыши, достигающий (даже при покрытии толем) 100—120 кг, желоба нужно делать достаточно прочными; они должны покоиться на основательных подпорках, чтобы не перекошились. Боковые «козырьки» у крыши должны быть достаточно длинными, чтобы надежно защищать щель между ней и стенами, а сама крыша должна достаточно выдаваться за стены. Разумеется, крыша должна сдвигаться на северную сторону, чтобы она, насколько возможно, меньше мешала наблюдениям. Крыша сдвигается при помощи лебедки, которая также изображена на рис. 114. Более подробное описание лебедки, которая позволяет и откатывать и накатывать крышу, можно найти в книге В. П. Цесевича «Что и как наблюдать на небе» (изд. 4-е, «Наука», 1973).

Такие будки удобны для рефрактора или кассегре-новского рефлектора. Для рефлектора системы Ньютона они менее подходят, так как высокие стены не дают возможности наблюдать объекты, имеющие большие зенитные расстояния.

Наилучшим решением проблемы является сооруже-ние вращающегося купола. В качестве примера можно

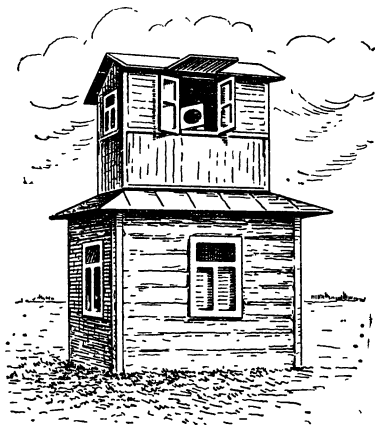


Рис. 115. Любительская обсерватория с вращающимся четырехгранным куполом (построена А. И. Чистяковым, станция Салтыковская, близ Москвы).

привести обсерваторию, построенную собственными руками для самодельного 250-мм рефлектора московским любителем А. И. Чистяковым (рис. 115). Эта обсерватория состоит из бревенчатой нижней части, стоящей на кирпичном фундаменте, и вращающейся четырехгранной верхней части с люком, в которой установлен инструмент на экваториальном штативе немецкого типа.

Главная трудность состоит в изготовлении круглого рельса, по которому должен кататься купол.

Вместе с тем коллективу астрономов-любителей и такая задача посильна. Однако ее практическое решение требует специальных чертежей. В этом могут помочь те разработки проектов народных обсерваторий, которые выполнены коллективом Одесского инженерно-строительного института по заданиям Всесоюзного астрономо-геодезического общества и Общества «Знание».

5. Программы наблюдений

Из всего, что читатель узнал выше, хотя он и будет несколько огорчен открывшимися перед ним трудностями, может почерпнуть и утешение. В крайнем случае он сможет увидеть почти все заинтересовавшее его в научно-популярных описаниях небесных тел. Зеркало диаметром 150 мм и с фокусным расстоянием 1,3—1,5 м откроет ему массу замечательных фактов, о которых он до того только читал.

Солнечные пятна и факелы, ландшафты Луны, явления в системе спутников Юпитера, кольца Сатурна, Марс, фазы Венеры, звездные скопления и туманности, двойные звезды и, наконец, редкие и величественные затмения, когда открывается солнечная корона, — все это можно наблюдать в небольшой любительский телескоп. Хотя бы просто увидав это, мы уже как бы приобщаемся к величайшим успехам человечества, постигающего тайны Вселенной.

Особую привлекательность приобретают наблюдения, если инструмент самодельный. Любитель испытывает большое удовлетворение, когда своими собственными руками, подчас из грубого материала, создает точнейший прибор и ясно понимает во всех деталях, как он действует. А это понимание, как мы уже отмечали, может быть полным только после личной работы над сооружением телескопа.

Рефлектор с объективом диаметром в 150 мм, не говоря уже о 250-мм, принадлежит к сравнительно мощным инструментам; программа работы с ним может быть очень широка.

Любитель, вооруженный таким телескопом, может оказать важные услуги науке, активно участвуя в работе коллектива. Это будет уже настоящая серьезная научная работа, а не простое, хотя и похвальное, удовлетворение любознательности. Работа астрономов-любителей, объединенных во Всесоюзное астрономо-геодезическое общество, имеющее свои отделения в крупнейших городах страны, уже оказывает большую помощь развитию науки.

Многие существенные вопросы астрономии, разработка которых требует массовых наблюдений, по справедливости считаются «любительскими». Таковы в первую очередь наблюдения переменных звезд, метеоров, поиски комет и т. д. Любители, рассеянные по всему необъятному простору нашей великой Родины, могут способствовать выбору мест для будущих астрономических обсерваторий, проводя систематические наблюдения качества изображений. Наконец, любитель, обладающий хорошим телескопом, всегда пробуждает в окружающих интерес к познанию Вселенной и является проводником истинного знания, рассеивающего суеверия и предрассудки и формирующего материалистическое мировоззрение, необходимое для разрешения великих задач строительства коммунизма.

ДОПОЛНЕНИЯ

I. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель этого дополнения состоит в том, чтобы дать любителю, владеющему элементарной математикой, возможность производить расчеты тех оптических систем, которые он уже научился на практике создавать.

1. Основные законы распространения света

В основе геометрической теории телескопических систем лежат два фундаментальных закона, которые хорошо известны из элементарного курса физики, — законы отражения и преломления света.

Оба эти закона можно вывести (мы этого делать не будем) из более фундаментального принципа, который состоит в следующем. Свет распространяется в среде по тому пути, на который он затрачивает минимальное время. Как известно, в вакууме свет распространяется со скоростью c , а в средах с иной скоростью v , которая меньше чем c , и зависит от свойств среды. Поэтому и возникает понятие о коэффициенте преломления, равном отношению скоростей c к v . Он обычно обозначается в оптике символом n .

Закон отражения света гласит: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности и составляют с ней равные углы (рис. 116). Условимся теперь, как выбирать знак угла. Если при измерении угла, составленного лучом с какой-либо «осью» (в данном случае с нормалью), эту ось надо повернуть для совпадения с лучом по часовой стрелке, то угол считается положительным. Если же надо вращать

против часовой стрелки, то угол отрицателен. Из рис. 116 следует, что угол падения $ABN = -i$, а угол отражения $NBC = +i'$. Поэтому закон отражения света надо записать так:

$$i' = -i. \quad (1)$$

Закон преломления света при переходе из среды, имеющей показатель преломления n , в среду с показателем преломления n' , утверждает, что

$$n \sin i = n' \sin i', \quad (2)$$

где i — угол падения, а i' — угол преломления между соответствующими лучами и направлением нормали к

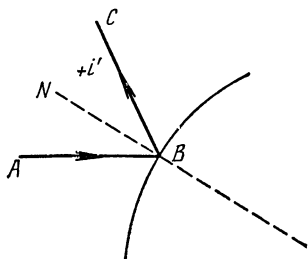


Рис. 116. Закон отражения света.

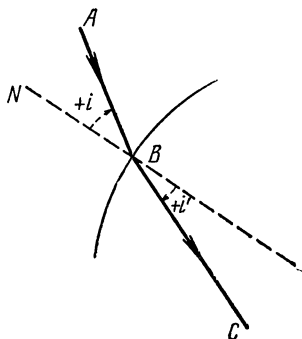


Рис. 117. Закон преломления света.

поверхности раздела сред (рис. 117). Оба луча составляют с нормалью, в соответствии со сформулированным правилом знаков, углы одного и того же знака.

Из этих формул непосредственно вытекает следующее важное правило. Если в формуле (2) заменить n' на $-n$, то она примет вид

$$n \sin i = -n \sin i',$$

Сократив на n и заменив синусы угла, мы получаем формулу (1).

Итак, если в дальнейших расчетах, сделанных для выяснения свойств системы, состоящей из преломляющих поверхностей, заменить n' на $-n$, то те же расчеты будут описывать отражающие поверхности.

2. Главные плоскости и кардинальные точки

При оптических расчетах часто используют так называемые главные плоскости. Рассмотрим двояковыпуклую линзу, образованную двумя сферическими поверхностями (рис. 118). Пусть центры этих ограничивающих линзу поверхностей расположены в точках C и C' . Соединяющая их прямая линия — оптическая ось линзы;

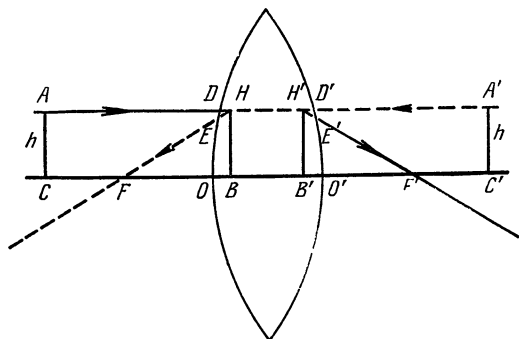


Рис. 118. Главные плоскости двояковыпуклой линзы.

точки, в которых она пересекает поверхности, называются вершинами линзы O и O' . Будем полагать, что свет распространяется слева направо. Тогда пространство, расположенное слева от точки O , мы будем называть «пространством предметов», а расположенное справа от точки O' — «пространством изображений».

Идущий слева луч AD , параллельный оптической оси, пересечет, после преломления, оптическую ось в заднем главном фокусе F' . Это — первая кардинальная точка. Если продолжить лучи AD и $E'F'$ до их пересечения (которое произойдет в данном случае внутри линзы), то мы получим точку H' . Опустив из нее перпендикуляр на оптическую ось, мы получаем отрезок прямой линии $H'B'$ — пересечение задней главной плоскости линзы с плоскостью чертежа, к которой она перпендикулярна. Мы получили также и вторую кардинальную точку B' .

Пропустив на той же «высоте луча» h луч $A'D'$ в обратном направлении из пространства изображений в пространство предметов (из чего мы видим, что эти «пространства» условны), мы получим пересечение преломленного луча с оптической осью — передний главный фокус F . Сделав аналогичное построение лучей и отыскав

их пересечение в точке H , а затем опустив из нее перпендикуляр на оптическую ось, получим линию NB — след передней главной плоскости и точку B . Точки F и B — третья и четвертая кардинальные точки.

Из рисунка видно, что отрезки NB и $N'B'$ равны, что является одним из свойств передней и задней главных плоскостей.

Заметим, что отдельно взятая преломляющая (или отражающая) поверхность имеет также две главные плоскости, но они совпадают друг с другом и проходят перпендикулярно к оптической оси через вершину преломляющей поверхности (рис. 119).

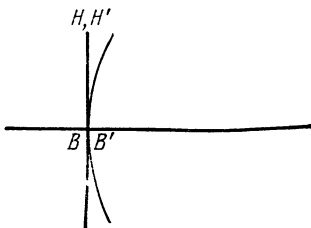


Рис. 119. Главные плоскости одной преломляющей или отражающей свет поверхности. Обе главные плоскости сливаются в одну.

Далее, если рассматривается центрированная система поверхностей, т. е. такая, у которой единая оптическая ось, то каждая из входящих в нее поверхностей имеет свои главные плоскости. Рассматривая ход лучей в такой системе, можно показать, что и вся система, как одно целое, имеет свои две «суммарные» главные плоскости. С этим нам придется встретиться при расчете окуляров и рефлектора Кассегрена.

3. Построение изображений с помощью главных плоскостей

На рис. 120 показано, как с помощью главных плоскостей построить изображение предмета AB . Оно образуется в виде отрезка $A'B'$. Точки оптической оси A и A' называются сопряженными.

Строим луч BK , параллельный оптической оси. Он «проходит» сквозь главные плоскости и из точки K' следует через задний главный фокус F' . Продлеваем его. Затем строим луч BF , который, выйдя из главных плоскостей в точке L' , следует параллельно оптической оси. Продолжение луча $K'F'$ пересекает луч $L'M'$ в точке B' , где и образуется изображение точки B . Опускаем перпендикуляр на оптическую ось $B'A'$. Это и есть перевернутое изображение предмета AB . Оно действительно, его можно принять на экран.

Теперь условимся о принятых в геометрической оптике правилах знаков отрезков. Если отрезок расположен над оптической осью, то он считается положительным. Таков, например, отрезок $AB = l$. Если же отрезок расположен под оптической осью, то его будем считать отрицательным; например, $A'B' = -l'$. Если отрезок расположен на оптической оси направо от точки H' , то его будем считать положительным; таковы $H'F' = +f'$, $F'A' = +x'$ и $L'B' = +a'$. Если же отрезок расположен

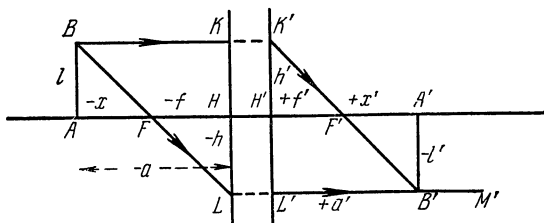


Рис. 120. Построение изображения $A'B'$ предмета AB с помощью главных плоскостей.

левее точки H , то его принято считать отрицательным. Это $AH = -a$, $AF = -x$ и $FH = -f$.

После этого можно вывести некоторые важные формулы. Треугольники $K'H'F'$ и $F'A'B'$ подобны и, следовательно,

$$\frac{h'}{-l'} = \frac{f'}{x'}.$$

Но $h' = l$, и потому

$$\frac{l'}{l} = -\frac{x'}{f'} = V. \quad (3)$$

Входящая сюда величина V , равная отношению абсолютных величин отрезков $A'B'$ и AB , называется линейным (поперечным) увеличением.

Треугольники ABF и FHL подобны и, кроме того, $HL = A'B' = -l'$. Поэтому

$$\frac{-l'}{l} = \frac{-f}{x}$$

или

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = V. \quad (4)$$

Из (3) и (4) находим

$$V = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}. \quad (5)$$

Отсюда выводится формула Ньютона

$$x \cdot x' = f \cdot f'. \quad (6)$$

Далее из рисунка следует, что $x' = a' - f'$ и $x = a - f$, и потому

$$(a' - f')(a - f) = f \cdot f'.$$

Раскрывая скобки, приводя подобные члены и деля на aa' , получаем формулу отрезков

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1. \quad (7)$$

В этом случае, если $f = f'$, формула упрощается:

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f}. \quad (8)$$

Нас интересуют величины a и a' — расстояния сопряженных точек A и A' от главных плоскостей.

Теперь посмотрим, что произойдет с отрезком a' , если мы будем перемещать точку A вдоль оптической оси. Если $a = \infty$, то $a' = f'$, и изображение бесконечно удаленной точки создается в заднем главном фокусе (рис. 121, а).

Если точка A левее точки F , то изображение находится правее точки F' (рис. 121, б). Чем ближе будет подходить точка A к точке F , тем дальше отойдет от точки F' изображение и тем больше будет увеличение V (рис. 121, в). Если точка A совместится с точкой F ,

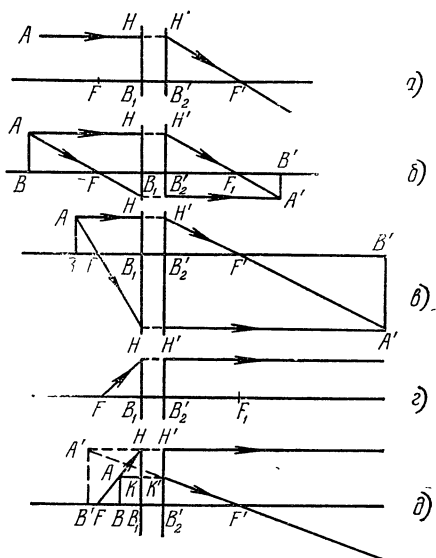


Рис. 121. Построение изображения предмета с помощью главных плоскостей: а — луч $АН$ параллелен оптической оси; изображения нет. б — предмет расположен на конечном расстоянии впереди переднего главного фокуса F ; изображение перевернутое. в — предмет расположен ближе к фокусу, чем в случае б; изображение удаляется от заднего главного фокуса и увеличение растет. г — светящаяся точка находится в переднем главном фокусе F ; выходящий луч параллелен оптической оси. д — предмет расположен между передним главным фокусом и передней главной плоскостью; изображение минимое.

то луч выйдет параллельно оптической оси, так как точка F — передний главный фокус (рис. 121, $г$).

Теперь посмотрим, что произойдет, если точка A будет расположена правее точки F (рис. 121, $д$). Луч FAH после преломления выйдет из точки H' по направлению, параллельному оптической оси. Луч же AK , параллельный оптической оси, по выходе за заднюю главную плоскость пройдет через задний главный фокус по направлению $K'F'$. Этот луч в пространстве изображений с лучом HH' не пересечется!

Это означает, что действительного изображения нет. Вместе с тем продолжения этих лучей пересекаются в пространстве предметов. Таким образом, наблюдатель увидит мнимое изображение предмета $AB—A'B'$.

4. Геометрия параксиальных лучей

Хотя представление о главных плоскостях помогает конструировать оптические системы, его не хватает хотя бы даже для вычисления главных фокусных расстояний такой простой системы, как двояковыпуклая линза, если задана ее толщина и радиусы ограничивающих линзу сферических поверхностей.

Для приближенных расчетов системы, состоящей из центрированных сферических поверхностей, вполне достаточно рассмотрения таких лучей, которые мало отклоняются от оптической оси. Такие лучи мы будем называть параксиальными. Суть состоит в том, что при малых значениях углов мы можем заменять тригонометрические функции синус и тангенс углов значениями самих углов или радиальными их измерениями, т. е. дугами.

Под центрированной системой мы понимаем такую совокупность преломляющих сферических поверхностей, у которых все центры кривизны лежат на одной прямой линии — главной оптической оси.

Рассмотрим ход луча, преломленного одной сферической поверхностью, обладающей радиусом $+r_1$ (рис. 122). Центр этой поверхности поместим в точке C'_1 , а ее вершину в точке O_1 . Луч A_1B_1 преломится и пойдет по направлению $B_1E'_1$. Прямая C'_1N_1 — нормаль к поверхности в точке преломления луча B_1 .

Рассмотрим образующиеся углы, используя высказанное выше правило знаков. Угол $O_1A_1B_1 = -\alpha_1$, угол

падения $N_1B_1A_1 = -i_1$, угол преломления $E'_1B_1C'_1 = -i'_1$, угол $O_1C'_1B_1 = +\varphi_1$ и угол $O_1E'_1B_1 = +\alpha_2$.

По введенному выше правилу знаков отрезков определим следующие длины: $A_1O_1 = -s_1$, $O_1C'_1 = C'_1B_1 = +r_1$, $O_1E'_1 = +s_1$ и $B_1G_1 = +h_1$.

Показатель преломления «пространства предметов» обозначим через n_1 , а «пространства изображений» — через n_2 .

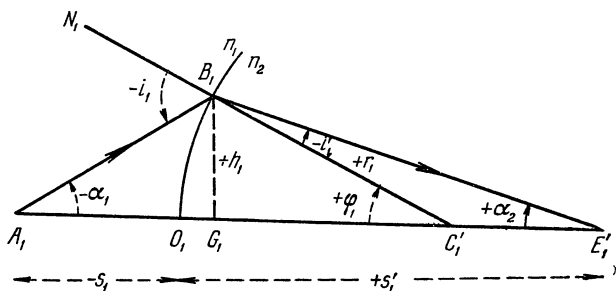


Рис. 122. Описание хода параксиального луча.

По закону преломления света имеем

$$n_1 \sin(-i_1) = n_2 \sin(-i'_1).$$

Если угол α_1 мал, то малы и углы i_1 , i'_1 , φ и α_2 . Можно заменить их синусы и тангенсы углами, так что первое уравнение принимает вид

$$n_1 i_1 = n_2 i'_1. \quad (9)$$

Теперь обратимся к рассмотрению треугольников. Для треугольника $A_1B_1C'_1$ угол $A_1B_1N_1$ внешний. Поэтому

$$\angle A_1B_1N_1 = \angle O_1A_1B_1 + \angle A_1C'_1B_1$$

и $i_1 = \alpha_1 - \varphi_1$, если учесть знаки углов.

Для треугольника $C'_1B_1E'_1$ угол $B_1C'_1O_1$ внешний и потому

$$\angle O_1C'_1B_1 = \angle C'_1B_1E'_1 + \angle C'_1E'_1B_1 \quad \text{или} \quad i'_1 = \alpha_2 - \varphi_1.$$

Отсюда основное уравнение (9) принимает вид

$$n_1 (\alpha_1 - \varphi_1) = n_2 (\alpha_2 - \varphi_1). \quad (10)$$

Далее из прямоугольных треугольников $A_1G_1B_1$ и $B_1G_1E'_1$ следует, что

$$h_1 = (A_1G_1) \operatorname{tg}(-\alpha_1); \quad h_1 = (G_1E'_1) \operatorname{tg}(+\alpha_2).$$

Замечаем, что расстояние O_1G_1 — величина второго порядка малости, и потому можно приближенно принять $A_1G_1 \cong -s_1$; $G_1E'_1 \cong +s'_1$. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \cong \alpha_1 = \frac{h_1}{s_1}; \quad \operatorname{tg}(\alpha_2) \cong \alpha_2 = \frac{h_1}{s'_1}.$$

Из прямоугольного треугольника $G_1C'_1B$ следует, что

$$h_1 = r_1 \sin \varphi_1 \quad \text{или} \quad \varphi_1 = \frac{h_1}{r_1}.$$

Подставляя значения углов в формулу (10) и производя сокращение на h_1 , получаем основную формулу, которая называется формулой Аббе:

$$n_2 \left(\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{r_1} \right) = n_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{r_1} \right). \quad (11)$$

Выведем из нее некоторые следствия.

Если точка A_1 удаляется налево в бесконечность, т. е. если $|s_1| \rightarrow \infty$, то точка E'_1 совмещается с главным задним фокусом поверхности. Поэтому в формуле Аббе надо заменить s'_1 на f'_1 — главное заднее фокусное расстояние. Тогда, переходя в формуле к пределу, получаем $n_2 \left(\frac{1}{f'_1} - \frac{1}{r_1} \right) = n_1 \left(-\frac{1}{r_1} \right)$, так как $\frac{1}{s_1} \rightarrow 0$. Отсюда легко определяется f'_1 :

$$f'_1 = \frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1}. \quad (12)$$

Теперь, если точку E'_1 устремить к бесконечности, так чтобы $s'_1 \rightarrow \infty$ и $\frac{1}{s'_1} \rightarrow 0$, то точка A_1 совместится с передним главным фокусом и $|s_1| = f_1$. Формула Аббе приведется к виду $n_2 \left(-\frac{1}{r_1} \right) = n_1 \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{r_1} \right)$, откуда

$$f_1 = \frac{n_1 r_1}{n_1 - n_2}. \quad (13)$$

Разделив (12) на (13), получим важную формулу:

$$\frac{f'_1}{f_1} = -\frac{n_2}{n_1}. \quad (14)$$

5. «Нулевые» лучи

Теперь мы познакомимся с интересным и полезным упрощением предыдущего вывода.

Мы уже говорили, что одна преломляющая поверхность имеет две, сливающиеся в одну, главные плоскости. Эта слившаяся главная плоскость проходит перпендикулярно к оптической оси через вершину поверхности O_1 (рис. 123).

