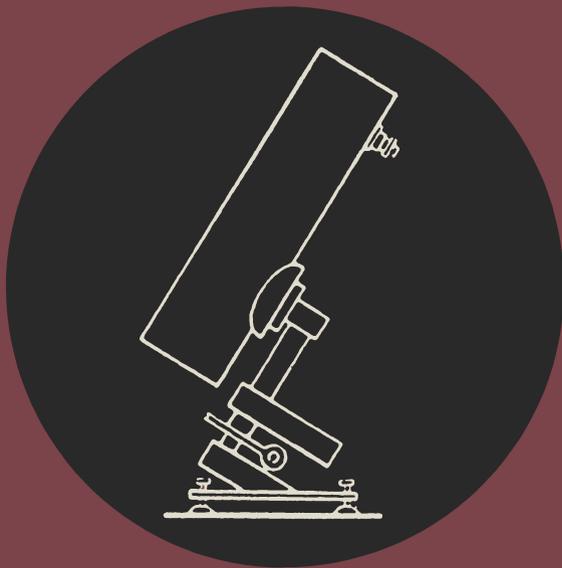


БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



Л. Л. СИКОРУК



**ТЕЛЕСКОПЫ
ДЛЯ
ЛЮБИТЕЛЕЙ
АСТРОНОМИИ**

БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



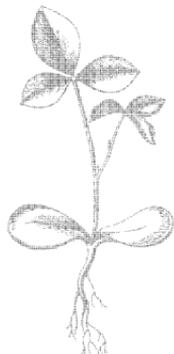
Л. Л. СИКОРУК

**ТЕЛЕСКОПЫ
ДЛЯ
ЛЮБИТЕЛЕЙ
АСТРОНОМИИ**

**ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ**



**МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1990**



ББК 22.6
С35
УДК 522.2(023)

Библиотека любителя астрономии
издается с 1979 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Председатель Г. С. ХРОМОВ

Рецензент
доктор технических наук *Н. Н. Михельсон*

Сикорук Л. Л.

С85

Телескопы для любителей астрономии.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.— 368 с. с ил.— Библиотека любителя астрономии

ISBN 5-02-014075-9

Популярно рассказывается о конструировании и постройке любительских телескопов. Даются основы теории. Описываются все стадии изготовления оптики различных систем телескопов. Излагаются методы исследования оптических систем. Подробно рассказывается о механике телескопов, приводятся фотографии и чертежи любительских конструкций. Описываются некоторые специальные инструменты: кометискатель, коронограф, призмный спектрограф, а также проекты любительских обсерваторий.

Изд. 1-е — 1982 г.

Для любителей астрономии, старшеклассников, членов астрономических кружков.

С $\frac{1605010000-145}{053(02)-89}$ 124-89

ББК 22.6

ISBN 5-02-014075-9

© Издательство «Наука».
Главная редакция физико-математической литературы, 1982; с изменениями, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прошло семь лет после выхода первого издания этой книги. Нельзя сказать, что в области любительского телескопостроения произошли крупные сдвиги. Телескопостроение — вообще сравнительно консервативная область техники, если ее сравнивать, скажем, с электроникой или ядерной технологией. И все-таки я постоянно испытывал потребность кардинально переработать книгу. Прежде всего это вызвано бурным обсуждением ее среди любителей, причем были высказаны не только доброжелательные отзывы, но и отрицательные.

Главный раздел приходился на вопрос: имеет ли смысл писать книгу, где все по возможности объясняется «на пальцах», или же остро необходима книга, которая подтолкнула бы любителей к более серьезному изучению основ телескопостроения и к строительству более сложных оптических систем, чем системы Ньютона и Кассегрена.

Теперь, когда дискуссия затихла, я думаю, что в действительности нужны две книги — для начинающих и более опытных любителей. К сожалению, и сейчас сделать