Отсечем на ней отрезок O_1P_1 и заменим сферическую поверхность главной ее плоскостью. Луч $A_1P_1E'_1$ назовем «нулевым» лучом. Очевидно, такая замена реального

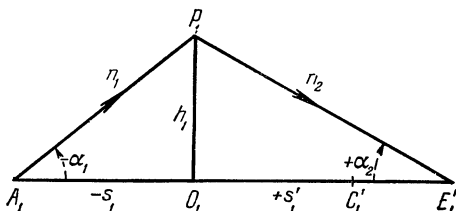


Рис. 123. Схема «нулевого» луча.

луча вполне обоснована, если считать отрезок O_1P_1 малым по сравнению с расстояниями и радиусом преломляющей поверхности. Из прямоугольных треугольников непосредственно следует, что

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{s_1} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{h_1}{s'_1},$$

где под α_1 и α_2 мы можем понимать и тангенсы углов и, если угодно, сами углы.

Используем теперь формулу Аббе

$$n_2 \left(\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{r_1} \right) = n_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{r_1} \right),$$

умножим в ней обе части на h_1 и перейдем к углам:

$$n_2 \left(\alpha_2 - \frac{h_1}{r_1} \right) = n_1 \left(\alpha_1 - \frac{h_1}{r_1} \right).$$

Отсюда определяется величина α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \alpha_1 + h_1 \frac{n_2 - n_1}{n_2 r_1}. \quad (15)$$

Здесь и в дальнейшем важную роль играет величина отрезка h_1 .

Покажем теперь, как вести расчеты нулевого луча в том случае, когда мы имеем две центрированные преломляющие поверхности, главные плоскости которых изображены на рис. 124.

Условимся о знаках, которые надо приписать радиусам этих поверхностей. Если луч встречается выпуклую поверхность, то знак радиуса положительный, а если

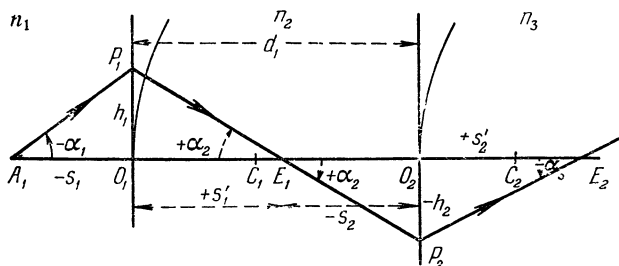


Рис. 124. Объединение двух преломляющих поверхностей в систему.

вогнутую, то отрицательный. Так, например, двояковыпуклая линза имеет радиус первой поверхности «плюс», а второй — «минус». Мениск имеет знаки радиусов обеих поверхностей одинаковые.

На рис. 124 точками C_1 и C_2 обозначены центры поверхностей. Нетрудно видеть, что на нем изображен мениск.

Обозначим расстояние от главной плоскости первой поверхности до главной плоскости второй через d_1 . Знак d_1 положителен, так как этот отрезок расположен справа от точки O_1 . Первая часть нулевого луча — $A_1P_1E_1$. Мы выбрали такое положение, при котором центр первой поверхности расположен левее точки пересечения оптической оси нулевым лучом, как и должно быть. Для вычисления хода нулевого луча справедлива формула (15). Теперь рассмотрим дальнейший ход луча. Он идет под плоскость чертежа: $E_1P_2E_2$.

Если мы хотим рассчитать этот участок пути, то надо обратить внимание на следующие обстоятельства. Во-первых, луч идет из среды с показателем преломления n_2 в среду, показатель преломления которой n_3 . Из точки E_1 он выходит под углом $+\alpha_2$, а в точке E_2 он образует с оптической осью угол $-\alpha_3$. Отрезок же $O_2P_2 = -h_2$.

Выполняя такие же математические выкладки, как в предыдущем случае, мы увидим, что формула (15) сохраняет свой смысл и принимает вид

$$\alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + h_2 \frac{n_3 - n_2}{n_3 r_2}. \quad (16)$$

Это очень важное свойство, так как его можно обобщить на любое число поверхностей для расчета нулевого луча. В самом деле, пусть луч переходит из k -й среды в $(k+1)$ -ю. Тогда углы связаны формулой

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}. \quad (17)$$

Однако мы еще не связали между собой величины отрезков h . Для этого рассмотрим треугольники $O_1 P_1 E_1$ и $E_1 P_2 O_2$, которые подобны. Отсюда получается соотношение

$$\frac{h_1}{s'_1} = \frac{h_2}{s_2}.$$

Но, как видно из чертежа, особенно если учесть знаки отрезков,

$$s'_1 - s_2 = d_1 \quad \text{и} \quad s_2 = s'_1 - d.$$

Подставляя значение s_2 в предыдущую формулу и делая очень простые преобразования, находим

$$h_2 = h_1 - d_1 \alpha_2. \quad (18)$$

По этой формуле вычисляется величина h_2 , если известны h_1 , d_1 и α_2 .

Таким образом, намечается следующий общий путь расчета. Сначала по формуле (15) находим α_2 , затем отыскиваем h_2 по формуле (18) и, наконец, α_3 по формуле (16). Последнюю формулу можно, очевидно, обобщить и на три, четыре и т. д. поверхности. Для $(k+1)$ -й поверхности она имеет вид

$$h_{k+1} = h_k - d_k \alpha_{k+1}. \quad (19)$$

Предположим теперь, что вся оптическая система состоит из m поверхностей, и рассчитаем ход нулевого луча.

Рассмотрим частный случай луча, идущего из пространства предметов параллельно главной оптической

оси на высоте h_1 , для которого $\alpha_1 = 0$. После выхода из m -й поверхности (вершина которой находится в точке O_m) в точке P_m на высоте h_m луч пересечет оптическую ось в точке F_{m+1} под углом α_{m+1} . Точка F_{m+1} — главный задний фокус всей системы, рассматриваемый как одно целое.

Расстояние от точки O_m до F_{m+1} обозначим через s'_F ; оно называется задним фокальным отрезком системы.

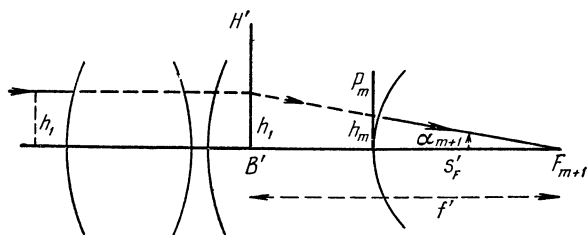


Рис. 125. Ход «нулевого» луча через сложную оптическую систему. К определению эквивалентного фокусного расстояния системы.

Из прямоугольного треугольника (рис. 125) очевидно, что

$$s'_F = \frac{h_m}{\alpha_{m+1}}. \quad (20)$$

Отрезок s'_F — не главное заднее фокальное расстояние системы. Чтобы определить последнее, надо найти положение задней главной фокальной плоскости системы — кардинальную точку B' . Заднее главное фокальное расстояние системы — это отрезок $B'F_{m+1}$; его мы и будем обозначать через f' .

Оказывается, что вся система, рассматриваемая как одно целое, имеет две главные плоскости. Чтобы определить их положение, надо воспользоваться уже упомянутым свойством главных плоскостей: луч, вошедший параллельно оптической оси на высоте h_1 , выходит после пересечения второй (задней) главной плоскости на той же высоте. Поэтому мы продолжим луч $P_m F_{m+1}$ в обратную сторону до его пересечения с продолжением начального луча, где и найдем плоскость H' . Опустив на оптическую ось перпендикуляр, находим кардинальную точку B' . Из подобия прямоугольных треугольников очевидны формулы

$$f' = s'_F \frac{h_1}{h_m} \quad \text{и} \quad f' = \frac{h_1}{\alpha_{m+1}}. \quad (21)$$

Чтобы найти положение передней главной плоскости системы и определить переднее главное фокусное расстояние системы, надо пропустить луч из пространства изображений также параллельно оптической оси и просчитать его путь через систему. Мы на этих расчетах не останавливаемся, так как после всего сказанного читатель сможет сам воспроизвести все выкладки.

6. Двояковыпуклая линза

В качестве примера рассмотрим ход нулевого луча в двояковыпуклой линзе, предполагая, что окружающее ее пространство — воздух, коэффициент преломления которого равен единице. Линза образована пересечением двух сферических поверхностей, у которых центры расположены в точках C_1 и C_2 , а вершины в точках O_1 и O_2 (рис. 126). Оптическая ось — прямая $C_1O_1O_2C_2$.

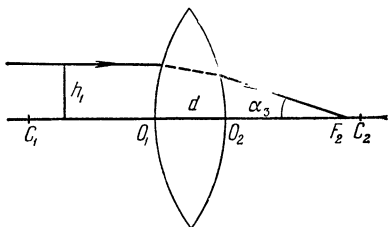


Рис. 126. Ход лучей в двояковыпуклой линзе.

Отрезок $O_1O_2 = d$ — толщина линзы. Показатель преломления материала линзы обозначим через n .

Введем в линзу луч, параллельный оптической оси. Тогда для наших расчетов $n_1 = 1$, $n_2 = n$, $n_3 = 1$. Применим формулу (15), положив в ней $\alpha_1 = 0$:

$$\alpha_2 = h_1 \frac{n-1}{nr_1}.$$

Вычислим h_2 по формуле (19):

$$h_2 = h_1 - d\alpha_2.$$

Из этих двух уравнений находим

$$h_2 = h_1 \left(1 - \frac{d}{r_1} \frac{n-1}{n} \right).$$

Теперь по формуле (17) находим

$$\alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + h_2 \frac{n_3 - n_2}{n_3 r_2} = n\alpha_2 + h_2 \frac{1-n}{r_2}.$$

Подставляя сюда α_2 и h_2 и выполняя элементарные преобразования, получаем формулу

$$\frac{\alpha_3}{h_1} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 \cdot r_2} = \frac{1}{l'}. \quad (22)$$

Она служит для определения заднего главного фокусного расстояния f' по заданным параметрам r_1 , r_2 и d .

Чтобы получить значение переднего главного фокусного расстояния, надо было бы рассчитать путь нулевого луча, идущего на рис. 126 не слева, а справа. Вместо того чтобы делать эти вычисления, воспользуемся формулой (14), в которой заменим f'_1 на f' , f_1 на $+f$, n_2 на $n_3 = 1$ и положим $n_1 = 1$. Тогда

$$\frac{f'}{|f|} = 1. \quad (23)$$

Таким образом, у линзы, находящейся в окружении воздуха, что и имеет место в телескопе, переднее и заднее главные фокусные расстояния одинаковы.

Для тонкой линзы, у которой d много меньше радиусов поверхностей, так что им можно пренебречь, формула (22) упрощается, особенно если ввести понятие об оптической силе линзы

$$\Phi = \frac{1}{f'}. \quad (24)$$

Она принимает вид

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (25)$$

Напомним, что у двояковыпуклой линзы r_1 больше нуля, а r_2 отрицательно.

Из формулы (25) следует, что оптическая сила зависит от показателя преломления n . Он различен для лучей разного цвета, т. е. зависит от длины волны. Из-за этого и возникает хроматическая аберрация. Познакомимся с этим вопросом подробнее.

Пусть радиусы кривизны поверхностей линзы заданы и остаются неизменными. Пусть, далее, мы увеличим показатель преломления на Δn ; тогда и сила линзы изменится и станет равной $\Phi + \Delta\Phi$. Введя эти величины в формулу (25), мы получим

$$\Phi + \Delta\Phi = (n + \Delta n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Вычтя отсюда (25), найдем

$$\Delta\Phi = \Delta n \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Разделим его на формулу (25) почленно; тогда

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta n}{n-1} = \frac{1}{v} \quad \text{и} \quad \Delta\varphi = \frac{\varphi}{v}. \quad (26)$$

Введенный нами параметр v называется коэффициентом дисперсии стекла. Величину v определяют формулой

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (27)$$

где n_D — коэффициент преломления в длине волны спектральной линии натрия D ($\lambda_D = 589,3$ нм), n_F — в длине волны спектральной линии водорода F = H $_{\beta}$ ($\lambda_F = 486,1$ нм) и n_C — в длине волны спектральной линии водорода C = H $_{\alpha}$ ($\lambda_C = 656,3$ нм). Эти величины можно найти в каталогах оптического стекла. Так, например, для оптического стекла К8 мы находим по справочнику следующие характеристики:

$$n_D = 1,51630; \quad n_F - n_C = 0,00806 \quad \text{и} \quad v = 64,1.$$

Таким образом, для линзы, изготовленной из стекла К8, формула (26) дает $\Delta\varphi = \frac{\varphi}{64,1}$.

Рассмотрим теперь два луча различных цветов, исходящих из одной и той же точки, находящейся на расстоянии $|s|$ впереди передней главной плоскости линзы. Поскольку показатель цвета зависит от длины волны, они дадут изображения в разных точках оптической оси. Пусть соответственные отрезки будут равны s'_{λ_1} и s'_{λ_2} .

Используем формулу отрезков (8), положив в ней $a' = s'$ и $a = -s$:

$$\frac{1}{s'_{\lambda_1}} - \frac{1}{|s|} = \frac{1}{f'_{\lambda_1}} = \varphi_{\lambda_1}; \quad \frac{1}{s'_{\lambda_2}} - \frac{1}{|s|} = \frac{1}{f'_{\lambda_2}} = \varphi_{\lambda_2}.$$

Так как $|s|$ в них одинаковы, то

$$\left(\frac{1}{s'_{\lambda_1}} \right) - \left(\frac{1}{s'_{\lambda_2}} \right) = \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2} = \Delta\varphi_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{\bar{\varphi}}{v}. \quad (28)$$

По этой формуле можно рассчитать, как далеко будут отстоять друг от друга на оптической оси изображения различных цветов.

7. Система, состоящая из двух линз

При конструировании телескопа нам часто приходится иметь дело с отдельными элементами, которые состояются из двух линз. Такими являются ахроматизированный объектив и окуляры. Мы облегчим задачу, если будем рассматривать тонкие линзы.

Хотя каждая линза обладает двумя главными плоскостями, мы можем считать, что у тонкой линзы обе плоскости сливаются в одну. В таком случае при расчете системы можно формально использовать рис. 124, хотя теперь, по существу, мы имеем дело с иными образами. В самом деле, теперь у нас две линзы с заданными оптическими силами, разделенные воздушными промежутками.

Введя отрезки s и s' , мы получим согласно формуле Аббе для каждой линзы:

$$\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'_1} = \varphi_1 \quad \text{и} \quad \frac{1}{s'_2} - \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f'_2} = \varphi_2.$$

Из рис. 124 видно, что

$$\frac{h_1}{s_1} = \alpha_1, \quad \frac{h_1}{s'_1} = \alpha_2; \quad \frac{h_2}{s_2} = \alpha_2, \quad \frac{h_2}{s'_2} = \alpha_3.$$

Следовательно, умножив предыдущие формулы на h_1 и h_2 соответственно, мы получим

$$\alpha_2 - \alpha_1 = h_1 \varphi_1; \quad \alpha_3 - \alpha_2 = h_2 \varphi_2.$$

Кроме того, по формуле, связывающей высоты луча, имеем

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d.$$

Тогда

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1 \varphi_1; \quad h_2 = h_1 - \alpha_2 d; \quad \alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \varphi_2.$$

Произведя подстановки и несложные преобразования, найдем

$$\alpha_3 = \alpha_1 + h_1 (\varphi_1 + \varphi_2 - d \varphi_1 \varphi_2) - \alpha_1 d \varphi_2.$$

Теперь примем, что $\alpha_1 = 0$. Тогда $\frac{\alpha_3}{h_1} = \frac{1}{f'_1} = \varphi$, и из последней формулы получим

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d \varphi_1 \varphi_2. \quad (29)$$

8. Окуляр Гюйгенса

Окуляр Гюйгенса состоит из двух линз — полевой и глазной. Они должны быть удалены одна от другой на некоторое расстояние d . Обе линзы могут быть изготовлены из одного сорта стекла. Посмотрим, каким условиям мы должны удовлетворить, чтобы такой окуляр не вносил хроматической аберрации.

Воспользуемся формулой (29). Будем изменять оптические силы составляющих линз. Дадим им приращения. Тогда мы получим суммарное приращение $\Delta\varphi$. Подставляя в формулу (29), находим

$$\varphi + \Delta\varphi = \varphi_1 + \Delta\varphi_1 + \varphi_2 + \Delta\varphi_2 - d(\varphi_1 + \Delta\varphi_1)(\varphi_2 + \Delta\varphi_2).$$

Вычитая отсюда (29), получим

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 - d\varphi_1\Delta\varphi_2 - d\varphi_2\Delta\varphi_1 - d\Delta\varphi_1\Delta\varphi_2.$$

Пренебрегая последним малым членом, получаем

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1(1 - d\varphi_2) + \Delta\varphi_2(1 - d\varphi_1).$$

Теперь мы можем использовать формулу (26) для учета хроматической аберрации; из последней формулы получаем

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{v} - 2 \frac{d}{v} \varphi_1 \cdot \varphi_2. \quad (30)$$

Отсюда очевидно, что если мы хотим, чтобы $\Delta\varphi = 0$, надо выбрать такое значение d_0 , чтобы

$$d_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2\varphi_1 \cdot \varphi_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\varphi_2} + \frac{1}{\varphi_1} \right) = \frac{1}{2} (f'_2 + f'_1). \quad (31)$$

Как мы увидим, этого условия достаточно, чтобы сделать полный расчет окуляра Гюйгенса.

Решим такую задачу. Задано то эквивалентное фокусное расстояние f' , которое мы хотим получить. Кроме него, задан задний фокальный отрезок s'_F , т. е. расстояние от задней главной плоскости глазной линзы для главного фокуса всей системы. Надо узнать главные задние фокусные расстояния обеих линз и нужное расстояние между ними d .

Выведем еще одну вспомогательную формулу. Перепишем формулу (29) в следующем виде:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}.$$

Подставим в нее условие (31) и после элементарных преобразований получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{1}{2} \frac{f'_1 + f'_2}{f'_1 f'_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \right). \quad (32)$$

Отсюда получается

$$\frac{1}{f'_1} = \frac{2}{f'} - \frac{1}{f'_2}. \quad (33)$$

Теперь очевидно, что $f'_2 = f' - s'_F$, где f'_2 известно. Затем по формуле (33) находим f'_1 . И, наконец, по (31) находим d .

Приведем численный пример. Дано $f' = 40$ мм, $s'_F = 12$ мм. Очевидно, что $f'_2 = 28$ мм. Далее,

$$\frac{1}{f'_1} = \frac{2}{40} - \frac{1}{28} = \frac{1}{70}$$

и $f'_1 = 70$ мм, $d = 49$ мм.

Таким образом, мы установили, каковы должны быть составляющие линзы и на каком расстоянии их укрепить.

Подобные формулы дадут возможность рассчитывать окуляры, если известны главные фокусные расстояния имеющихся у нас линз. И такая задача может быть приближенно решена.

9. Телескопические системы

Теперь мы располагаем всеми данными, которые необходимы для выяснения основных свойств телескопических систем. Вспомним, из скольких элементов состоит телескопическая система.

Объектив ахроматического рефрактора составлен из двух линз; окуляр также образован двумя линзами — полевой и глазной. Последняя может в свою очередь состоять из набора линз для лучшего исправления аберраций. Таким образом, в рефракторе не менее четырех линз. У рефлектора линзы объектива заменены зеркалами: у ньютоновского — главным вогнутым и диагональным плоским, у кассегреновского рефлектора главное вогнутое параболическое зеркало дополняется вто-

ричным гиперболическим. Таким образом, и у рефлектора не меньше четырех компонент.

Мы имеем право при рассмотрении хода лучей по мере надобности объединять совокупность отдельных элементов в подсистему и заменять последнюю ее общими главными плоскостями.

Таким образом, рефрактор схематически изображается двумя парами главных плоскостей — плоскостями объектива $H_1H'_1$ и плоскостями окуляра $H_2H'_2$ (рис. 127).

У главного зеркала рефлектора, как у одной поверхности, обе главные плоскости H_1 и H'_2 сливаются в одну плоскость, перпендикулярную к оптической оси и проходящую через вершину зеркала. В касегреновском выпуклом вторичном зеркале главная плоскость тоже одна: слияние двух плоскостей.

Мы ограничимся здесь рассмотрением хода лучей в рефракторе. Наши рассуждения легко обобщить и на рефлектор.

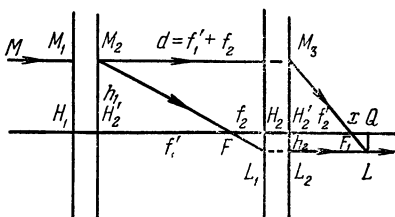


Рис. 127. Ход луча в телескопической системе.

При нормальной работе телескопической системы расстановка двух подсистем такова, что задний главный фокус объектива совмещен с передним главным фокусом окуляра. Таким образом, телескопическая система преобразует входящий в нее пучок параллельных лучей в более «сжатый» пучок также параллельных лучей. Поэтому она, рассматриваемая как одно целое, является афокальной системой, т. е. не имеющей главного фокуса.

Упомянутое совмещение фокусов приводит к тому, что расстояние между главными плоскостями H'_1 и H_2 равно

$$d = f'_1 + f_2. \quad (3-1)$$

Если на пути входящих в систему лучей нет диафрагмы, то входным зрачком системы является сам объектив и его радиус h_1 — высота крайнего луча MM_1 . Преломленный луч M_2L_1 выйдет из системы в направлении L_2L на высоте h_2 .

Определим теперь положение выходного зрачка системы. Он располагается в том месте, где подсистема окуляра (плоскости H_2, H'_2) образует изображение

входного зрачка, т. е. объектива. Рассмотрим треугольники $M_3H'_2F'$ и $F'QL$. Из них следует, что

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{x}{f'_2}. \quad (35)$$

Далее из треугольников $M_2H'_1F$ и FH_2L_1 получаем

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{f_2}{f'_1}. \quad (36)$$

Объединяя и преобразуя (35) и (36), находим

$$\frac{x}{f'_2} = \frac{f_2}{f'_1} \quad \text{или} \quad x = \frac{f_2^2}{f_1} \quad \text{и} \quad h_2 = \frac{x h_1}{f_2} = \frac{f_2}{f_1} h_1, \quad (37)$$

так как $f'_1 = f_1$ и $f'_2 = f_2$.

По этим формулам рассчитываются: во-первых, то расстояние x , на котором надо поместить глаз за главным фокусом окуляра для того, чтобы все лучи вошли в него, и, во-вторых, допустимый размер полевой линзы окуляра. В самом деле, если радиус полевой линзы h_2^* будет меньше чем вычисленное значение h_2 , то будет работать только центральная часть объектива.

Далее, очевидно, что от размеров выходного зрачка будет зависеть и эффективность телескопа. Если диаметр выходного зрачка будет больше диаметра зрачка глаза, то сам глаз наблюдателя (если проследить «обратный» ход лучей) будет диафрагмировать объектив и будут использованы не все полезные, собранные объективом лучи.

10. Свойства конических сечений

В теории и практике телескопостроения особую роль играют конические сечения — окружность, эллипс, парабола и гипербола. Для выполнения ряда расчетов надо подробнее ознакомиться с их свойствами. Свойства окружности читателю хорошо известны, поэтому мы на них останавливаться не будем.

Рассмотрим прежде всего свойства эллипса. Это симметричная относительно двух взаимно перпендикулярных главных осей вытянутая фигура. Обозначим большую ось эллипса через $2a$. Пересечение главных осей — центр эллипса. На большой оси эллипса существуют две

точки F_1 и F_2 (рис. 128), которые называются фокусами. Они отстоят от центра эллипса на расстояние, равное c ; отношение $c/a = e$ — эксцентриситет эллипса — характеризует его вытянутость. Очевидно, что e заключен в

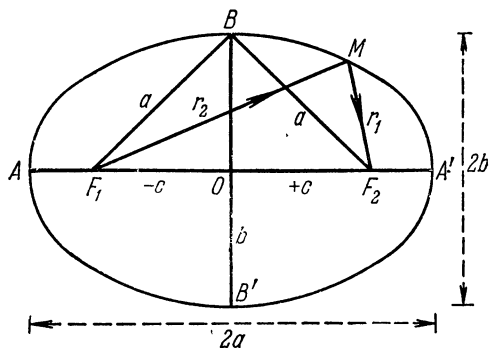


Рис. 128. Геометрические свойства эллипса.

пределах от нуля до единицы. При $e = 0$ эллипс превращается в окружность.

Основное свойство эллипса таково: если точка M находится на эллипсе и r_1 и r_2 — ее расстояния от фокусов, то $r_1 + r_2 = 2a$ — большой оси эллипса.

Эллипс имеет четыре вершины: A , A' , B и B' . Отрезок $OB = OB'$ — малая полуось эллипса, которую обозначим через b .

Вследствие симметрии эллипса очевидно его следующее свойство:

$$(OF_1)^2 = (BF_1)^2 - (OB)^2$$

или

$$c^2 = a^2 - b^2.$$

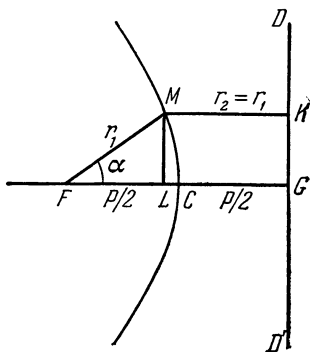


Рис. 129. Геометрические свойства параболы.

Парабола обладает другими свойствами. Это разомкнутая бесконечная кривая линия. Она симметрична относительно оси, которая проходит через ее вершину C . У нее есть точка фокуса F , лежащая на оси симметрии на расстоянии $p/2$ от вершины (рис. 129). Перпендикулярно к оси симметрии параболы проходит особая прямая линия DD' — ее директриса.

Основное свойство директрисы состоит в следующем. Расстояние любой точки M , лежащей на параболе, от фокуса F равно расстоянию этой точки от директрисы: $r_1 = r_2$. Эксцентриситет параболы e равен единице.

Выведем так называемое полярное уравнение параболы. Расположим начало координат в ее фокусе. Ось симметрии примем за начальную для отсчета углов α . Опустим перпендикуляр MK из точки M на директрису. По условию $MF = MK = r_1 = r_2$.

Опустим из точки M перпендикуляр ML на ось симметрии. Тогда $FG = FL + LG$ или $r_1 \cos \alpha + r_2 = p$. Но $r_1 = r_2$, и потому

$$r_1 = \frac{p}{1 + \cos \alpha}. \quad (38)$$

Если $\alpha = 0$, то $(r_1)_0 = \frac{p}{2}$. Здесь расположится вершина зеркала. Следовательно, фокусное расстояние параболического зеркала $f_1 = p/2$ и $p = 2f_1$, так что уравнение меридионального сечения зеркала имеет вид

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \alpha}. \quad (39)$$

Проследим за ходом кривой при изменении угла α . Положим $\alpha = 90^\circ$; тогда из уравнения (38) получаем

$r_1 = p$. При $\alpha = 180^\circ$ знаменатель обращается в нуль и r_1 стремится к бесконечности.

Так как $\cos(-\alpha) = \cos(+\alpha)$, то парабола симметрична относительно прямой FG .

Третья кривая, которая будет нас интересовать, — гипербола. Подобно параболе она является бесконечной кривой линией, но, в отличие от нее, состоит из двух

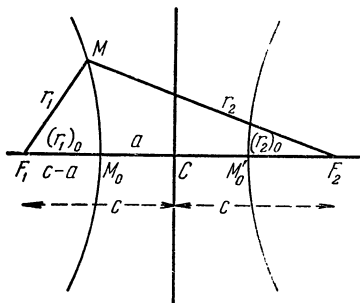


Рис. 130. Геометрические свойства гиперболы.

ветвей (рис. 130). Гипербола симметрична относительно двух главных осей. При этом она одну из них пересекает; эта ось называется вещественной. Вторую ось она не пересекает — эта ось мнимая. У гиперболы есть две точки фокусов F_1 и F_2 . Точка C — центр гиперболы.

Возьмем на гиперболе точку M и обозначим $MF_1 = r_1$, а $MF_2 = r_2$. Тогда основное свойство гиперболы выражается формулой $r_2 - r_1 = 2a$, где a — постоянная величина. Ее легко отыскать на рисунке. Для этого рассмотрим точку M_0 , находящуюся в одной из вершин гиперболы. Соответствующие ее расстояния от фокусов обозначим через $(r_1)_0$ и $(r_2)_0$. По определению,

$$(r_2)_0 - (r_1)_0 = 2a.$$

Вследствие симметрии обеих ветвей гиперболы эта разность равна расстоянию между M_0 и M'_0 , т. е. двум отрезкам CM_0 . Итак, $CM_0 = a$ — вещественная полуось гиперболы.

Обозначим расстояние между фокусами F_1F_2 через $2c$; оно больше чем $2a$. Отношение $c/a = e$, больше единицы, — эксцентриситет гиперболы.

В дальнейшем нам понадобятся некоторые величины. Из определений очевидно, что $(r_1)_0 = c - a$ и $M_0F_2 = c + a$. Если эти кривые вращать вокруг оси симметрии, то получаются поверхности: у окружности сфера, у эллипса эллипсоид вращения, у параболы параболоид и у гиперболы гиперболоид. В таком случае сами кривые суть меридиональные сечения этих поверхностей.

11. Оптические свойства эллипсоида

Можно дать простое и наглядное истолкование одному из свойств эллипсоидальной поверхности, если вспомнить, что при своем распространении свет избирает путь, требующий затрат наименьшего времени. Пусть источник света находится в фокусе эллипсоида вращения с отражающей поверхностью. Расходящиеся от этого источника лучи должны отражаться от вогнутой поверхности. Где они соберутся? Так как $r_1 + r_2 = 2a$ — постоянная величина, то все они соберутся во втором фокусе этого же эллипсоида.

Таким образом, поверхность эллипсоида превращает расходящуюся из фокуса сферическую световую волну в сферическую же волну, но сходящуюся во втором фокусе. Вот почему в телескопе Грегори устанавливается зафокальное эллипсоидальное зеркало. Вогнутая поверхность эллипсоида вращения создает во втором фокусе точечное изображение точечного источника света, находящегося в первом фокусе.

12. Оптические свойства параболоида вращения

Пусть на поверхность параболоида падает плоская световая волна в направлении, совпадающем с его осью симметрии. Если бы она не встречала отражающей вогнутой поверхности, то она достигла бы директрисы. Но на пути света стоит отражающая поверхность и за то

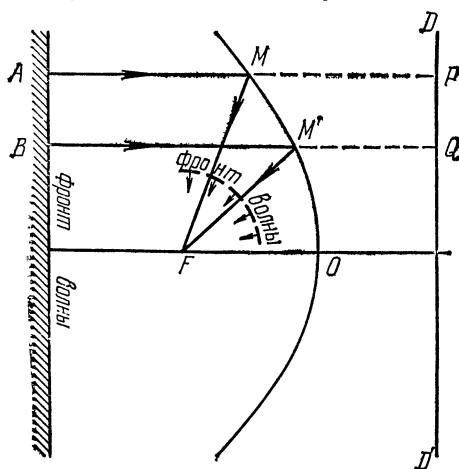


Рис. 131. Преобразование плоского фронта волны в сферическую волну, сходящуюся в точку фокуса, параболической поверхностью.

время, за которое луч AM дошел бы до точки P , он, отразившись от параболической поверхности, достигнет точки F ($MP = MF$) (рис. 131). Точно так же и луч BM' после отражения придет одновременно с первым лучом в ту же точку F , так как $M'Q = M'F$. Вот почему параболическое зеркало собирает все лучи, параллельные оси симметрии, в точке фокуса, где и образуется точечное

изображение бесконечно удаленного точечного источника света, испускающего практически плоскую световую волну. Иными словами, параболическое зеркало превращает плоскую волну в сходящуюся к точке F сферическую волну.

13. Оптические свойства гиперboloида

Пусть теперь в пространстве распространяется сходящаяся в точку F_1 сферическая световая волна (рис. 132). Поставим следующую задачу: найти такую поверхность, которая преобразовала бы эту волну в сферическую волну, сходящуюся в заданную точку F_2 .

Рассмотрим луч MF_1 . Пусть он встретит в точке N отражающий элемент; потребуем, чтобы отраженный луч пришел в точку F_2 . Обозначим $MN = u$; $NF_2 = r_2$. Тогда путь луча будет $u + r_2$.

Мы хотим, чтобы все лучи, исходящие с поверхности этой сферы (т. е., например, и луч M'), пришли в точку F_2 одновременно. Но для этого необходимо, чтобы путь любого луча от сферы был равен одной и той же постоянной величине: $u + r_2$. Обозначим $NF_1 = r_1$. Очевидно, что радиус сферы (для всех точек M, M', \dots) одинаков и равен

$$R = u + r_1.$$

Вычитая равенства, находим

$$r_2 - r_1 = \text{постоянной} - R = C,$$

где C — постоянная величина.

Но ведь это условие гиперболической выпуклой поверхности, причем точка F_2 — ее второй фокус, если F_1 была первым фокусом.

Итак, для решения задачи надо поставить на пути лучей выпуклое гиперболическое зеркало! Именно этот принцип и использован в телескопе Кассегрена. Сочетание параболического вогнутого зеркала с гиперболическим выпуклым решает задачу, при этом с весьма интересными и важными последствиями.

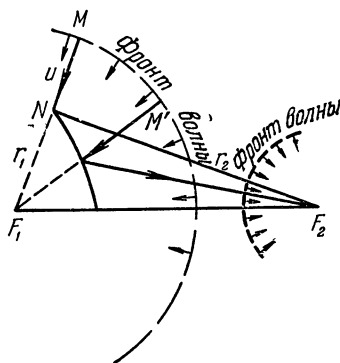


Рис. 132. Оптические свойства выпуклого гипербоида.

14. Расчет рефлектора Кассегрена

В основном параболическом зеркале рефлектора Кассегрена, имеющем диаметр D_1 и фокусное расстояние f_1 , высверливается в центре отверстие для вывода лучей из системы на расстояние δ (рис. 133). Величина отрезка $\delta = OF_2$ выбирается по желанию конструктора; она должна обеспечить удобную установку окуляра, фотографической пластинки или какого-либо иного прибора. Особенно большой вынос изображения нежелателен.

Между параболическим зеркалом и его главным фокусом устанавливается выпуклое гиперболическое зеркало, имеющее диаметр D_2 . Оно заслоняет от прямых лучей центральную часть главного параболического зеркала, чем несколько уменьшает светосилу инструмента, но с этим приходится мириться. Отношение $D_2/D_1 = \eta$,

играющее большую роль в теории рефлектора, называется коэффициентом экранирования.

На рис. 133 прослежен ход крайнего луча, у которого $h_1 = D_1/2$. Если бы не было отражения от гиперболического зеркала, которое происходит в точке N , то луч пришел бы в фокус, в точку F_1 . Но он отражается на высоте $h_2 = D_2/2$ и приходит во второй фокус, в точку F_2 , где и образуется изображение точечного источника света — звезды.

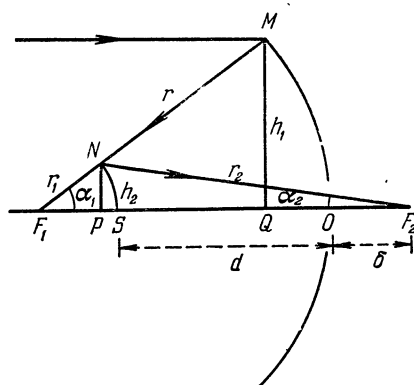


Рис. 133. К расчету рефлектора Кассегрена. Ход крайнего внешнего луча.

Поскольку F_1 и F_2 — фокусы гиперболы, то расстояние между ними $F_1F_2 = 2c$. Расстояние $OF_1 = f_1$ — фокусное расстояние параболического зеркала; отрезок $OF_2 = \delta$ равен «выносу» изображения. Таким образом, мы имеем

$$2c = f_1 + \delta. \quad (40)$$

Из рис. 133 очевидно, что

$$MQ = h_1 = \frac{D_1}{2}, \quad NP = h_2 = \frac{D_2}{2} \quad \text{и} \quad \frac{h_2}{h_1} = \eta. \quad (41)$$

Из подобия треугольников F_1MQ и F_1NP следует

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{r_1}{r} = \eta \quad \text{или} \quad r_1 = r\eta. \quad (42)$$

Величина r зависит от угла α_1 , как это видно из полярного уравнения параболы (39):

$$r = \frac{2f_1}{1 + \cos \alpha_1}.$$

Из треугольника F_1MQ находим

$$h_1 = r \sin \alpha_1 = \frac{2f_1 \sin \alpha_1}{1 + \cos \alpha_1} = \frac{2f_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} \cos \frac{\alpha_1}{2}}{\cos^2 \frac{\alpha_1}{2}} = 2f_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2},$$

и так как $h_1 = D_1/2$, то

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} = \frac{D_1}{4f_1}. \quad (43)$$

По этой формуле определяется α_1 .

Обозначим теперь отрезок NF_2 через r_2 . Из треугольника F_1NP находим

$$h_2 = r_1 \sin \alpha_1 \quad \text{или} \quad r_1 = \frac{h_2}{\sin \alpha_1}.$$

Из треугольника NPF_2 следует, что

$$h_2 = r_2 \sin \alpha_2 \quad \text{или} \quad r_2 = \frac{h_2}{\sin \alpha_2}.$$

По основному свойству гиперболы $r_2 - r_1 = 2a$ сразу же находим уравнение

$$a = \frac{D_2}{4} \left(\frac{1}{\sin \alpha_2} - \frac{1}{\sin \alpha_1} \right). \quad (44)$$

Для использования этой формулы надо предварительно определить величину угла α_2 . Из треугольника NPF_2 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{h_2}{PF_2}.$$

Отрезок PF_2 равен разности отрезков $F_1F_2 = 2c$ и $PF_1 = r_1 \cos \alpha_1$. Таким образом,

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{h_2}{2c - r_1 \cos \alpha_1}. \quad (45)$$

По этой формуле находим α_2 , и тогда формула (44) позволяет вычислить значение вещественной полуоси гиперболы a . Мнимая полуось ее b вычисляется по формуле

$$b = \sqrt{c^2 - a^2}. \quad (46)$$

Теперь надо вычислить эквивалентное главное фокусное расстояние всей системы, состоящей из двух зеркал. Это можно сделать, используя формулу (21):

$$f = \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}.$$

Для правильной установки гиперболического зеркала надо знать расстояние между вершинами зеркал d . Оно равно разности отрезков $F_1O = f_1$ и F_1S . Последний же

равен разности половины расстояний между фокусами и вещественной полуоси гиперболы, т. е. $F_1S = c - a$, так что

$$d = f_1 + a - c. \quad (47)$$

Определим теперь так называемую стрелу кривизны зеркала (PS). Соединим края гиперболического зеркала прямой линией, которая перпендикулярна к оптической оси. Расстояние от вершины зеркала до этой прямой и есть стрела кривизны. Она равна разности отрезка $F_1S = c - a$ и отрезка $r_1 \cos \alpha_1$:

$$x = c - a - r_1 \cos \alpha_1. \quad (48)$$

Значительный интерес представляет также радиус кривизны гиперболического зеркала. Он зависит от угла α . Приведем формулу, служащую для вычисления радиуса кривизны, без вывода, который требует применения высшей математики:

$$R = \frac{b^2}{a} \frac{(1 + 2e \cos \alpha + e^2)^{3/2}}{(1 + e \cos \alpha)^3}, \quad (49)$$

где применены обозначения

$$b^2 = c^2 - a^2, \quad e = \frac{c}{a}.$$

Очевидно, что при $\alpha = 0$, т. е. в точке вершины зеркала, $\cos \alpha = 1$, и мы получаем

$$R_0 = \frac{b^2}{a}. \quad (50)$$

Итак, формулу (49) можно для гиперболы переписать так:

$$R = R_0 \left(\frac{\sqrt{1 + 2e \cos \alpha + e^2}}{1 + e \cos \alpha} \right)^3. \quad (51)$$

Для края зеркала $\alpha = \alpha_1$ и

$$R_1 = R_0 \left(\frac{\sqrt{1 + 2e \cos \alpha_1 + e^2}}{1 + e \cos \alpha_1} \right)^3. \quad (52)$$

Следует заметить, что формулу для параболы можно получить, положив $e = 1$.

Однако расчеты еще не окончены. Для предохранения от рассеянного света в телескопе Кассегрена устанавливается еще защитная полая цилиндрическая трубка OK

длины l_k и радиуса h_k (рис. 134), которая укрепляется внутри системы через отверстие в главном зеркале; l_k и h_k надо вычислить.

Для этого проведем крайний внутренний луч $N'M'$, параллельный оптической оси. Им ограничена затемненная часть параболического зеркала. Проведем также луч NF_2 , отраженный от внешнего края гиперболического зеркала. Их точка пересечения T и есть то место, где должен находиться край защитной бленды. Необходимо вывести два уравнения, которые связывают l_k и h_k .

Из подобных прямоугольных треугольников NPF_2 и TKF_2 найдем пропорцию

$$\frac{h_k}{h_2} = \frac{l_k + \delta}{2c - r_1 \cos \alpha_1}. \quad (53)$$

Рис. 134. К расчету рефлектора Кассегрена. Ход крайнего внутреннего луча.

Далее из прямоугольного треугольника $F_1M'V$ находим

$$(M'V) = (F_1M') \sin \alpha_k \quad \text{или} \quad h_2 = r_k \sin \alpha_k.$$

Но из уравнения параболы можно определить радиус-вектор r_k :

$$r_k = \frac{2f_1}{1 + \cos \alpha_k}.$$

Подставляя его значение в предыдущее соотношение и выполняя преобразования, найдем

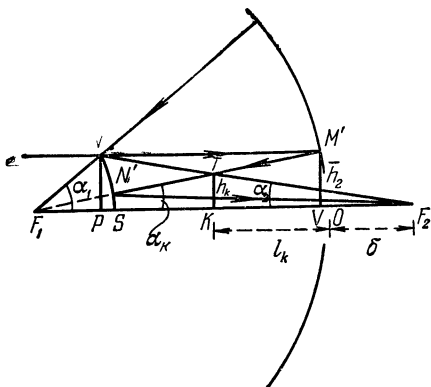
$$h_2 = \frac{2f_1 \sin \alpha_k}{1 + \cos \alpha_k} = 2f_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} = \frac{h_2}{2f_1}.$$

Далее из прямоугольного треугольника F_1TK следует

$$(TK) = (F_1K) \operatorname{tg} \alpha_k \quad \text{или} \quad h_k = (2c - l_k - \delta) \operatorname{tg} \alpha_k. \quad (54)$$



Произведя элементарные преобразования, получаем два уравнения:

$$(2c - r_1 \cos \alpha_1) h_k - h_2 l_k = h_2 \delta, \quad (55)$$

$$h_k + l_k \operatorname{tg} \alpha_k = (2c - \delta) \operatorname{tg} \alpha_k. \quad (56)$$

Решая эти уравнения относительно l_k и h_k , мы получаем данные о защитной бленде — ее длину и внутренний диаметр.

Приводим подробный пример расчетов для $\eta = 0,30$.

Схема вычислений параметров малого зеркала:

Заданы $D_1=250$ мм, $f_1=1250$ мм, $\frac{f_1}{D_1}=5$, $\delta=100$ мм, $\eta=D_2/D_1=$
 $=0,30$.

$$1) 2c = f_1 + \delta = 1350,$$

$$2) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_1}{2} \right) = \frac{D_1}{4f_1} = 0,05,$$

$$3) \frac{\alpha_1}{2} = 2^\circ,8624,$$

$$4) \alpha_1 = 5^\circ,7248,$$

$$5) \cos \alpha_1 = 0,995012,$$

$$6) \operatorname{cosec} \alpha_1 = 10,0250,$$

$$7) r = \frac{2f_1}{1 + \cos \alpha} = 1253,125,$$

$$8) r_1 = r\eta = 375,938,$$

$$9) \cos \alpha_1 = 0,995012,$$

$$10) 2c = 1350,$$

$$11) r_1 \cos \alpha_1 = 374,063,$$

$$12) 2c - r_1 \cos \alpha_1 = 975,937,$$

$$13) h_2 = h_1 \eta = \frac{D_1}{2} \eta = 37,50,$$

$$14) \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{h_2}{2c - r_1 \cos \alpha_1} = 0,038425,$$

$$15) \alpha_2 = 2^\circ,20051,$$

$$16) \operatorname{cosec} \alpha_2 = 26,0440,$$

$$17) \operatorname{cosec} \alpha_1 = 10,0250,$$

$$18) (\operatorname{cosec} \alpha_2 - \operatorname{cosec} \alpha_1) = 16,0190,$$

$$19) \frac{h_2}{2} = 18,75,$$

$$20) a = \frac{h_2}{2} (\operatorname{cosec} \alpha_2 - \operatorname{cosec} \alpha_1) = 300,36,$$

$$21) c = 675,$$

$$22) c - a = 374,64,$$

$$23) f_1 = 1250,$$

- 24) $d = f_1 - (c - a) = 875,36,$
- 25) $c^2 = 455\,625,$
- 26) $a^2 = 90\,216,$
- 27) $b^2 = c^2 - a^2 = 365\,409,$
- 28) $R_0 = \frac{c^2 - a^2}{a} = 1216,57,$
- 29) $h_1 = \frac{D_1}{2} = 125,$
- 30) $\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,038425,$
- 31) $f = \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = 3253,$
- 32) $f/D_1 = 13,01,$
- 33) $c = 675,$
- 34) $a = 300,36,$
- 35) $e = c/a = 2,24730,$
- 36) $\cos \alpha_1 = 0,995012,$
- 37) $e \cos \alpha_1 = 2,23609,$
- 38) $e^2 = 5,05036,$
- 39) $2e \cos \alpha_1 = 4,47218,$
- 40) $1 + e^2 + 2e \cos \alpha_1 = 10,52254,$
- 41) $\sqrt{1 + e^2 + 2e \cos \alpha_1} = 3,24385,$
- 42) $1 + e \cos \alpha_1 = 3,23609,$
- 43) Отношение 41 к 42 = 1,00240,
- 44) Отношение в кубе = 1,00722,
- 45) $R_0 = 1216,57,$
- 46) $R_1 = 1225,35,$
- 47) $x = c - a - r_1 \cos \alpha_1 = 0,58 \text{ мм}.$

Итак, в результате этих 47 операций найдены следующие характеристики вторичного зеркала и системы:

диаметр вторичного зеркала (операция 13) $D_2 = 2h_2 = 75 \text{ мм},$
 радиус кривизны вторичного зеркала вблизи вершины (операция 28) $R_0 = 1216,57 \text{ мм},$
 радиус кривизны вторичного зеркала у края (операция 46) $R_1 = 1225,35 \text{ мм},$
 стрела кривизны вторичного зеркала (операция 47) $x = 0,58 \text{ мм},$
 расстояние между вершинами зеркал (операция 24) $d = 875,36 \text{ мм}.$

Теперь приступим к расчету бленды. Вначале надо определить коэффициенты уравнений (55) и (56):

- 48) $h_2 = 37,5,$
- 49) $2f_1 = 2500,$
- 50) $\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_k}{2} \right) = \frac{h_2}{2f_1} = 0,01500,$
- 51) $\frac{\alpha_k}{2} = 0^\circ,85937,$

- 52) $\alpha_k = 1^\circ,71874$,
 53) $\operatorname{tg} \alpha_k = 0,030007$,
 54) $2c - \delta = 1250$,
 55) $(2c - \delta) \operatorname{tg} \alpha_k = 37,5088$,
 56) $2c - r_1 \cos \alpha_1 = 975,937$,
 57) $h_2 \delta = 3750$.

Напишем уравнения

$$975,937 h_k - 37,5 l_k = 3750,$$

$$h_k + 0,030007 l_k = 37,5088.$$

Их решение дает

$$l_k = 491,97 \text{ мм}; \quad h_k = 22,75 \text{ мм}.$$

Подобные расчеты сделаны нами для нескольких значений η . Результаты приведены в следующей таблице:

Характеристики нескольких систем рефлектора Кассегрена

η	0,2	0,25	0,3	0,35
D_1 , мм	250	250	250	250
f_1 , мм	1250	1250	1250	1250
f_1/D_1	5	5	5	5
δ , мм	100	100	100	100
α_1	$5^\circ,7248$	$5^\circ,7248$	$5^\circ,7248$	$5^\circ,7248$
D_2 , мм	50,0	62,5	75,0	87,5
x , мм	0,47	0,54	0,58	0,56
R_0 , мм	646,53	893,33	1216,57	1676,03
R_1 , мм	650,18	899,02	1225,35	1689,86
d , мм	1000,15	937,74	875,36	813,04
f , мм	550,3	4153	3253	2610
f/D_1	22,01	16,61	13,01	10,44
l_k , мм	532,1	512,6	492,0	470,15
h_k , мм	14,4	18,4	22,8	27,3
Δn	0,045	0,070	0,102	0,142

Из этой таблицы вытекают следующие заключения:

1. «Ключевым» параметром оптической системы мы можем считать величину η или, если угодно, f/D_1 . Все остальные параметры определяются через нее.

2. При одном и том же главном зеркале можно получить самые разнообразные значения отношения f/D_1 . Для этого надо менять гиперболические зеркала.

3. Потери света от экранирования Δm , которые определяются формулой (ее легко вывести)

$$\Delta m = 2,5 \lg \left(\frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2} \right) = 2,5 \lg (1 - \eta^2),$$

невелики.

При выводе всех формул мы сделали следующие ограничивающие предположения: входящие в систему лучи идут от бесконечно удаленного точечного источника (звезды) параллельно общей оси симметрии системы (оптической оси). Поэтому изображение и создавалось в точке главного эквивалентного фокуса системы.

Что произойдет, если мы отступим от центра поля зрения в сторону, скажем, на расстояние, равное y ? Оказывается, что и здесь будут образовываться изображения, в той же фокальной плоскости, но несколько искаженные. Эти искажения сравнительно малы на небольшом участке, прилегающем к центру поля зрения. Чтобы в этих соседних точках в образовании изображения участвовали полные поверхности зеркал, необходимо несколько увеличить диаметр гиперболического зеркала. Приведем без вывода формулу для вычисления этого диаметра:

$$D_2 = \frac{(D_1 - 2y)(d + \delta)}{f} + 2y.$$

Для наших случаев мы получаем следующие числа: $D_2 = 90, 100, 110$ и 120 мм, если отойти от центра поля зрения на $y = 50$ мм. Конечно, потери света в данном случае будут большими, но будет обеспечено довольно значительное поле зрения.

15. Дифракционные явления

В главе I было сказано довольно много о дифракционной картине, возникающей в телескопической системе. Они вызваны волновой природой света и действием объектива, который «вырезает» из падающей волны ограниченный участок. Еще в то время, когда создавалась волновая теория света, вызвавшая оживленные и даже ожесточенные споры, указывалось, что дифракционные явления должны были вызвать парадоксальные следствия. Так, например, если поставить на пути лучей непрозрачный круглый экран, то согласно

корпускулярной теории света, предполагавшей, что свет — это поток частиц, тень от экрана должна была быть совершенно темной. По волновой же теории вследствие дифракции света должна была наблюдаться яркая точка. Свет должен был как бы «огнуть» края экрана. Это явление было обнаружено опытным путем, что подтвердило правильность волновой теории света.

Теория дифракции очень сложна. Мы не будем входить в подробности, а только укажем, что в рефлекторе влияние дифракции сказывается сильнее, чем в рефракторе, вследствие того, что зеркала приходится укреплять на стойках или растяжках.

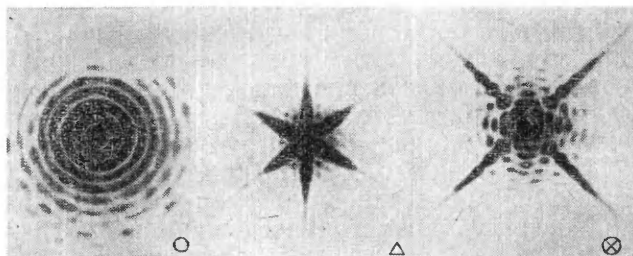


Рис. 135. Дифракционные картины при сильном увеличении: левая — рефрактора, средняя — в рефлекторе при укреплении малого зеркала на трех растяжках, правая — в рефлекторе при укреплении малого зеркала на 4-х растяжках.

Если круглое отверстие объектива создает дифракционную картину, изображенную на рис. 8, то наличие растяжек «снабжает» изображения ярких звезд более или менее длинными, ослабевающими по мере удаления от изображения звезды, «лучами». Приводим рис. 135, на котором показаны эти «лучи». Избавиться от них невозможно.

II. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛО-СТЕКЛЯННЫЕ ШЛИФОВАЛЬНИКИ

Средний диаметр зеркал любительских телескопов в СССР в настоящее время близок к 250 мм. Некоторые любители изготовили и используют для наблюдений значительно большие зеркала, диаметром 300—350 мм. В Риге построен любительский телескоп с диаметром зеркала 500 мм. Нет сомнения в том, что

рост размеров зеркал будет продолжаться и в дальнейшем. Уже сейчас серьезно обсуждается вопрос о постройке любительского телескопа с диаметром зеркала 700 мм, что выходит далеко за рамки обычных представлений о любительском изготовлении оптики.

Однако обработка крупных зеркал связана для любителей со значительными трудностями. Дело в том, что хорошо освоенный ими способ изготовления зеркала шлифовкой друг на друга двух стеклянных дисков становится непригодным для зеркал, диаметр которых превосходит 250—300 мм. В этом случае для успешной работы необходимы другие методы обработки, другие инструменты и приспособления. Обработка больших зеркал ведется металлическими шлифовальниками. Однако большинство любителей очень смутно представляет себе, каким образом и из чего их можно изготовить.

В данном дополнении приводится описание металлических и металло-стеклянных шлифовальников, которые могут быть использованы для обработки крупной оптики в любительских условиях. Указываются также основные особенности их расчета и изготовления.

1. Металлические шлифовальники

В оптическом производстве издавна пользуются шлифовальниками из латуни или из серого чугуна. Однако шлифовальники могут быть изготовлены и из других материалов. Опыт любителей и оптиков-профессионалов показал, что для этой цели может быть использован почти любой металл, обладающий достаточной прочностью и твердостью, например сталь, бронза, твердый алюминий, силумин и многие другие.

Простейший шлифовальник для обработки вогнутого зеркала представляет собой металлический диск, одна сторона которого выполнена в виде части сферы нужного радиуса кривизны. Диаметр шлифовальника может быть взят значительно меньшим, чем диаметр зеркала: 0,7—0,8 последнего. Однако, учитывая то, что в дальнейшем он будет служить основой для полировальника (диаметр которого во всех случаях должен быть равен диаметру зеркала), следует сразу же позаботиться об изготовлении шлифовальника полного размера. Нужная кривизна рабочей поверхности достигается обработкой шлифовальника на токарном станке.

Рекомендуемый некоторыми авторами способ обточки шлифовальника по шаблону вряд ли может быть оправдан. Он требует точного изготовления шаблона, что само по себе составляет сложную задачу. К тому же следует иметь в виду, что работа по изготовлению крупной сферической поверхности на обычных станках может быть выполнена только очень опытным токарем. Она сопряжена с большими трудностями, требует значительной затраты времени, и все равно полученная поверхность, как правило, будет отличаться от точной сферы на недопустимо большую величину. Именно поэтому А. А. Чикин советовал делать шлифовальники парами — выпуклый и вогнутый одинаковой кривизны, которые затем пришлифовываются друг к другу для устранения значительных ошибок поверхности. Очевидно, что такой способ для любителей также непригоден из-за его сложности и дороговизны.

Ниже описывается более простой способ, свободный от указанных недостатков. Он заключается в том, что

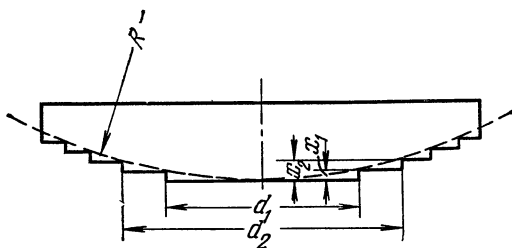


Рис. 136. К расчету ступенчатой поверхности шлифовальника.

поверхности шлифовальника придается не плавная сферическая форма, а ступенчатая, причем огибающая ступенек представляет собой сферу нужной кривизны (рис. 136).

Изготовление такой поверхности не представляет особого труда, и доступно токарю самой низкой квалификации. Если расчет диаметров ступенек сделан заранее, обработка поверхности занимает поразительно мало времени. Так, например, при изготовлении автором шлифовальника диаметром 320 мм с радиусом кривизны 3200 мм обработка сферической поверхности заняла около 30 минут. Обработка такой же поверхности по шаблону потребовала бы многих часов работы опытного

токаря и все же не обеспечила бы точности, достигнутой простыми средствами при ступенчатой проточке.

Ступенчатая форма шлифовальника не играет большой роли при обработке зеркала, так как в процессе грубой шлифовки ступеньки полностью срабатываются, после чего шлифовальник приобретает правильную сферическую форму.

Чтобы точную форму получить быстрее, можно заранее спилить вершинки ступенек напильником. Для этого проточенный шлифовальник кладется лицевой поверхностью вверх и личным напильником равномерно по всей площади шлифовальника опиливаются острые ребра ступенек. Пилить надо осторожно, так, чтобы на шлифовальнике были ясно видны все кольцевые риски, которые представляют собой наиболее углубленные следы от резца, расположенные на расчетной сферической поверхности.

Среднюю и тонкую шлифовку вогнутых зеркал желательно вести при положении зеркала внизу. При этом улучшается распределение абразива по поверхности зеркала и ускоряется процесс обработки при одновременном улучшении ее качества. В случае зеркал, нуждающихся в разгрузке, указанный способ является единственно возможным, так как расположенное на шлифовальнике зеркало разгрузить нельзя. Естественно, что если сверху находится шлифовальник, то он также не поддается разгрузке. В этом случае шлифовальник должен иметь достаточную жесткость, поэтому его нельзя делать слишком тонким.

Приводим минимальные толщины d (по краю) сплошных шлифовальников различных диаметров D , определенные из условия достаточной жесткости:

$D, \text{ мм}$	150	200	250	300	400	500
$d, \text{ мм}$	8	10	14	18	28	45

Для упрощения обработки зеркала толщину шлифовальника лучше взять несколько большей (на 30—50%). Однако делать чрезмерно толстые шлифовальники также не следует. Из-за его большого веса повысится удельное давление на стекло, что может привести к царапинам при тонкой шлифовке. Допустимое удельное давление на последней стадии тонкой шлифовки, по-видимому, составляет 10—15 г/см². Поэтому сплошной шлифовальник, например, из чугуна, не может иметь толщину, большую

чем 1,5—2 см. Между тем при обработке крупных зеркал она должна быть выбрана большей из соображений жесткости. В этом случае для уменьшения веса шлифовальника в теле последнего фрезеруются или высверливаются углубления, форма которых выбирается таким образом, чтобы его жесткость не была заметно уменьшена. На рис. 137 приведена примерная форма шлифовальников из сплошного материала (а) и сварных из

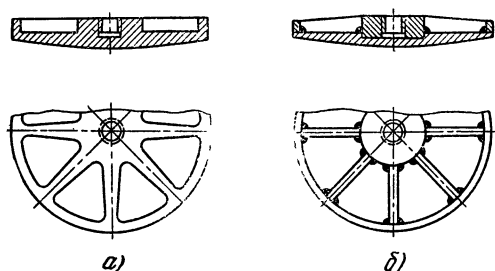


Рис. 137. Облегченные металлические шлифовальники, а — из сплошного материала, б — сварной из стали.

стали (б). Последние могут применяться для обработки самых больших любительских зеркал.

При облегчении шлифовальника следует иметь в виду, что толщина его дна не должна быть меньше 10—15 мм. В противном случае жесткость дна может оказаться недостаточной и шлифовальник будет деформироваться при работе.

По возможности следует облегчать шлифовальники и меньших диаметров. Снижение удельного давления на стекло благотворно скажется на качестве тонкой шлифовки и уменьшит деформации зеркала при его обработке.

На рис. 138 показаны три облегченных шлифовальника, которые были использованы автором при обработке зеркал диаметром 320, 270 и 340 мм. У двух шлифовальников (латунного и чугунного) углубления выфрезерованы, у третьего, изготовленного из силумина, они получены при отливке в земляную форму.

После того как шлифовальник облегчен (если это требуется), а его рабочая поверхность проточена, на ней следует нанести две или более пересекающиеся канавки, не проходящие через центр шлифовальника. Их

можно пропилить трехгранным напильником или ножовкой, а также выскоблить вручную по линейке резцом. Ширина канавок 1,5—2 мм, глубина 0,5—1,0 мм. Они разбивают поверхность на ряд участков, что облегчает приработку шлифовальника к изделию, ускоряет шлифовку и делает ее более равномерной.

После нанесения канавок шлифовальник готов к работе (рис. 139). Однако, если им начать шлифовку стеклянного диска, то центральная часть шлифовальника,

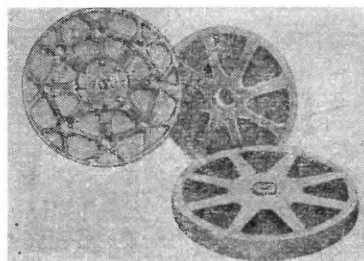


Рис. 138. Облегченные металлические шлифовальники.

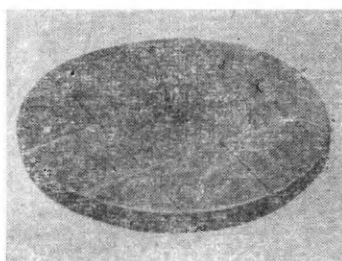


Рис. 139. Металлический (чугунный) шлифовальник, подготовленный к обработке зеркала с отверстием в центре.

которой он первое время будет обрабатывать стекло, быстро притупится и точная форма шлифовальника исчезнет. Чтобы избежать этого, в стеклянной заготовке следует заранее вышлифовать достаточное углубление с радиусом кривизны, примерно равным расчетному. Это может быть сделано кольцевым шлифовальником (см. Дополнение 3).

В случае небольших зеркал диаметром до 200 мм кольцевой шлифовальник может быть заменен подходящим куском любого металла, например, как советует А. А. Чикин, куском свинца, которому ударами молотка придана необходимая форма.

2. Металло-стеклянные шлифовальники

При изготовлении крупных зеркал, кроме металлических, могут быть использованы комбинированные металло-стеклянные шлифовальники. Такой шлифовальник представляет собой плоский или выпуклый металлический диск (например, шлифовальник, описанный выше),

на рабочую поверхность которого наклеены квадраты из толстого листового стекла.

Стекланные заготовки наклеиваются на шлифовальник после грубой шлифовки, когда достаточное углубление в зеркале уже получено, а ступеньки шлифовальника сработались. После наклейки шлифовка продолжается обычным способом. Поверхность квадратов быстро приобретает кривизну зеркала, так как для этого с них необходимо снять очень тонкий слой стекла. Промежутки между квадратами способствуют распределению абразива по поверхности зеркала, поэтому качество шлифовки улучшается. При этом совершенно отсутствует явление присасывания, которое иногда служит причиной гибели зеркала либо шлифовальника, изготовленного из стекла.

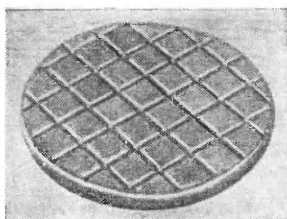


Рис. 140. Металло-стеклянный шлифовальник для обработки плоского зеркала.

Металло-стеклянный шлифовальник внешне очень похож на полировальник, смоляная поверхность которого также разбивается канавками на большое число квадратных участков (рис. 140).

При наклейке на диск стеклянные заготовки располагаются несимметрично относительно его центра, так, чтобы центр шлифовальника находился вблизи угла одного из квадратов. Толщина стекла, из которого они делаются, может колебаться в пределах от 5 до 12 мм. Размер стеклянных заготовок зависит от их толщины. Для стекла толщиной 5—6 мм сторона квадрата берется равной примерно 30 мм, при толщине 12 мм — около 60 мм.

Стекланные заготовки перед наклейкой на диск пришлифовываются к его поверхности крупным абразивом (№ 150—180). На их рабочих гранях делаются защитные фаски шириной 4—5 мм.

Наклейка производится наклеечной смолой либо специальной восковой мастикой. Смола изготавливается аналогично смоле для полировальника и отличается от нее лишь составом. Хорошие результаты дает смола Н-10, применяемая в оптическом производстве для наклейки стеклянных деталей на металлические. Она имеет следующий состав: канифоль — 34%; воск пчелиный — 1%; пек — 25%; гипс в порошке — 40%.

Для приготовления смолы вначале расплавляют канифоль, затем в указанном порядке добавляют остальные компоненты. Смесь варят при температуре 120—150° в течение двух часов, тщательно ее перемешивая. Полученную смолу фильтруют через марлю.

Перед наклейкой металлический диск подогревают, например на электроплитке, до температуры 90—100°. Затем на него наносят тонкий слой смолы и накладывают слегка подогретые квадратные заготовки, плотно прижимая их к диску. Квадраты нужно располагать не вплотную друг к другу, а с промежутками 2—3 мм. Чтобы упростить наклейку заготовок, их следует заранее разложить на бумаге в том же порядке, в каком они будут размещаться на поверхности диска. После наклейки шлифовальнику дают остыть, время от времени подправляя положение квадратов рукой или деревянной палочкой.

На рис. 140 показан металло-стеклянный шлифовальник, изготовленный описанным способом и использованный автором при шлифовке плоского контрольного зеркала диаметром 340 мм.

Следует заметить, что в некоторых случаях процесс изготовления металлической основы шлифовальника можно значительно упростить. Металлический диск служит для придания шлифовальнику жесткости. Обработка же зеркала производится поверхностью стекла, поэтому нет необходимости, особенно в случае зеркал с малой стрелкой кривизны, протачивать диск на станке для придания ему выпуклости. Стеклоянные квадраты могут быть наклеены на плоскую поверхность металла, после чего обработка зеркала производится обычным любительским способом — шлифовкой его по хорде на шлифовальнике, расположенном снизу. Конечно, и в этом случае для ускорения обработки придется предварительно вышлифовать углубление в заготовке зеркала.

После того как грубая шлифовка будет окончена, а нужное углубление в зеркале получено, шлифовальник и зеркало следует поменять местами, чтобы продолжить более тонкую шлифовку при положении зеркала внизу.

Металло-стеклянные шлифовальники в основном рекомендуются для изготовления крупных зеркал предельного в любительских условиях диаметра: 300—500 мм. Однако их применение может быть оправдано и в ряде

других случаев при существенно меньших зеркалах, например:

а) для улучшения качества тонкой шлифовки, если, металлический шлифовальный материал неоднороден по твердости или содержит царапающие включения (например, песок);

б) для исправления значительных недостатков механической обработки металлического шлифовального материала, особенно в том случае, когда исправление его переточкой нежелательно или невозможно;

в) при необходимости получить заданное фокусное расстояние зеркала с точностью 5—10 мм. Подгонка фокусного расстояния чрезвычайно затруднена при обработке зеркала металлическим шлифовальным материалом, который не меняет своей кривизны в процессе шлифовки. При обработке же зеркала металло-стеклянным шлифовальным материалом такая точность легко достижима, так как и шлифовальный материал и зеркало меняют свою кривизну с одинаковой скоростью. Практически шлифовальный материал срабатывается даже быстрее, так как его площадь меньше из-за промежутков между квадратами, а сами квадраты обычно делаются из более мягкого стекла, чем зеркало;

г) металло-стеклянные шлифовальные материалы следует настоятельно рекомендовать для обработки оптических поверхностей сложной формы или деталей, трудных в изготовлении, таких, например, как корректирующие пластинки камеры Шмидта или мениски с малыми радиусами кривизны.

В заключение автор считает необходимым кратко описать процесс изготовления небольшого металлического шлифовального материала. Шлифовальные материалы больших размеров изготавливаются подобным же образом, изменяются только габариты заготовок и способы их крепления в патроне токарного станка.

Такое описание поможет любителю уяснить все детали процесса, которые на первый взгляд кажутся несущественными, однако могут оказать решающее влияние на качество изготовленного инструмента. Поэтому при обработке шлифовального материала нужно выполнять все приведенные указания, а в случае, если работа будет поручена мастеру, последнего необходимо с ними ознакомить.

Предположим, что мы решили изготовить шлифовальный материал для зеркала диаметром 150 мм с фокусным расстоянием 1500 мм. Рассчитаем диаметры ступенек

для обработки шлифовальника (см. рис. 136). Расчет производим по известной формуле

$$d_i \cong 2 \sqrt{2Rx_i}, \text{ или } d_i \cong \sqrt{8Rx_i},$$

где d_i — диаметр очередной ступеньки; R — радиус кривизны зеркала, который в нашем случае равен 3000 мм; x_i — высота ступеньки, имеющей диаметр d_i , от вершины шлифовальника.

Разность высот двух соседних ступенек $x_{i+1} - x_i$ (или, что то же самое, высота каждой отдельно взятой ступеньки) определяется минимальным расстоянием, на которое можно точно сдвинуть резец при обработке детали. У большинства токарных станков цена деления лимба верхней каретки, которой мы будем пользоваться, составляет 0,05 мм, поэтому высоту отдельной ступеньки принимаем равной 0,05 мм.

Для удобства расчета и пользования данными при обработке результаты вычислений сводим в таблицу.

$x, \text{ мм}$	$8Rx$	$d, \text{ мм}$	$D-d, \text{ мм}$	$x, \text{ мм}$	$8Rx$	$d, \text{ мм}$	$D-d, \text{ мм}$
0,05	1 200	34,7	115,3	0,55	13 200	114,9	35,1
0,10	2 400	49,0	101,0	0,60	14 400	120,0	30,0
0,15	3 600	60,0	90,0	0,65	15 600	124,9	25,1
0,20	4 800	69,3	80,7	0,70	16 800	129,7	20,3
0,25	6 000	77,5	72,5	0,75	18 000	134,2	15,8
0,30	7 200	84,9	65,1	0,80	19 200	138,6	11,4
0,35	8 400	91,7	58,3	0,85	20 400	142,8	7,2
0,40	9 600	98,0	52,0	0,90	21 600	147,0	3,0
0,45	10 800	104,0	46,0	0,95	22 800	151,0	—
0,50	12 000	109,6	40,4				

Диаметр ступенек d при вычислении следует округлять в большую сторону (с точностью до 0,1 мм). В противном случае приработка шлифовальника к изделию отнимет больше времени.

Последняя графа таблицы $D - d$ (D — диаметр шлифовальника, равный 150 мм) введена для упрощения обработки детали на станке. Данными этой графы мы будем пользоваться при проточке шлифовальника.

Для изготовления шлифовальника подбираем латунную, чугунную или стальную заготовку необходимой

толщины, которая в нашем случае составляет 8 мм по краю. В центре она, конечно, будет несколько больше, поэтому толщину заготовки необходимо взять не меньше 10—12 мм. Лучше взять ее несколько большей, так как при этом уменьшатся возможные деформации при обработке шлифовальника на станке.

Заготовку можно вырезать или высверлить (обсверлить дрелью, а затем выбить) из толстого листового материала. Можно также отрезать ее на станке от болванки подходящего диаметра.

Шлифовальник не требует облегчения, поэтому, проточив заготовку до заданного диаметра 150 мм, укрепляем ее в патроне токарного станка для обработки ступенчатой поверхности. Если бы изготовлялся большой шлифовальник, нуждающийся в облегчении, то вначале следовало бы выфрезеровать или высверлить углубления, так как после проточки ступенек этого делать нельзя.

Заготовка укрепляется в патроне станка в перевернутых кулачках либо на резьбовой оправке, если заготовку (вследствие ее больших размеров) нельзя захватить кулачками. В последнем случае глухое отверстие с резьбой (например, М 30 × 2) может быть в дальнейшем использовано для крепления деревянной ручки при шлифовке вручную или для втулки поводка при обработке зеркала на шлифовальной машине. При креплении заготовки в кулачках не следует применять больших усилий, так как при этом заготовка может деформироваться и полученная при обработке точная поверхность исказится после освобождения шлифовальника.

Обработка ступенек производится проходным отогнутым резцом при движении его от края к центру заготовки. Работа ведется в следующей последовательности.

Включаем станок и, действуя маховичками продольной и поперечной подач суппорта, подводим резец к заготовке. Определяем ее центр, для чего снимаем небольшую стружку при поперечной подаче резца к центру. Точно в центре резец останавливаем. Нулевое деление лимба поперечной каретки устанавливаем против риски на втулке винта подачи и надежно закрепляем лимб в этом положении стопорным винтом.

При определении центра маховичок поперечной каретки нужно вращать только в одну сторону — по

часовой стрелке. В противном случае, из-за наличия мертвого хода винта подачи, положение резца в центре заготовки не будет совпадать с нулевой отметкой лимба. В дальнейшем это неизбежно приведет к искажению сферической формы шлифовальника, поэтому точная установка резца по центру особенно важна.

После того как положение центра определено, отводим резец к краю заготовки. У большинства станков один оборот винта поперечной подачи смещает резец на 5 мм, что соответствует изменению диаметра детали на 10 мм. Диаметр нашего шлифовальника 150 мм, поэтому, чтобы отвести резец к краю заготовки, нужно сделать 15 оборотов маховичка против часовой стрелки. Чтобы выбрать мертвый ход винта, делаем немного больше, например 16 оборотов, а затем, вращая маховичок по часовой стрелке, выбираем мертвый ход и подводим резец к краю заготовки. При этом против риски должно установиться нулевое деление лимба.

Обработку заготовки начинаем с чернового обтачивания. Во избежание произвольных перемещений суппорта его продольную каретку закрепляем на станине. Резец отводим от края детали назад на 3—4 мм, после чего маховичком подачи верхней продольной каретки устанавливаем глубину резания, смещая резец влево на расстояние, несколько большее расчетной стрелки кривизны. В нашем случае достаточно углубить резец в тело на 1—1,5 мм. Если бы обрабатывался шлифовальник с большой стрелкой кривизны, то черновое обтачивание следовало бы выполнить за несколько проходов, так чтобы глубина резания за один проход не превосходила 2—3 мм.

Затем выбираем мертвый ход винта подачи верхней каретки, для чего, поворачивая маховичок против часовой стрелки, останавливаем его, когда резец начнет двигаться вправо. Лимб верхней каретки также устанавливаем на нулевом делении и закрепляем его стопорным винтом. После этого можно приступить к обработке ступенчатой поверхности. Проточку ведем при среднем числе оборотов шпинделя и минимальной подаче резца за один оборот изделия.

Обработка первой, считая от края шлифовальника, ступеньки будет закончена, когда диаметр проточки со 150 мм уменьшится на 3 мм (см. последнюю графу таблицы). Вторая ступенька будет обработана, когда

диаметр уменьшится на 7,2 мм, третья — на 11,4 мм и т. д.

Лимб поперечной подачи обычно разбивается на 100 делений, каждое из которых соответствует изменению диаметра проточки на 0,1 мм. Так как положение резца на краю детали определяется нулевым делением лимба, уменьшение диаметра проточки можно определять по шкале лимба, не производя непосредственных замеров диаметров ступенек.

Для обработки поверхности включаем станок и маховичком поперечной подачи подводим резец к детали. Включаем самоход поперечной подачи. Резец при этом пойдет вперед и через некоторое время начнет обработку заготовки. Когда к риску подойдет нулевое деление лимба, что соответствует диаметру обработки 150 мм, край резца начнет обработку плоскости первой ступеньки. Когда лимб повернется на 30 малых делений, что соответствует уменьшению диаметра обработки на 3 мм, выключаем самоход. Обработка первой ступеньки на этом заканчивается. Не выключая станка, отводим резец вправо на 0,05 мм, для чего поворачиваем маховичок верхней каретки на одно деление лимба против часовой стрелки. Для обработки второй ступеньки вновь включаем самоход, выключая его, когда к риску подойдет деление лимба 72. Вновь сдвигаем резец вправо на 0,05 мм и обрабатываем третью ступеньку и т. д., пока вся поверхность шлифовальника не будет проточена.

Чистовая обработка шлифовальника выполняется так же, однако глубина резания устанавливается меньшей. Рекомендуемая глубина резания при чистовой проточке 0,2—0,5 мм. Резец должен быть хорошо заточен. Чтобы он не изменял своих размеров вследствие износа при обработке, следует пользоваться наиболее стойкими хорошо заточенными твердосплавными резцами.

Когда чистовая проточка завершена, шлифовальник снимают со станка и после опилования острых граней ступенек и нанесения канавок используют для обработки зеркала.

Мы не имеем здесь возможности хотя бы вкратце рассмотреть отливку металлических заготовок для шлифовальников. Конечно, одному любителю вряд ли удастся выполнить чугунную отливку без помощи литейной мастерской, однако шлифовальники значительных размеров из алюминия, дюралюминия или силумина с

успехом могут быть отлиты в обычных домашних условиях. Уместно напомнить, что некоторые любители выполняли отливки крупных металлических заготовок для зеркал из зеркальной бронзы, температура плавления которой намного выше, а процесс отливки гораздо сложнее и капризнее, чем литье из алюминия или силумина.

Относительная простота отливки шлифовальников из алюминиевых сплавов и легкость их обработки позволяют с успехом изготавливать их в домашних условиях, в школьных мастерских, ремонтных мастерских РТС колхозов и совхозов. Наличие же такого шлифовальника дает возможность изготовить первоклассное зеркало любых, разумных в любительских условиях, размеров.

III. НЕКОТОРЫЕ ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СОВРЕМЕННОЙ ПРАКТИКЕ ЛЮБИТЕЛЬСКОГО ТЕЛЕСКОПОСТРОЕНИЯ

1. Станочек с вращающимся столиком

В настоящее время большинство любителей для шлифовки и полировки зеркал для телескопов применяют станочек с вращающимся столиком. Хотя способ «хождения вокруг бочки», предложенный еще А. А. Чижиным, является очень надежным, все же работать на

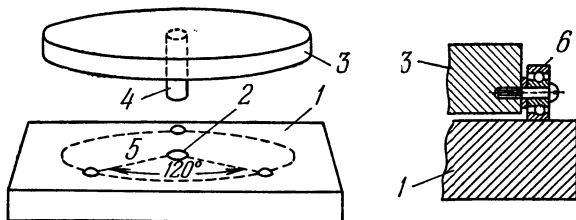


Рис. 141. Станочек для шлифовки и полировки зеркал. 1—доска-основание, 2—отверстие для оси столика, 3—вращающийся столик, 4—ось столика, 5—стальные шарики, 6—шарикоподшипник.

станочке гораздо удобнее, так как можно работать стоя на одном месте или даже сидя. Станочек может быть установлен на столе.

Простейший станочек состоит из доски-основания 1 (рис. 141) с отверстием 2 в центре и вращающегося

столика, круглого или многогранного, 3. В его центре (лучше не насквозь) закреплена ось 4, вращающаяся без люфта, но не слишком туго в отверстии 2 основания. Для того чтобы столик был вполне устойчив, он может плавно двигаться, катаясь по трем стальным шарикам 5, «утопленным» в основании и расположенным вблизи края столика. Можно использовать три шарикоподшипника 6, расположенных по краю (торцу) столика перпендикулярно к его поверхности. Шарикоподшипники и ось должны быть хорошо смазаны густой смазкой. В крайнем случае столик может опираться, например, на донышко от консервной банки подходящего размера. Цилиндрическая часть банки аккуратно срезается ножницами вровень с донышком, а само донышко (диск) выступающим бортиком вверх (наружу) прибивается или привинчивается к основанию и точно в его центре просверливается отверстие для оси. Выступающий вверх бортик смазывается густой смазкой. Конечно, возможны и другие варианты.

Диаметр столика должен быть больше диаметра зеркала. Шлифовальный или зеркало крепится к столику так, как это описано в главе III.

В процессе шлифовки (вместо того чтобы делать шажки вокруг бочки или стола) работающий равномерно поворачивает столик вокруг оси, а зеркало (или шлифовальный, или кольцо, когда работа ведется по способу «зеркало вниз») также равномерно поворачивает немного в противоположном направлении.

Ритм работы, например, может быть таким: при поворачивании столика на $\frac{1}{6}$ оборота делают 2 штриха (к себе и от себя). Для удобства можно на краю столика сделать соответствующие метки. Не надо забывать, что неравномерность вращения может привести к астигматизму.

2. Шлифовка металлическим кольцом

Начальную выемку углубления, грубую шлифовку стеклянного диска, как показала практика, очень хорошо делать при помощи металлического кольца (лучше всего чугунного), по диаметру равного половине диаметра зеркала, или несколько меньшего диаметра. (Автор данного дополнения, например, успешно шлифовал диск

диаметром 300 мм кольцом 100 мм). Толщина стенок кольца примерно 10—15 мм.

Шлифовка кольцом ведется таким штрихом, чтобы край кольца не выходил за край диска (как это показано на рис. 142); при этом применяется самое грубое абразивное зерно № 40—25 по ГОСТу (или № 40—60 по старому обозначению)*).

При шлифовке кольцом углубление в стекле получается значительно быстрее, чем при шлифовке стекла стеклом. Кроме того, толщина стекла полностью сохраняется, так как после шлифовки кольцом на краю диска остается плоская фаска, которая затем постепенно сошлифовывается шлифовальником при дальнейших стадиях шлифовки. Одним из преимуществ обработки кольцом с последующей шлифовкой литым шлифовальником полного профиля, покрытого оргстеклом, является и то, что нужен только один стеклянный диск, что имеет большое значение для любителя, особенно если зеркало имеет диаметр более 150 мм.

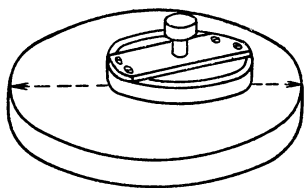


Рис. 142. Шлифовка зеркала кольцом.

3. Изготовление цементного шлифовальника

При изготовлении шлифовальника любительскими средствами нужно стремиться к наибольшей простоте и доступности. Очень хорошие ступенчатые металлические или стеклянно-металлические шлифовальники, предложенные А. С. Фоминым (см. Дополнение II), требуют использования токарного станка. Как показала практика последних лет, наиболее доступен в изготовлении для широкого круга любителей шлифовальник, основание которого отлито из цемента с песком или из цемента с алебастром, а шлифующая поверхность состоит из квадратиков оргстекла, наклеенных на это основание**).

*) Любители с успехом пробовали применять вместо чугунного кольца соответствующего размера абразивный круг (точильный камень) с отверстием посередине, употребляя при этом, так же как и при шлифовке кольцом, абразивное зерно № 40—25 с водой.

**) Наклеивать на шлифовальник оргстекло и делать грубую шлифовку кольцом первым из советских любителей предложил А. С. Фомин.

После шлифовки кольцом стрелка кривизны должна быть несколько меньше расчетной величины, так как, начиная с абразива № 15 (№ 100 по старому обозначению), шлифовка будет вестись шлифовальником полного размера.

Основанием формы для отливки шлифовальника служит само будущее зеркало — обработанный кольцом стеклянный диск, имеющий сферическое углубление, положенный на горизонтальную поверхность углублением вверх (рис. 143). По краю стеклянного диска делается

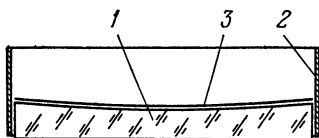


Рис. 143. Форма для отливки шлифовальника и полировальника (разрез). 1 — основание формы (будущее зеркало), 2 — картонный бортик, 3 — бумажный круг.

цилиндрический вертикальный бортик из картона 2 высотой в 5—6 см или более (в зависимости от высоты будущего шлифовальника), концы которого склеиваются или скрепляются проволочными скобками. На вогнутую поверхность стекла накладывается круг 3 из тонкой плотной бумаги, без складок, точно вырезанный по

размеру диска. Бортик и бумажный круг должны быть хорошо промаслены.

Основание шлифовальника отливается из цемента с песком (берется смесь от одной части цемента на одну часть песка до одной части цемента на три части песка) или из смеси, состоящей из 30% алебаstra и 70% цемента (предварительно перемешать в сухом виде). Раствор, похожий по густоте на жидкую сметану, нужно готовить перед отливкой. Цемент в порошке должен быть сухим. Если в нем есть окаменевшие комки, то он отсырел и может вовсе не затвердеть и будет разваливаться. Внутри шлифовальника нужно заложить «арматуру»: перекрещивающиеся тонкие щепки, проволочную сетку.

Для облегчения веса можно сделать ячейки-пустоты, поставив поверх первого слоя отливки с арматурой круглые или многогранные картонные трубки, а затем продолжить заполнение формы. Для зеркал диаметром от 150 до 350 мм шлифовальник должен иметь толщину примерно от 25 до 50 мм.

Так же, как описано выше, изготавливается и основание полировальника, но для шлифовальника на основание наклеиваются при помощи смолы (с добавлением

канифоли, чтобы она была менее текучей, более твердой) или другого склеивающего состава квадратики оргстекла (плексиглас), обрезанные по краям шлифовальника в соответствии с линией его окружности (рис. 144), а на полировальник наливается, как описано в главе III, полировочная смола.

Толщина оргстекла должна быть не менее 4—5 мм. Между квадратиками оставляют промежутки или делают на них фаску под углом 45° .

При полировальниках значительного размера рационально нанести канавки на основание, прорезав их на его поверхности, или внести этот элемент в самую форму, выложив перед отливкой на поверхности нижнего основания формы, которым служит стеклянный диск, обработанный кольцом, сетку из согнутых полосок картона или палочек. Тогда

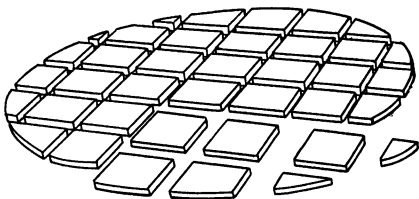


Рис. 144. Оргстекло, приготовленное к наклею на основание шлифовальника.

можно будет заливать смолой и обрезать по краям каждый квадрат в отдельности, что значительно облегчит формовку полировальника. Нанесение канавок мокрой линейкой или фасетником, когда формовку придется повторять многократно, прежде чем будет достигнута нужная форма полировальника, очень неудобно и этот способ нужно считать устаревшим. Лучше, как это рекомендует, например, А. Н. Подъяпольский (Москва), прорезать или пропиливать канавки в смоле под водой. При этом вся срезанная смола остается под водой, легко может быть смыта с полировальника и не пристает к инструменту.

Грубая шлифовка кольцом и шлифовальником производится в положении «зеркало внизу», а всю дальнейшую шлифовку и полировку можно производить способом «зеркало вверх». Шлифовальник или полировальник при этом можно хорошо промывать струей воды, не снимая его со станочка. Зеркало промывают отдельно после каждой стадии (или порции) шлифовки или полировки и при помощи лупы проверяют качество обработки поверхности. Здесь необходимо указать, что при промывке зеркала, поставленного на ребро, нужно

подкладывать под него мягкую подстилку, например, поролон, так как при значительном весе зеркала (5 кг и более) при наклоне его в положение на ребре могут образоваться заколы на краю стекла.

4. Испытание зеркала

При испытании отдельных вогнутых зеркал и двухзеркальных систем (например, Кассегрена) любители успешно применяют «второй метод щели и нити» по Д. Д. Максutowу. Он очень чувствителен и дает возможность весьма наглядно определить форму поверхности зеркала.

«Выведя нить из фокальной плоскости на заметную величину, но оставляя ее на пути сходящихся или расходящихся лучей, мы обнаружим на освещенном волновом фронте (на фоне освещенного зеркала. — М. Ш.) тень нити в виде изогнутой или прямой линии, в зависимости от наличия или отсутствия аберраций»^{*)}. При таком испытании нужно знать, что для одиночного зеркала тень в виде вертикальной прямой соответствует точной сфере, а в случае испытания двухзеркальной системы в параллельном пучке лучей указывает, что в эквивалентном фокусе системы сходятся все лучи, отраженные вторичным зеркалом. Во всех иных случаях, когда тень нити искривлена, одиночное зеркало асферично, а вторичное зеркало в двухзеркальной системе требует ретуши. Здесь необходимо обратить внимание на то, что тень нити, проходящая через центр зеркала (оптическую ось), всегда будет прямой (вертикальной), поэтому тень нити нужно рассматривать вне центра зеркала.

На рис. 145 показана тень нити для случая одиночного параболоидального зеркала (а). Отклонение нити в средней части от *центральной вертикали* показывает, что здесь «яма», а отклонение концов тени нити по направлению к *центральной вертикали* — что на краю имеется «завал». Кривая достаточно плавная. На рис. 145, б изображена тень нити для поверхности, где в середине зеркала углубление, край приподнят, а остальные зоны близки к сфере. Эти примеры показывают предфокальные изображения тени нити, т. е. когда нить

^{*)} Максutow Д. Д., Изготовление и исследование астрономической оптики, Гостехиздат, 1948, стр. 172.

находится между фокусом и зеркалом. Зафокальные изображения имеют диаметрально противоположную форму. Например, для случая *a* (предфокальное изображение) в зафокальном изображении (*в*) середина тени будет изогнута к центру, а концы — наружу. При исследовании зеркала лучше всего пользоваться предфокальным положением нити. Приближая нить к фокусу на некоторое оптимальное, определяемое опытным путем расстояние и помещая тень нити в различных зонах зеркала, можно очень хорошо «прощупать» форму всего

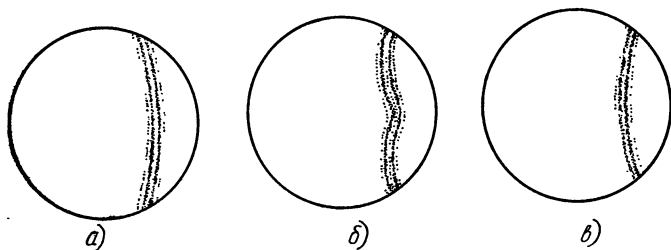


Рис. 145. Испытание зеркала вторым методом щели и нити по Д. Д. Максутову. Предфокальные изображения тени нити: *a*) параболоид, *б*) неправильная асферическая поверхность. Зафокальное изображение: *в*) параболоид.

зеркала. Для того чтобы хорошо понять форму зеркала, нужно помнить, что в предфокальном изображении удлинение фокуса (например, завал на краю или бугор в середине зеркала) соответствует отклонению тени нити в сторону центральной вертикали зеркала, а укорочение фокуса соответствует отклонению тени в противоположную сторону от центральной вертикали («яма» в середине, «приподнятый край»).

В случае испытания двухзеркальных систем в параллельном пучке щель располагается в фокусе вспомогательного зеркала (дающего параллельный пучок), а нить — в эквивалентном фокусе системы (см. гл. VIII).

IV. САМОДЕЛЬНЫЕ ТЕНЕВЫЕ ПРИБОРЫ

Здесь описаны две конструкции теневых приборов — более простая и более сложная. Они проверены на практике и рассчитаны на постройку их вручную в домашних условиях, в кружке, или же с использованием механического оборудования и станков.

1. Простейшая рычажная конструкция

На рис. 146, *а* показана кинематическая схема прибора. В этой конструкции для плавных перемещений прибора вдоль оптической оси и перпендикулярно к ней служит рычаг первого рода. То, что движения «ножа

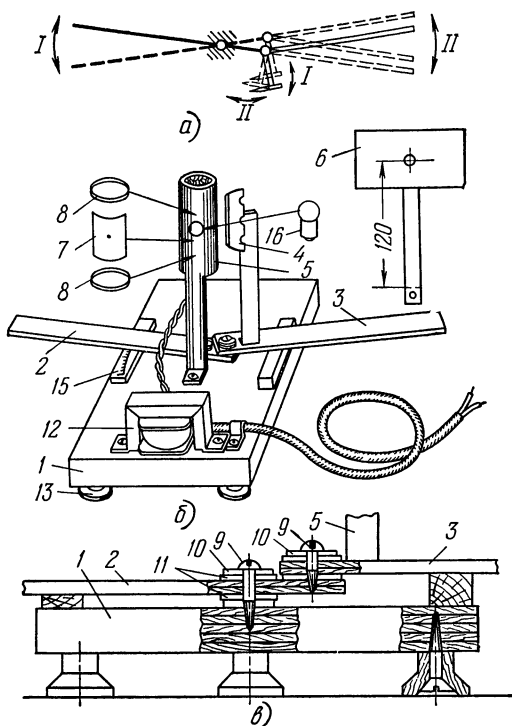


Рис. 146. Простой рычажный теневой прибор; *а*—кинематическая схема работы прибора, *б*—общий вид, *в*—крепление рычагов.

Фуко» не совсем прямолинейны, не имеет особого значения, ибо для измерений используется практически небольшой отрезок дуги. Предварительная установка производится простым передвижением всего прибора.

Отсчет aberrаций получается достаточно точным, так как соотношения плеч в рычажных планках довольно большие — от 1 : 10 до 1 : 20.

Основанием прибора (рис. 146, *б, в*) служит устойчивая массивная прямоугольная плита 1 из толстой фане-

ры, текстолита, дельта-древесины и пр. Если она недостаточно массивна, к ней снизу можно прикрепить при помощи скоб, на винтах или шурупах дополнительный груз. Основание ставится на три ножки 13. Их можно сделать, например, из половинок катушек для ниток, привернутых к основанию.

Для изготовления рычагов 2, 3 используются две деревянные или пластмассовые линейки длиной 250—300 мм. Можно сделать их из полоски текстолита, эбонита или плексигласа (оргстекла) шириной 25—35 мм и толщиной 3—4 мм.

В качестве осей для рычагов 9 могут быть использованы тонкие шурупы (для дерева) либо винты (резьба МЗ, для пластмасс) подходящей длины. Для уменьшения люфта и качаний в местах вращений рычагов подкладываются широкие металлические или пластмассовые шайбы 10 и кружочки из сукна или байки 11.

В качестве источника света применяется обычная лампочка от карманного фонаря, но лучше использовать специальную более яркую лампочку «точечного света» (например, от осциллографа, 6 в, 0,7 а). При наличии осветительной сети необходим простейший понижающий трансформатор 12 малой мощности типа звонкового. Там, где нет осветительной сети, источником питания для лампочки может служить батарейка для карманного фонаря. Дольше будет служить батарея большей емкости (типа «Сатурн»), либо три-четыре сухих элемента (типа ЗСЛ-30), соединенных последовательно.

Фонарик 5 для освещения отверстия (точечного источника света) или щели можно сделать из обрезка дюралюминиевой или латунной трубки либо согнуть из прямоугольного листка жести 6. Практически очень удобным оказалось использование алюминиевого экранчика от радиолампы. К нему надо приклепать или припаять (либо сразу включить в «выкройку» и вырезать) стоечку, при помощи которой фонарик крепится к основанию. Стоечка имеет внизу отгиб с отверстием для крепления фонарика к основанию. В фонарике, с той стороны, которая обращена к испытываемому зеркалу, просверлено отверстие диаметром 4—6 мм.

К лампочке заранее надо припаять мягкие изолированные монтажные провода нужной длины. Надо также сделать приспособление для регулировки положения патрончика с лампой. Как сделать «искусст-

венную звезду», было сказано в главе III. Листок фольги 7 с проколом накладывается на корпус фонарика против прорезанного в нем окошечка и прижимается двумя резиновыми колечками 8.

«Искусственная звезда» должна разместиться в центре окошечка, против источника света. «Ножом Фуко» в нашем приборе будет служить половина лезвия от безопасной бритвы 4, размещенная на конце рычага.

Сборку прибора, особенно регулировку плавности хода рычагов, надо производить тщательно. Под рычагом, передвигающим «нож» вдоль оптической оси, как можно дальше от точки его вращения, можно поместить шкалу, проградуированную в миллиметрах и их долях. По этой шкале будет точно определяться фокусное расстояние различных зон зеркала.

2. Более сложная конструкция

В этой конструкции (рис. 147, а, б) площадка, на которой крепится осветитель и «нож Фуко», перемещается по двум перпендикулярным направлениям, по принципу станочного суппорта. Обычно в аналогичных конструкциях применяются направляющие элементы в виде «ласточкиного хвоста» с регулируемым зазором, а перемещение производится при помощи винта без люфта или реечной кремальеры. Практически вполне удовлетвори-тельные результаты дало применение в качестве направляющих элементов гладких круглых стержней. Перемещение устроено по принципу толкания винтом с обратным пружинным возвращающим усилием.

На толстом массивном основании крепятся две опоры, между которыми установлены параллельно (по возможности точнее) два направляющих стержня. На одной из опор установлен регулировочный винт. По направляющим стержням перемещается промежуточная площадка, в свою очередь имеющая еще два направляющих стержня, расположенных перпендикулярно к первой паре. Также на одном из отгибов установлен аналогичный регулировочный винт для перемещения верхней площадки с осветителем и «ножом» (нитью, сеткой). Корпус осветителя (фонарик), обе площадки и обе опоры выкраиваются из мягкого листового металла.

Направляющие стержни изготавливаются из прутковой стали, лучше из калиброванной стали-серебрянки,

или же их придется проточить и отшлифовать на станке. Их диаметр берется 5—6 мм, а на концах нарезается резьба, соответственно М5 или М6.

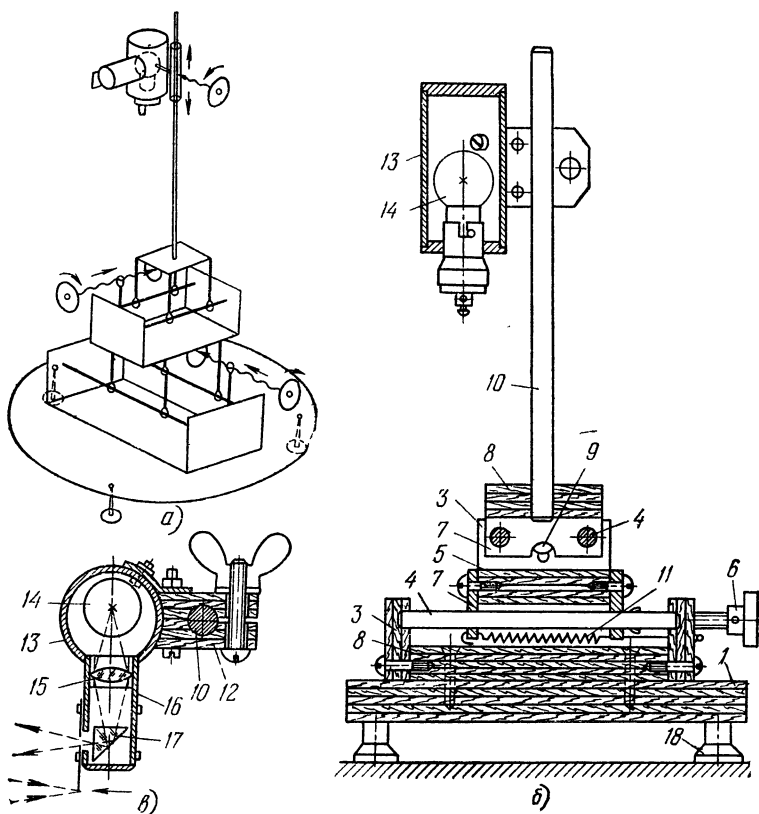


Рис. 147. Теневой прибор с суппортом: а — кинематическая схема; б — общий вид, в — конструкция осветителя с конденсором.

1 — основание прибора, 2 — неподвижная площадка, 3 — стойки для крепления направляющих стержней; 4 — направляющие стержни, 5 — промежуточная площадка, 6 — винт продольного перемещения, 7 — направляющие планки, 8 — верхняя площадка, 9 — винт поперечного перемещения, 10 — стойка осветителя; 11 — пружина, 12 — крепление оптической части прибора, 13 — осветитель (корпус), 14 — источник света (лампочка), 15 — конденсорная линзочка, 16 — тубус оптической части прибора, 17 — призма (или зеркальце); 18 — ножки прибора.

Пружины возврата площадок изготавливаются из пружинной стали ОВС диаметром 0,3—0,5 мм; ее можно заменить тонкой струной от гитары. Пружины должны иметь достаточную мягкость (с усилием 150—200 г)

и запас растяжения (до 40—50 мм). В крайнем случае они заменяются резиновыми нитями.

Винты, регулирующие положения площадок, желательно для удобства отсчета перемещения применять с шагом резьбы, равным 1 мм. В этом случае один его оборот переместит площадку также на один миллиметр. Винты можно снабдить небольшими ручками, например, от радиоаппаратуры.

Для более точных измерений, особенно больших зеркал с малыми относительными фокусами, полезно устроить более сложный осветитель с применением конденсорной линзочки и небольшой призмы полного внутреннего отражения (или кусочка плоского зеркальца («бытовой» точности) (рис. 147, в).

Для испытания зеркала «методом щели и нити», предложенным Д. Д. Максутовым и дающим более точные результаты, щель обычно делают в виде тонкой прорези в фольге или царапины на закопченном стекле или засвеченном негативе, а нить (тонкая проволочка, волосок) натягивают на рамку или сбоку.

Оказалось возможным легко сделать и щель и нить одновременно фотографическим способом. Большое преимущество этого способа в том, что «щель» и «нить» можно сделать очень тонкими и соблюсти точную параллельность между ними, что очень важно.

V. САМОДЕЛЬНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОКУЛЯРЫ

Важная оптическая часть телескопа — окуляр, достаточно подробно рассмотренная в главе V, может быть практически осуществлена любительскими средствами. Очень важно позаботиться о накоплении «сырья» и «полуфабрикатов», т. е. иметь как можно больше мелких линзочек, клееных систем и блоков, отдельных оптических узлов, компоненты которых можно использовать для сборки окуляров. Выдержав при конструировании самодельных окуляров определенные соотношения и взаимное расположение компонент (в сложных окулярах), можно достичь весьма удовлетворительных результатов сравнительно простыми средствами.

В таблице IV приведены основные сведения об окулярах различных типов. На рис. 148 изображены схемы этих окуляров.

При подборе линз надо узнать их главные фокусные расстояния F_I и F_{II} . Тогда можно и нужно использовать данные об их отношениях к эквивалентному фокусному расстоянию собранного в единую оптическую систему окуляра $F_{\text{экв}}$ и выдержать указанные на рисунке размеры b , d и P .

Сделаем несколько дополнительных замечаний. Окуляры системы Гюйгенса встречаются в магазинах «Медицинские приборы» как запасные окуляры для микроскопов ($F_{\text{экв}} = 16,5, 25$ и 36 мм). Окуляры Кельнера применяются в биноклях, теодолитах, стереотрубах.

В окуляре системы Кельнера, но при тех же оптических соотношениях (только с диаметром диафрагмы $0,25-0,3$ от $F_{\text{экв}}$) возможна замена ахроматизированной глазной линзы на простую плосковыпуклую или двоякоразновыпуклую (плоскостью или меньшей выпуклостью к глазу), но равной оптической силы. Правда, это будет некоторым отступлением от обычной системы Кельнера — в дальнейшем мы ее условно назовем «упрощенной».

Однако эти упрощения лишь несколько снижают полезный угол зрения до $30-40^\circ$, в остальном все остается в силе, поэтому есть смысл производить такое упрощение; особенно это рационально при

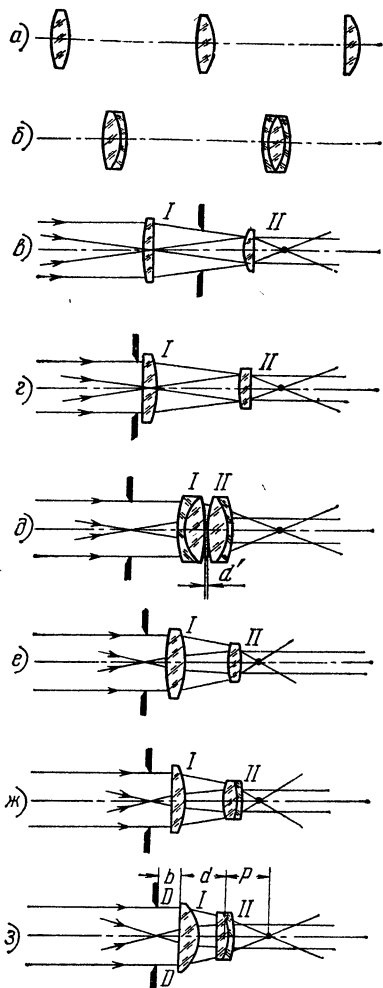


Рис. 148. Схемы окуляров. Кругом отмечено положение выходного зрачка.

Таблица IV

Тип окуляра и его компоненты (см. рис. 148)	Используется как	Величина полезного поля зрения (в градусах)	Соотношения					
			$\frac{F_I}{F_{\text{экв}}}$	$\frac{F_{II}}{F_{\text{экв}}}$	$\frac{d}{F_{\text{экв}}}$	$\frac{b}{F_{\text{экв}}}$	$\frac{D-D}{F_{\text{экв}}}$	$\frac{P}{F_{\text{экв}}}$
Одиночные линзы: двояковыпуклая; двояковогнутая; плоско-выпуклая (а)	Слабый окуляр	6—8	—	—	—	—	0,1	1
Клеевая ахроматизированная система: двойная (дуплет); тройная (триплет) (б)	Слабый и средний окуляр	10—12	—	—	—	—	0,2	0,8
Система Гюйгенса: I — плосковыпуклая линза; II — то же (в)	То же	25—30	2	3	1	—	0,25	0,25
Система Рамсдена: I — плосковыпуклая линза; II — то же (г)	Слабый окуляр	30—35	1	1	0,9	0,1	0,35	0,2

Симметричная система: I — ахроматизированный дуплет; II — то же (d)	Все категории	30—40	0,4	0,4	1	0,7—0,8	0,35	0,7—0,8
Система Кельнера (упрощенная схема): I — двоякообразно-пуклая линза; II — то же (e)	Сильный и средний окуляр	35—45	1,75	1,33	0,75	0,15	0,35	0,3
«Японская» система: I — плосковыпуклая линза, II — ахроматизированный дуплет (ж)	Сильный окуляр	40—45	1,5	2,0	0,5	0,3	0,5	0,45
Система Кельнера: I — двоякообразно-пуклая линза или плосковыпуклая; II — ахроматизированный дуплет (з)	Слабый и средний окуляр	45—55 до 60	1,75	1,33	0,75	0,15	0,6	0,3

изготовлении средних и отчасти сильных окуляров (см. табл. IV, е).

Симметричная система окуляра довольно распространена. На ней необходимо остановиться подробнее, так как она не рассматривалась в главе V.

В симметричной системе как полевой, так и глазной компоненты одинаковы по составу линз и оптической силе. Два клееных двойных ахроматизированных блока расположены близко (0,5—1 мм) и обращены «положительными» линзами склеек друг к другу. В этой системе отрезок от центра системы до диафрагмы ($D-D$), т. е. фокальной плоскости, равен расстоянию выходного зрачка (P). Он сравнительно велик по отношению к эквивалентному фокусу окуляра (0,7—0,8). Поэтому эта система очень удобна при сборке средних и сильных окуляров. В этой системе хроматическая и сферическая аберрации хорошо исправлены, полезное поле зрения достигает 40—45°.

Готовых симметричных окуляров в продаже практически не бывает, но из имеющихся в продаже или встречающихся у любителя одинаковых ахроматизированных клееных пар можно составить хорошие симметричные окуляры. Из самодельных окуляров симметричные являются наилучшими для светосильных объективов (табл. IV, д).

Надо отметить, что очень хорошие результаты дает составление симметричных окуляров из тройных клееных систем — триплетов, не уступающих по качеству и углу зрения лучшим системам и встречающихся в виде лупы 10× или 20×.

Компоненты этого окуляра также располагаются более выпуклой стороной один к другому с зазором, не допускающим касания составляющих, т. е. в 0,5—1 мм.

В результате испытания и исследования нескольких окуляров от иностранных оптических приборов (в частности, японского производства) уточнена и проверена еще одна довольно простая, но очень хорошая система. Условно ее можно назвать «японской». Она состоит из одиночной полевой двоякоразновыпуклой линзы (обращенной большей выпуклостью к глазной системе) и клееной ахроматической пары глазной системы (с несколько большим фокусом, чем у полевой линзы), довольно близко расположенной к полевой линзе. Следовательно, эту несложную по подбору компонент и по

сборке систему можно рекомендовать за основу, особенно для средних и сильных окуляров, так как выходной зрачок в ней вынесен достаточно далеко (см. табл. IV, ж).

Итак, для изготовления окуляров необходимы подходящие отдельные линзы и клеенные пары. В продаже иногда встречаются некондиционные и некомплектные детали оптической промышленности и готовые запасные окуляры, объективы микроскопов и пр. Конкретно для наших целей вполне пригодны плосковыпуклые, двояковыпуклые линзы, клеенные ахроматизированные пары, малых и средних размеров и с возможно меньшим фокусом. Можно использовать часть линз и блоков от имеющихся в продаже комплектов фотографических объективов, как например, «Индустар-50», «Индустар-23», объективы театрального бинокля «ОТБ» и др.

При обмере фокусного расстояния, диаметра, толщины компонент будущих окуляров для двояковыпуклых линз и клееных пар расстояния берутся от центра их толщины.

На листе бумаги надо вычертить все элементы, проставить все расстояния и на основании чертежа (желательно в большом масштабе и на миллиметровой бумаге) расположить все остальные и вспомогательные элементы окуляра. После этого можно приступить к подбору и механическим работам по изготовлению всех элементов и деталей окуляра: обойм, диафрагм, тубусов, вкладышей и т. д. в зависимости от избранной системы и возможностей любителя.

Для качественной и точной сборки окуляра необходимо некоторое механическое оборудование (например, небольшой токарный станок). Можно упростить решение задачи, если воспользоваться такими подручными материалами, как охотничьи гильзы (лучше цельнометаллические), подходящие металлические трубки и шайбы (часто встречающиеся в магазинах «Юный техник», «Пионер») и т. д.

Любой по сложности и составу компонент окуляр должен быть смонтирован и собран наиболее точно как в отношении оптических данных, так и по параллельности плоскостей компонентов между собой, соосности в самом окуляре и в телескопе в целом. Взаимное расположение деталей должно быть постоянным и жестким. Поэтому все элементы должны быть как-то закреплены

в обоймах, оправках, тубусах вполне определенного стандартного размера и диаметра.

Один из способов монтажа окуляров производится по так называемой насыпной системе (рис. 149, а); во внутреннюю полость корпуса в заранее известном порядке вкладываются (как бы насыпаются) все элементы окуляра — линзы в обоймах или без них, опорные кольца и втулки, диафрагмы, а затем все это прижимается

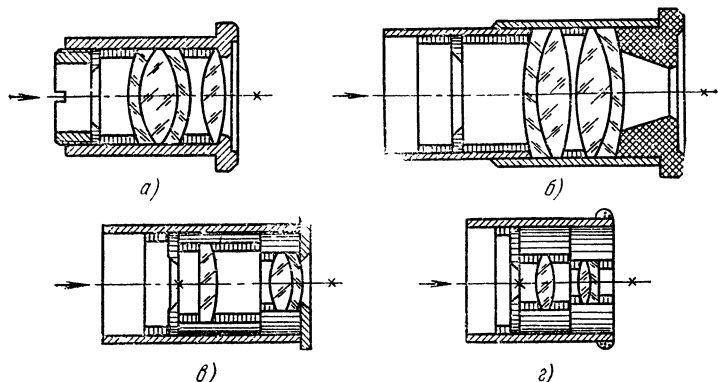


Рис 149. Различные системы и варианты монтажа окуляров: а — насыпная система с прижимающим кольцом (средний окуляр ортоскопической системы), б — система с запрессовкой с диаметром линз более 23 мм (слабый окуляр симметричной системы), в — система с запрессовкой в гильзу (средний окуляр системы Кельнера), г — система с запрессовкой в трубке (сильный окуляр «японской» системы).

кольцом-обоймой. Такая монтаж может быть рекомендована и при самостоятельном конструировании окуляров; правда, она требует хорошего токарно-винторезного станка.

Существует другая так называемая вкладывная система с запрессовкой колец и фиксирующих элементов. Хотя она и является наиболее простой в механическом исполнении, однако и она требует несложного оборудования, которым располагают как школьные механические мастерские, так и детские технические станции.

Все компоненты окуляров этой системы вкладываются в заранее подготовленную по размерам трубку (толстую шайбу), сделанную из эбонита, дюралюминия или латуни, и вместо ввинчивающегося прижимного кольца (как в насыпной системе) прижимаются сплошным подогнутым для тугой посадки кольцом. Далее смонтированные в этой «шайбе» элементы в свою очередь за-

прессовываются в подготовленную стандартного размера посадочную трубку. Если монтируется слабый окуляр, то в шайбе монтируется только глазная линза (или система линз), а после впрессовки ее в посадочную трубку и вставки соответствующих расчетам цилиндрических вкладышей также вкладывается полевая линза (или система линз), после чего все прижимается туго вставляющимся прижимным кольцом.

При сборке окуляров по этой системе нужна особая аккуратность и внимание, чтобы в собранном окуляре все элементы не болтались, не имели бы перекосов по оптической оси. В процессе сборки и вкладывания линз и элементов их правильное положение легко проверить. Для этого наблюдается отражение нити, находящейся над столом электролампы. Собираемый окуляр ставят на ровную плоскость стола (лучше на кусок стекла или пластмассы) под лампу и начинают медленно вращать. Если элементы собраны достаточно точно, то блики от лампы не будут описывать заметных круговых колебаний, если же блики «гуляют», необходимо повторить установку линз вновь, проверить тщательность изготовления элементов окуляра. Насыпная система в случае невозможности пользования станками может быть осуществлена домашними средствами с применением в качестве тубуса, например, охотничьих гильз крупных калибров (лучше цельнометаллических).

При сборке окуляров описанными способами необходимо отметить некоторые моменты и особенности сборки. Все слабые (длиннофокусные) окуляры имеют удлинённый направляющий тубус из-за значительных расстояний между компонентами и значительного выноса его фокальной плоскости. Иногда диаметр тубуса получается большим, чем посадочный размер трубки; в этом случае приходится делать специальный тубус, оканчивающийся трубкой стандартного размера (см. рис. 149,б).

Чем сильнее окуляр, тем меньше расстояние между компонентами, и у сильных окуляров ($F_{\text{злв}}$ менее 10 мм) оно настолько мало, что посадочную трубку приходится делать минимально короткой. Однако для устойчивости окуляра в окулярном узле телескопа длина трубки не должна быть меньше его диаметра. Для удобства наблюдений и фиксации глаза наблюдателя глазная часть окуляра или шайба с глазной линзой делается в виде фланца или раковины (наглазника) несколько большего

диаметра, чем посадочный, и часто с накаткой по ребру (для удобства смены). У сильных окуляров с малым вынесением выходного зрачка желательнее конструктивно вынести всю систему линз (особенно глазную) в сторону наблюдателя.

Все внутренние поверхности тубуса шайб и диафрагм необходимо покрыть матовым черным лаком или обычным лаком с добавлением порошка сажи или иной темной краски. На поверхности шайбы, обращенной к глазу, полезно отгравировать фокусное расстояние окуляра.

Для ограничения полезного неискаженного поля зрения окуляра в его фокальной плоскости устанавливается круглая диафрагма (на схемах окуляров указана буквами $D-D$). Она изготавливается из готовых подходящих шайб или высекается просечкой из металла, плотного картона и т. д. В окулярах, предназначенных для искаателей, на диафрагму наклеиваются клеем БФ визирные нити (перекрестье).

Желая помочь практическим советом любителям телескопостроения, не имеющим возможности выточить детали окуляра на токарном станке, приводим описание способа изготовления окуляров наиболее простыми средствами. Для этого необходимо запастись обрезками дюралюминиевых или плотных картонных трубок или несколькими охотничьими гильзами крупного калибра (16—12), обрезками и полосками плотного картона (прессшпана) и полосками из листового алюминия, латуни и пр.

В этом случае возможна компоновка и сборка окуляров из линз и компонент, не превышающих по размерам внутренние диаметры трубок или гильз.

При варианте окуляра с применением гильзы от охотничьего патрона в центре донышка (на месте гнезда для пистона) рассверливается отверстие для глазной линзы (или системы линз) несколько меньшего диаметра, чем диаметр самой линзы. С внутренней стороны из полости картона, свернутой в рулончик, вставляется шайба с отверстием по размеру линзы. Далее вкладывается глазная линза или клееная пара до упора в донышко и линза прижимается распорным кольцом, согнутым из полоски металла в стык. Затем из тонкого картона, свернутого в несколько слоев, делается вставка до диаметра полевой линзы. Также из картона или листового металла делается цилиндрическая вставка для опоры по-

левой линзы. После укладки ее вновь вставляется колечко, определяющее расстояние до диафрагмы, далее шайба диафрагмы и в заключение плотное прижимное кольцо (рис. 149, в).

Примерно так же собирается окуляр в простой, по размерам отрезанной трубке, только глазная линза в картонной шайбе фиксируется прижимными колечками из металла с обеих сторон. Глазная сторона окуляра получается без фланца, но его можно сделать из валика намотанных с краю трубки ниток, пропитанных клеем БФ (рис. 149, г).

Таким примитивным способом можно собрать ряд окуляров от простейшего, из клееной лупы ($10\times$ или $20\times$), вынутой из пластмассового футляра (корпуса), и до любой ранее рассмотренной сложной системы, но при вставке компонент надо чаще и внимательнее проверять их центровку.

В таблице V приводятся данные окуляров для двух любительских телескопов-рефлекторов. Практически желательно иметь минимальный комплект из трех окуляров из числа описанных выше (см. выделенные в таблице цифры).

Т а б л и ц а V

Фокусное расстоя- ние оку- ляра, мм	Кратность окуляра	Объектив 100 мм; $F=800$ мм		Объектив 200 мм; $F=1800$ мм	
		общее увеличе- ние	диаметр выходного зрачка, мм	общее увеличе- ние	диаметр выходного зрачка, мм
36	7	22	4,5	61	3,3
20	12,5	40	2,5	90	2,0
15	16	54	1,8	120	1,5
9	28	90	1,1	200	1,0
6	45	135	0,75	300	0,65
4,5	56	180	0,6	400	0,5

VI. ТРУБА-КАРКАС ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА

Основное требование, предъявляемое к трубе рефлектора, — жесткость конструкции, — дополняется стремлением к уменьшению ее веса. Поэтому у современных телескопов-рефлекторов труба или решетчатая,

или содержит прочные продольные стержни, скрепляющие сплошные узлы конструкции.

Автором разработана и испытана конструкция трубы: каркаса, изготовленной в основном из простых материалов (рис. 150). Труба содержит отдельные секции, соединенные распорными рейками и стянутые натяжными устройствами — тендерами.

Труба может состоять из трех секций, как на рис. 150; тогда необходимы три кольца, из которых среднее крепится к штативу. Она может состоять и из двух секций, как на рис. 151. В таком случае нужны два кольца — к штативу крепится заднее кольцо, а на переднем кольце укрепляется окулярная часть ньютоновского рефлектора.

В качестве материала для колец может быть использована алюминиевая кастрюля подходящего диаметра. Надо, чтобы ее диаметр превышал диаметр зеркала на 30—50 мм. Кастрюля должна иметь возможно более толстые стенки.

Вначале с кастрюли нужно удалить ручки, что надо делать очень осторожно, чтобы не испортить ее форму. Лучше всего осторожно спилить полукруглые головки заклепок, пользуясь напильником. Затем кастрюлю надо разрезать на части, для чего ее надо соответствующим образом разметить. Делается это установкой карандаша на должной высоте и вращением кастрюли: на ней получается линия разреза. Из верхней части кастрюли делается верхнее кольцо, на котором устанавливается окулярный узел. Из нижней части кастрюли, вместе с ее дном, изготавливается нижнее кольцо для крепления оправы главного зеркала. Из другой такой же кастрюли с отрезанным дном изготавливают среднее широкое кольцо.

Разрезать размеченные заготовки лучше всего обычной слесарной ножовкой. Резать надо постепенно, перемещая разрез по поверхности кастрюли по малой хорде от себя, поворачивая кастрюлю на себя. Если пилить, не поворачивая кастрюлю, то разрез получится грубым и можно деформировать край распила. Для удобства заготовку хорошо надеть на какой-либо выступ, бревно или брусок, зажатый в тиски. Эту работу лучше производить с помощником. После того как кольца будут отпилены, края их следует выровнять и зачистить напильником.

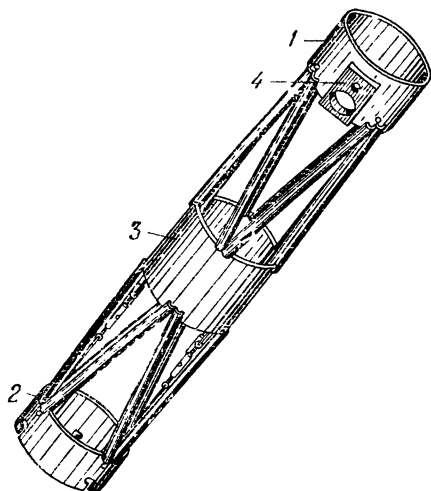


Рис. 150. Общий вид трубы-каркаса: 1—верхнее кольцо, 2—нижнее кольцо, 3—среднее кольцо, 4—основание для крепления окулярной части.

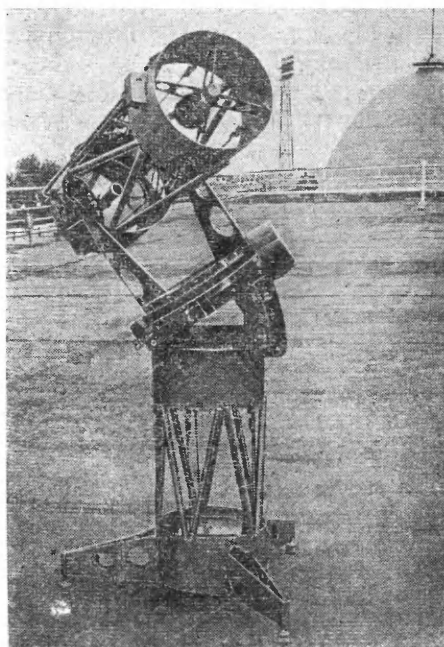


Рис. 151. Самодельный рефлектор УПТР-10 на вилочной установке (А. Н. Подъяпольского) с использованием каркасных конструкций.

Кольца скрепляются друг с другом при помощи распорных реек или трубок. Для точной фиксации концов распорок на обоих краях среднего кольца выпиливаются плоским напильником пазы на глубину около 5 мм (1 на рис. 152). Ширина их должна быть равной

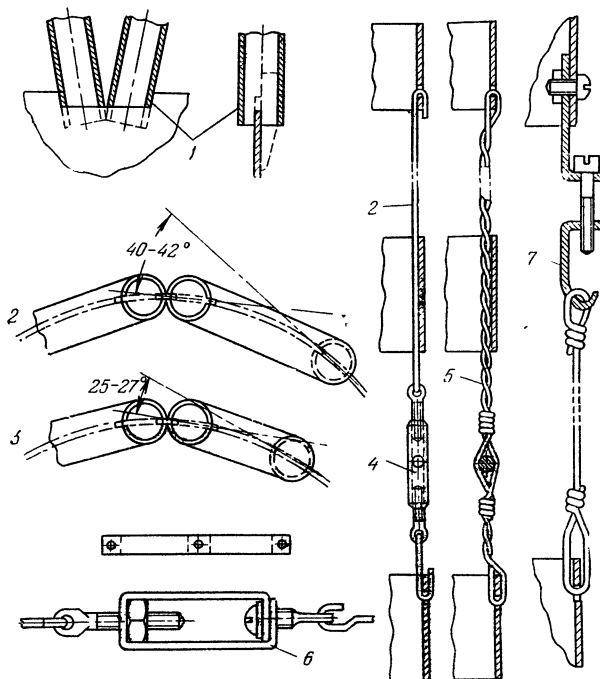


Рис. 152. Детали и узлы: 1 — посадка распорок «верхом» на край кольца, 2 — углы пропилов торцов распорок при четырехпарной системе, 3 — то же при шестипарной системе; 4 — стяжка в сборе с тендерами, 5 — то же для стяжки с воротком, 6 — скоба-затяг и ее развертка, 7 — полускоба-затяг.

удвоенной ширине распорной трубки или рейки. Их размещение зависит от выбранной конструкции, а именно, в случае четырех парных узлов распорок через 90° , а в случае шести узлов — через 60° . Такие же самые пазы надо сделать на одном крае верхнего кольца и на одном крае нижнего (на тех краях, которые будут обращены к среднему кольцу).

На данном этапе подготовка колец заканчивается. Теперь надо приготовить распорки нужной длины. Они являются важной частью конструкции и на их аккуратное изготовление надо обратить особое внимание.

Лучше всего сделать распорки из дюралюминиевых трубок с толщиной стенок до 2 мм и наружным диаметром 14—16 или 22—26 мм. Можно использовать для этой цели и стальные тонкостенные трубки несколько меньшего диаметра с толщиной стенок до 1 мм.

Перед выбором длин распорок рекомендуется вычертить на бумаге схему телескопа и сделать следующие расчеты. Во-первых, надо установить его общую длину и положение окулярной части. Во-вторых, надо рассчитать, где будет находиться центр тяжести всей трубы в сборе, с тем чтобы он расположился в средней части широкого кольца. После того как труба будет укреплена на штативе, передняя и задняя части должны уравниваться друг друга. В соответствии с этим мы и выбираем длины распорок.

Если не удастся достать металлические трубки, то можно заменить их рейками из совершенно сухого прочного дерева без сучков и изъянов. Для телескопа среднего размера поперечное сечение реек берется примерно 10×12 , 12×15 мм.

В торцах распорок делаются пропилы для их посадки на кольца. В круглых распорках пропилы делаются с некоторым смещением от центра торца, а в прямоугольных по диагонали сечения. Эти пропилы делаются на противоположных концах каждой распорки под некоторым углом. При четырех парах распорок угол между противоположными пропилами равен 40° , а при шести — 25° (2 и 3 на рис. 15). Глубина пропилов 6—8 мм.

Схема расположения распорок изображена на рис. 153.

Распорки с кольцами не скрепляются, поэтому необходимы еще стяжки, которые помогут создать единую жесткую конструкцию. Для их укрепления нужно сделать в кольцах отверстия. Концы стяжек, загнутые в виде крючков, пропускаются в эти отверстия; сами стяжки проходят внутри среднего кольца. Конструкция стяжек может быть разнообразной (4—7 на рис. 152). Для изготовления стяжек применяется стальная пружина (типа ОВС) или телеграфная проволока диаметром 3—4 мм. Если проволока мягкая (отожженная), то ее диаметр должен быть больше 5—6 мм.

Тендеры служат для натягивания стяжек. Различные виды тендеров изображены на рис. 152. Любитель легко в них разберется по чертежу.

Основанием окулярного узла служит прямоугольная пластина из текстолита, дюралюминия или сухого твердого дерева. Внутренняя сторона пластины должна иметь форму вогнутого цилиндра, чтобы она плотно прилегала к наружной поверхности кольца.

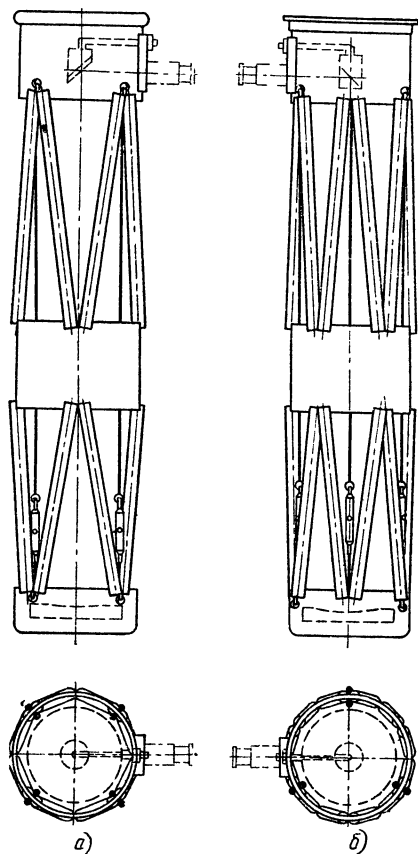


Рис. 153. Варианты трубы-каркаса, а — с четырехпарной системой распорок; б — с шестипарной системой распорок.

Коснемся теперь порядка сборки конструкции. Берем нижнее кольцо (с дном) и на край кольца (в каждый паз) насаживаем пару распорок (рис. 153). Далее вставляем среднее кольцо пазами в прорези на верхних концах распорок. Так размещаем все пары распорок. После предварительной посадки всех распорок нужно, наложив на среднее кольцо дощечку (или кусок толстой фанеры), несильными ударами молотка по ней осадить кольцо окончательно, чтобы пазы вошли до упора в соответствующие прорези.

В такой же последовательности производится сборка верхнего ряда распорок и верхнего кольца. Теперь труба уже имеет достаточную жесткость, и ее можно переворачивать, класть на бок.

Далее надо установить стяжки и при помощи тендеров поочередно натянуть их. Остается покрасить трубу.

Такая конструкция трубы с успехом использована автором в телескопе УПТР-10 (см. рис. 151).

VII. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В главе IX был подробно описан принцип устройства экваториальной установки. Здесь мы опишем процесс конструирования экваториальной установки, которую можно создать своими силами. Правда, это требует использования хотя бы простейшей механической мастерской, так как придется изготовить ряд более или менее сложных деталей.

На рис. 99 изображена экваториальная установка фабричного изготовления. Та установка, которую мы намерены создать, мало чем отличается от фабричной.

Начнем с основания штатива. Это прочная, металлическая, в крайнем случае деревянная, колонна, с тремя ножками-опорами, в которых предусмотрены установочные винты. Они служат, как мы знаем, для регулировки штатива по вертикали.

Эта часть штатива может быть, конечно, изготовлена из прочного дерева, но лучше сделать ее из обрезка тонкостенной металлической трубы. К нижней части трубы приваривается выточенный стальной фланец или сварная пластина с креплениями для ножек штатива. В верхний конец трубы забивается деревянная пробка, часть которой выступает над трубой. На ней очень аккуратно и по возможности точно делается срез под углом φ к стойке.

К этому срезу прикрепляется планка (1 на рис. 154), на которой устанавливаются подшипники часовой оси 2. В простейших установках эти стойки-подшипники делают из толстого текстолита (можно из дельта-древесины толщиной 15—20 мм).

Отверстия для пропуска оси сверлят и окончательно обрабатывают (или растачивают на станке) для прохода оси с некоторым трением, но без люфта.

Крепление стоек к планке производится с помощью винтов с резьбой, пропущенных через отверстия с нижней стороны планки.

Еще лучше и надежнее использовать шарикоподшипники (рис. 155). В таком случае в стойках надо сделать гнезда для подшипников. Для придания подшипникам неизменного положения надо изготовить распорную

трубку 1 (рис. 155). Ее внутренний диаметр должен несколько превышать диаметр оси, так чтобы она свободно проходила внутри трубки, но распирала подшипники, не давая им выпадать из гнезд.

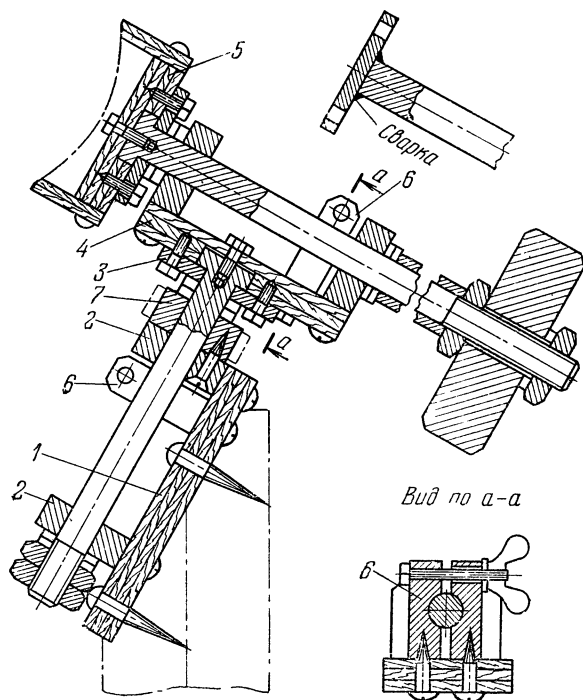


Рис. 154. Экваториальная установка с применением металла, текстолита и дельта-древесины (оси металлические).

Следующая забота — изготовление осей. Здесь можно предложить несколько вариантов.

Простейшие варианты таковы. Можно подобрать длинный стяжной болт диаметром 16—20 мм и достаточно чисто обработать его поверхность на станке, обточив и отшлифовав. Можно использовать не очень толстые газовые или водопроводные трубы (до 18—22 мм), также проточив их поверхность на станке. К верхнему концу оси надо приделать (приварить) фланец, диаметр которого существенно превосходит диаметр оси (3 на

рис. 154). Еще лучше выточить ось из соответствующей стальной болванки; тогда не понадобится приваривать к ней фланец, так как можно выточить ось нужной формы.

К этому фланцу должна быть прикреплена площадка, на которой будут находиться стойки подшипников оси склонений (4 на рис. 154). К этой площадке, которая может быть изготовлена из металла или прочного дерева, прикрепляются две стойки — подшипники оси склонений.

Хорошо и здесь использовать шарикоподшипники. Тогда понадобится и вторая распорная трубка.

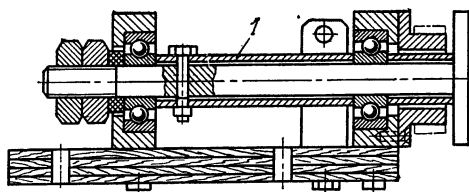


Рис. 155. Применение шарикоподшипников для осей установки.

Ось склонений значительно длиннее часовой оси. На одном ее конце крепится платформа 5 (рис. 154) для крепления трубы телескопа. Второй конец оси служит для размещения противовеса, который можно передвигать вдоль оси. Для этого нужно иметь фиксирующие гайки. Чтобы ось не выпадала вместе с трубой телескопа из подшипников, на ось устанавливается дополнительная распорная трубка.

Порядок сборки узла осей достаточно ясен из рис. 154.

Труба телескопа крепится к платформе 5 таким образом, чтобы она лежала в ней плотно. Поэтому надо приспособить продольные стоечки либо, что еще лучше, придать платформе вогнутость в виде цилиндра.

Описанная установка еще не полна. Необходимы приспособления для фиксации трубы. Для этого служат устанавливаемые на платформах фиксаторы 6. Оси проходят через них и при помощи болтов с барашками могут «зажиматься».

Теперь установка готова и может служить для юстировки телескопа, его испытания, а в дальнейшем и работы с ним.

Однако желательно устройство еще по крайней мере одного приспособления, а именно, механизма микрометрических движений по прямому восхождению. Для этого к верхней стойке часовой оси надо привернуть тремя винтами круглую бобышку 7 высотой 25—30 мм и диаметром 40—50 мм, выточенную из текстолита или дельта-древесины.

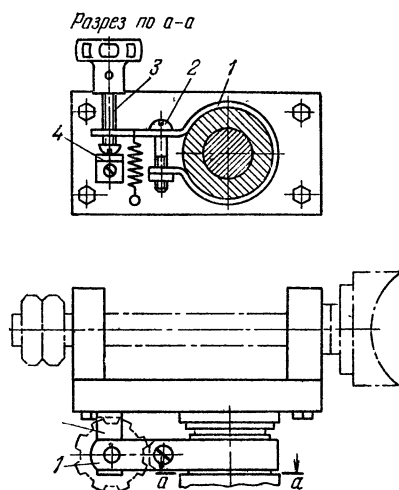


Рис. 156. Механизм «тонких» движений телескопа по часовой оси.

В бобышке должно быть сделано сквозное отверстие, чтобы через него проходила часовая ось. Пока бобышка не связана ни с часовой осью, ни с платформой, несущей подшипники оси склонений. Часовая ось будет свободно вращаться относительно бобышки (рис. 156). Теперь охватим бобышку «рычагом» 1; этот рычаг имеет форму петли, полностью охватывающей бобышку. Он скользит по бобышке, но если его стянуть болтом 2, то он сжимается и прочно охватывает бобышку. Тем самым он закрепляет положение часовой оси, чем заменяет фиксатор.

Вблизи оконечности рычага должно быть отверстие с винтовой нарезкой, в которое следует пропустить винт с маховичком 3 и сделать упор 4. Как винт, так и упор

наглухо прикреплены к платформе несущей стойки с подшипниками оси склонений.

Таким образом, с помощью болта 2 труба после наведения на светило закрепляется, но может плавно двигаться вместе с часовой осью при вращении маховичка. Так, можно микрометрически перемещать трубу вокруг полярной оси, следя за суточным вращением небесной сферы. Надо только так установить эти приспособления, чтобы вращение маховичка двигало трубу в сторону суточного вращения. Кроме того, введена еще и пружина, которая позволяет в случае надобности перемещать трубу и в обратную сторону.

К маховичку можно придать длинный карданный ключ, с тем чтобы управлять микрометрическими движениями от окуляра.

Петлю рычага лучше всего изготовить из стальной гибкой полосы. Аналогичное приспособление можно сделать и для оси склонений.

Несравненно удобнее работать с телескопом, у которого есть часовой механизм, поворачивающий трубу вслед за суточным движением небесного светила. Более того, для ряда наблюдений (фотографических, фотоэлектрических и даже для приема экскурсий) это необходимо. Для этого надо достать или изготовить «червячную пару»: колесо с червячной нарезкой и стержень — червяк. Изготовление такой «пары» — задача не простая, хотя бы потому, что на червячном колесе и червяке должна быть нанесена винтовая нарезка с большой степенью точности. Для обеспечения одного полного оборота часовой оси в течение звездных суток к червячной паре необходимо рассчитать и сделать еще ряд ступеней снижения оборотов примененного электромотора. Способ крепления червячной пары изображен на рис. 157. Не входим в дальнейшие подробности, так как опытный любитель-конструктор сам найдет наилучшее решение задачи.

Остановимся еще на конструировании вилочной установки (рис. 158, см. также рис. 151).

Автору удалось найти ряд простых и удачных решений в компоновке некоторых несущих узлов установки универсального переносного телескопа-рефлектора (УПТР-10).

1. «Перья» вилки сделаны из сравнительно тонкого листового дюралюминия (толщиной 4—5 мм), но

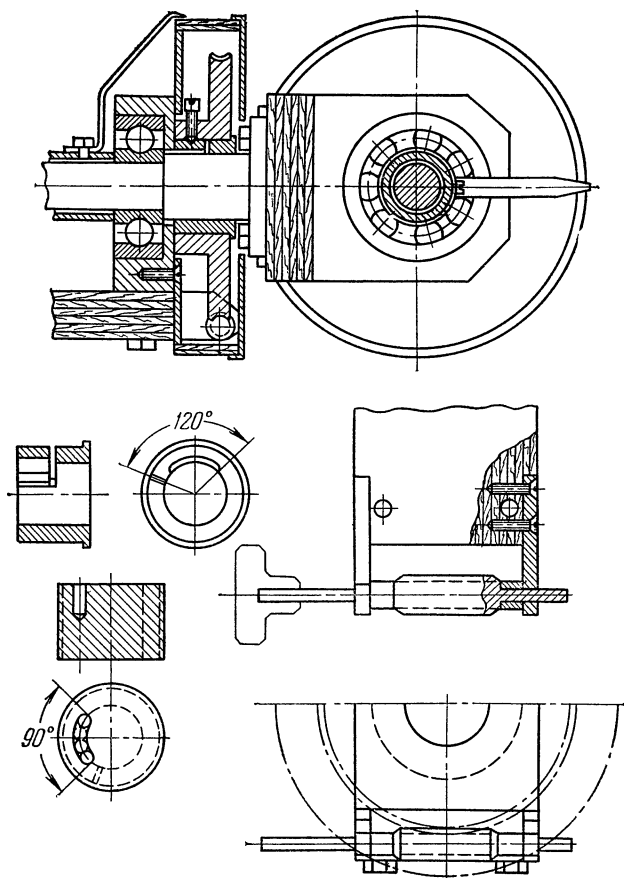


Рис. 157. Устройство червячной передачи микрометрических движений с фрикционом.

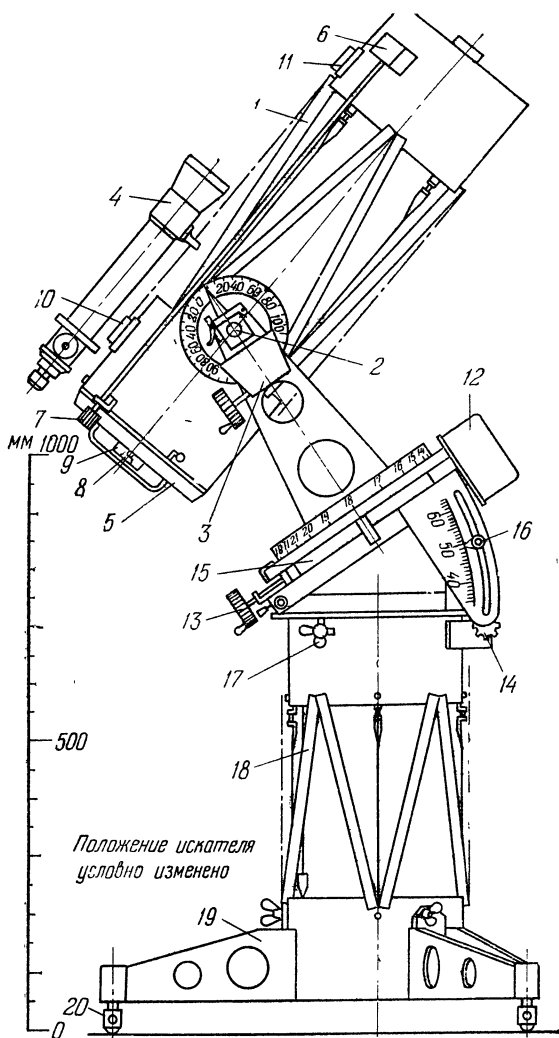


Рис. 158. Конструктивный чертеж телескопа УПТР-10: 1—труба, 2—полуоси и подшипники вращения вокруг оси склонений, 3—механизм и ручка управления оси склонений, 4—искатель, 5—чашка с оправой главного зеркала, 6—механизм для перемещений вторичного зеркала, 7—ручка фокусировки, 8—кнопки открытия крышки главного зеркала, 9—окулярная часть для системы Кассегрена, 10—окулярная часть для системы Ньютон, 11—окулярная часть системы Нессмита, 12—электропривод часовой оси, 13—ручка управления вращением вокруг часовой оси, 14—устройство для коррекции положения часовой оси по азимуту (для установки в меридиане), 15—подшипник качения часовой оси, 16—устройство для установки телескопа под нужным углом широты места наблюдения, 17—фиксирующие зажимы узла осей на колонне, 18—колонна установки, 19—съемные опоры, 20—регулирующие винты установки по отвесу или ватерпасу.

благодаря приданию им цилиндрической формы их жесткость не уступает полый сварной или специально профилированной конструкции.

2. Круглое, профильное основание вилки скреплено с рамкой промежуточного узла посредством роликового подшипника большого размера (внутренний диаметр 205 мм). Это позволило отказаться от традиционной полярной оси (в конструкционном смысле). Благодаря большой опорной базе, высокой точности ролико-подшипника и при его фактической нагрузке в сотни раз меньше расчетной устойчивость телескопа по оси прямого восхождения оказалась вполне достаточной.

3. Узел сочленения с колонной штатива выполнен в виде двух шарнирно соединенных рамок (из дюралюминиевых уголков) со «щеками» для фиксации наклона (по углу φ), что обеспечило хорошую устойчивость узла.

4. Колонна штатива имеет большой диаметр (более 300 мм), исключая изгибы и вибрации, и выполнена по тому же принципу, как и труба-каркас.

5. При необходимости сделать телескоп переносным колонна штатива должна быть снабжена тремя опорами, расположенными по окружности до 800 мм в диаметре. Они выполнены в виде «анкерных» съемных ножек, с регулируемыми точками опоры.

Весь телескоп может быть быстро разобран на три части (тубус, узел осей с вилкой и колонна штатива) и удобно уложен в специальный переносный ящик. Оптика и принадлежности размещаются при этом в отдельном небольшом ящике. При стационарном использовании инструмента нижняя рамка переходного узла привинчивается к шпилькам постоянной колонны в будке.

Некоторые технические данные телескопа УПТР-10: Действующий диаметр (отверстие) главного параболического зеркала 246 мм (10 дюймов).

Относительный фокус $V = 4 (F_{\text{главн.}} = 985 \text{ мм})$.

Эквивалентный относительный фокус системы Кассегрена $V_{\text{экв}} = 10 (F_{\text{экв}} = 2500 \text{ мм})$.

Предусмотрено использование фокуса Ньютона для фотографирования. В комплекте имеется насадка с призмой полного внутреннего отражения для работы по схеме Несмита. Телескоп снабжен часовым механизмом суточного движения с электроприводом (12—16 вольт постоянного тока или 127—220 вольт переменного).

Возможны и другие варианты конструкции узлов и деталей. Так, например, лучшее решение для конструкции осей — это применение незаклинивающегося конуса (особенно для часовой оси). В качестве «сырья» для такого конуса хорошо использовать конусный газопроводный кран большого размера (чугунный или бронзовый). Такой кран был использован московским любителем С. К. Савиным для хорошей самодельной установки 220-миллиметрового рефлектора.

VIII. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ, РЕКОМЕНДОВАННЫЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЛЕСКОПА

Среди многочисленных точных фотометрических стандартов особо выделяется тот, который создал Аргю, изобразив для этой цели созвездие Волос Вероники. Звездные величины определены фотоэлектрическим способом.

Преимущества этого стандарта состоят в следующем. Он охватывает довольно протяженный участок неба, в котором нет скученности звезд. Это дает возможность определять ошибку поля при фотографических наблюдениях. Звезды обладают весьма разнообразным блеском. Звездные величины V , близкие к визуальным, равномерно охватывают интервал от 6,54 до 15,20, что позволяет определить проникающую силу любого доступного любителя рефлектора.

Показатели цвета $B-V$ (близкие к разности фотографической и визуальной звездных величин) распределены от +0,11 до +1,61, а это позволяет определить коэффициент цветности c в формуле

$$m = V + c(B - V).$$

Определены также цвета $U-B$ (ультрафиолетовые минус синие).

Воспроизводя карту стандарта (рис. 159), мы для удобства изменили нумерацию звезд по сравнению с нумерацией Аргю. Кружочками обведены не переменные звезды, а звезды стандарта. Яркая звезда в центре стандарта имеет экваториальные координаты эпохи 1855 года:

$$\alpha = 12^{\text{h}}15^{\text{m}}, 2, \delta = +26^{\circ}40'.$$

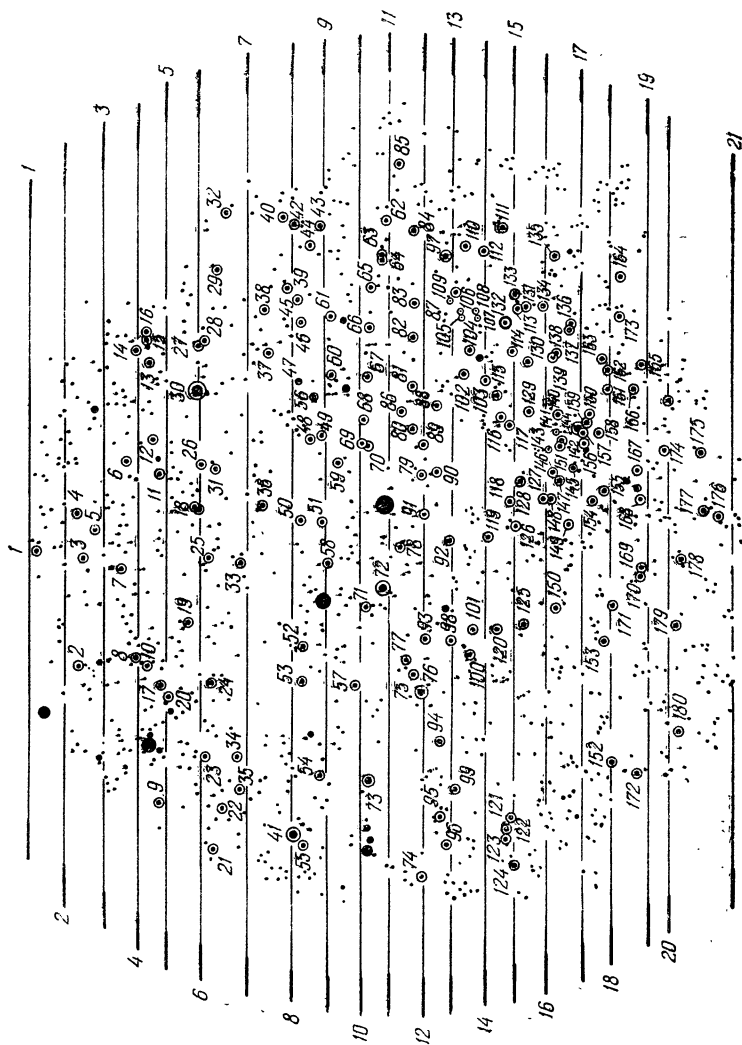


Рис. 159. Карта стандарта в созвездии Волос Вероники.

Фотометрический стандарт в созвездии Волосы Вероники

№	Полоса	V	$B-V$	$U-B$	Примечание
1	1	11,75	0,66	0,10	п
2	2	9,67	1,09	0,99	ц
3	2	12,44	0,62	0,04	п
4	2	8,45	1,42	1,71	ц
5	2	11,47	0,54	0,05	п
6	3	12,58	0,53	-0,05	п
7	3	12,89	1,43	1,22	ц
8	3	11,26	0,57	0,00	п
9	4	12,25	0,55	-0,01	п
10	4	12,81	0,57	-0,01	п
11	4	14,50	0,28	-0,10	ц
12	4	12,01	0,64	0,04	п
13	4	12,25	0,54	0,11	п
14	4	12,66	0,62	0,20	п
15	4	13,47	1,47:	1,28	ц
16	4	12,41	0,63	0,11	п
17	4	8,36	0,44	-0,04	—
18	5	12,10	0,64	0,05	п
19	5	12,56	0,65	0,19	п
20	5	9,75	0,80	0,29	ц
21	6	10,78	0,89	0,54	ц
22	6	12,42	0,44	-0,10	п
23	6	12,90	0,52	-0,09	п
24	6	11,89	0,59	0,03	п
25	6	9,11	0,48	0,03	
26	6	8,64	0,95	0,71	ц
27	6	10,68	0,52	0,05	п
28	6	12,82	0,60	-0,05	п
29	6	11,80	0,55	-0,02	п
30	6	7,86	1,34	1,61	ц
31	6	9,30	0,59	0,05	п
32	7	11,16	0,47	-0,02	п
33	7	12,86	0,48	-0,01	п
34	7	11,08	0,44	-0,02	п
35	7	11,30	0,46	-0,05	п
36	8	12,67	0,57	0,02	п
37	8	12,46	0,89	0,49	ц
38	8	10,82	0,95	0,74	ц
39	8	12,38	1,04	0,91	ц
40	8	12,65	0,98	0,88	ц
41	8	6,54	0,16	0,13	ц
42	9	9,87	0,65	0,21	ц
43	9	12,32	0,60	-0,01	
44	9	12,43	0,48	-0,02	
45	9	7,58	0,45	0,00	
46	9	11,49	0,90	0,57	ц
47	9	10,38	0,62	0,03	

№	Полоса	V	$B - V$	$U - B$	Примечание
48	9	11,46	1,10	0,84	ц
49	9	12,26	0,65	0,16	
50	9	12,50	0,66	-0,02	п
51	9	12,64	0,53	0,05	п
52	9	12,34	0,48:	0,02	п
53	9	12,92	0,65	0,18	п
54	9	11,92	0,57:	-0,04	п
55	9	13,83	0,32	-0,13	ц
56	9	12,50	0,62	0,04	п
57	10	9,30	0,46	-0,03	
58	10	10,37:	1,19	1,24:	ц
59	10	12,08	0,59	0,01	
60	10	13,34	0,88	0,45:	ц
61	10	11,70	0,94:	0,55	ц
62	11	14,27	0,71:	0,26:	ц
63	11	14,31	0,95	0,46	ц
64	11	14,43	0,78	0,63	ц
65	11	12,58	1,61	1,46	ц
66	11	13,00	0,62	0,12	
67	11	11,26	0,98:	0,80	ц
68	11	9,11	0,11	0,12:	ц
69	11	10,24	0,56	0,05	
70	11	10,95	0,53	-0,01	
71	11	12,38	1,14	1,21:	ц
72	11	6,69	0,22	0,05	ц
73	11	6,71	0,19	0,09	ц
74	12	11,03:	0,51	0,02	п
75	12	8,24	1,09	1,07	ц
76	12	12,63	0,49:	0,01:	п
77	12	12,58	0,54	-0,02	п
78	12	12,40	0,49	-0,03	п
79	12	9,55	0,44	+0,04	
80	12	8,06	1,06	0,95	ц
81	12	12,00	0,58	0,01	
82	12	10,34	0,41	-0,03	
83	12	13,53	1,10	+1,02	ц
84	12	11,26	1,17	0,98:	ц
85	12	8,08	0,40	-0,05	
86	12	9,05	0,57	0,05	
87	13	13,53	0,50	0,03	
88	13	11,70	0,85	0,42	ц
89	13	10,27	0,53	-0,02	
90	13	10,66	0,36	-0,07	
91	13	10,47	0,71	0,27	ц
92	13	12,27	1,21	1,32	ц
93	13	10,28	0,29	0,03	ц
94	13	11,94	0,46	0,00	п

№	Полоса	V	B - V	U - B	Примечание
95	13	12,84	0,62	0,02	п
96	13	12,96	0,52	0,01	п
97	13	7,85	0,35	-0,03	
98	13	8,13	0,52	0,01	
99	14	12,61	1,50	1,33	ц
100	14	12,82	0,61	0,11	п
101	14	13,81	0,31	0,03	ц
102	14	14,72	0,68	0,21	
103	14	13,17:	0,91	0,73	ц
104	14	13,37	0,89	0,50	ц
105	14	12,25	1,03	0,82	ц
106	14	13,51	0,59	0,07	
107	14	11,29	0,71	0,29	ц
108	14	12,89	0,59	0,10	п
109	14	14,61	0,94:	0,54	ц
110	14	14,40	0,62	0,29	
111	15	12,32	0,51	-0,01	п
112	15	12,80	1,10:	0,63	ц
113	15	14,09	0,90	0,49	ц
114	15	11,35	0,44	-0,03	
115	15	13,40	0,55	0,03 :	
116	15	13,44	1,26	1,02:	ц
117	15	12,24	0,64	0,13	
118	15	11,61	0,88	0,54	ц
119	15	12,18	0,59	-0,06	п
120	15	12,65	0,40	-0,17	
121	15	15,58	1,36:	0,53	
122	15	12,55	0,44	-0,20	ц
123	15	14,77	1,34	0,84	ц
124	15	11,97	0,43	-0,05	п
125	16	12,59	0,58	0,00	п
126	16	13,71:	0,82	0,59	ц
127	16	11,29	1,40	1,15	ц
128	16	14,97	0,81:	0,15	ц
129	16	11,72	0,55	0,03	
130	16	10,05	1,14	1,13	ц
131	16	10,89	0,71	0,20	ц
132	16	14,19	0,82	0,26	ц
133	16	13,71	0,95	0,77	ц
134	16	14,74	0,64	0,00	
135	17	9,93	1,49	1,78	ц
136	17	12,33	1,00	0,57	ц
137	17	7,79	0,30	1,10	ц
138	17	12,19	0,61	0,03	п
139	17	12,51	0,78	0,33	ц
140	17	12,56	0,59	0,06	
141	17	13,12	0,62	0,18	

№	Полоса	V	B—V	U—B	Примечание
142	17	11,51	0,46	—0,01	
143	17	12,77	0,37	—0,01	ц
144	17	7,29	0,88	0,59	ц
145	17	13,02	0,99:	0,26	ц
146	17	12,33	0,51	—0,06	
147	17	10,35	0,90	0,52	ц
148	17	10,87	0,59	0,13	
149	17	10,57	1,09	1,03	ц
150	17	12,49	0,45	—0,14	п
151	17	11,50	0,57	0,04	п
152	18	10,10	0,80	0,41	ц
153	18	11,85	0,40	—0,03	п
154	18	14,60	0,58	+0,12	
155	18	14,73	0,87:	0,37:	ц
156	18	11,67	0,48	—0,06	п
157	18	14,69	0,71	0,35	ц
158	18	14,25	0,73	0,09:	ц
159	18	14,28	0,45	—0,29	ц
160	18	13,71	0,58	0,00	
161	18	11,84	0,55	0,00	
162	18	14,38	0,67	—0,03	
163	18	14,14	0,87	0,53	ц
164	19	12,07	0,59	0,09	п
165	19	14,16	1,11	0,89	ц
166	19	11,83	0,56	0,09	п
167	19	14,87	0,35	—0,22	ц
168	19	11,59	0,44	—0,05	
169	19	14,58	0,37	—0,17	ц
170	19	13,32:	0,33	—0,05	ц
171	19	11,21	0,51	0,09	п
172	19	11,65	1,26	1,24	ц
173	19	8,80	0,50	—0,03	
174	20	15,20:	0,46	—0,15	
175	21	8,90	0,46:	—0,03	
176	21	12,62	0,55	0,03	п
177	21	15,12	0,60	—0,10	
178	21	7,41	1,06	0,94	ц
179	21	14,55	—0,12	—0,05	ц
180	21	10,61	1,02	0,81	ц

Примечание. Звезды, отмеченные символом «п», рекомендуется использовать для определения ошибки поля; те же, которые помечены символом «ц», могут служить для определения цветности инструментальной системы.

ЛИТЕРАТУРА

- А р г у н о в П. П., Изохроматические системы телескопов со сферической оптикой, *Астрономический вестник*, том VI, № 4, «Наука», 1972.
- Б л а ж к о С. Н., Об установке параллактического штатива, *Астрон. Календарь на 1924 и 1925 гг.*
- В о к у л е р Ж., Тексеро Ж., Фотографирование небесных тел (для любителей астрономии), перев. с франц. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1967.
- Д и м и т р о в Г. и Б э к е р Д., Телескопы и принадлежности к ним, Гостехиздат, 1947.
- К у л и к о в с к и й П. Г., Справочник любителя астрономии, изд. 4-е, Физматгиз, 1971.
- К у л и к о в с к и й П. Г., М. В. Ломоносов — астроном и астрофизик, Физматгиз, 1961.
- Любительские телескопы. Сб статей под ред. М. М. Шемякина, «Наука», 1975.
- Любительское телескопостроение, вып. I. Сб. статей, составитель М. М. Шемякин, под ред. М. С. Навашина, «Наука», 1964.
- Любительское телескопостроение, вып. II. Сб. статей, составитель М. М. Шемякин, под ред. М. С. Навашина, «Наука», 1966.
- М а к с у т о в Д. Д., Теневые методы исследования оптических систем, ОНТИ, 1934.
- М а к с у т о в Д. Д., Оптические плоскости, их исследование и изготовление, 1934.
- М а к с у т о в Д. Д., Новые катадиоптрические менисковые системы, *Тр. Гос. оптич ин-та*, т. XVI, вып. 124, 1944.
- М а к с у т о в Д. Д., *Астрономическая оптика*, Гостехиздат, 1946
- М а к с у т о в Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики, Гостехиздат, 1948.
- М е л ь н и к о в О. А., С л ю с а р е в Г. Г., М а р к о в А. В., К у п р е в и ч Н. Ф., Современный телескоп, «Наука», 1975.
- М у р а т о в С. В., *Астрономическая труба из очковых стекол*. *Астрон. Календарь на 1946 г.*
- Н а в а ш и н М. С., С самодельным коронографом в Ак-Булаке, «Мироведение», № 2, 1937.
- Н о в и к о в И. Д., Ш и ш а к о в В. А., Самодельные астрономические инструменты и наблюдения с ними. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1965.

- Подъяпольский А. Н., Любительские телескопы. «Наука и жизнь», № 6, 1973, раздел «Переписка с читателями», стр. 126—129.
- Раскин Н. М., Выдающийся русский техник-новатор И. П. Кулибин, Изд. Всесоюзн. о-ва по распротр. политич. и научных знаний, 1951.
- Селешников С. И. Александр Андреевич Чикин, «Земля и Вселенная», № 4, 1966.
- Стронг Д., Техника физического эксперимента, Ленинградское газетно-журнальное и книжное издательство, 1948.
- Троцевич С. Е., Изготовление объективов для телескопов, микроскопов и фотографии. Микроскоп и телескоп Оптическая техника, изд. автора, Варшава, 1903.
- Цесевич В. П., Что и как наблюдать на небе, изд. 4-е, «Наука», 1973.
- Ченакал В. Л., Очерки по истории русской астрономии, Изд-во Академии наук СССР, 1951.
- Чикин А. А., Изготовление зеркала для отражательного телескопа, Изв. Русск. астрономич. о-ва, 1912.
- Чикин А. А., Отражательные телескопы (Изготовление рефлекс-торов доступными для любителей средствами), Изд. Русск о-ва любителей мироведения, Петроград, 1915.
- Чикин А. А. Астрономическая труба из очковых стекол, изд. 3-е, ГТТИ, 1932.
- Шемякин М. М., Самодельный телескоп-рефлектор, приложение к журналу «Юный техник», 1966.
- Шишаков В. А., Простейший самодельный телескоп и наблюдения с ним, изд. Московского планетария, 1940.
- Шорыгин С. А., Менисковые телескопы Д. Д. Максудова, Астрон. Календарь на 1947 г.
- Журнал «Земля и Вселенная». Содержит ряд интересных для телескопостроителя статей.

80 x 100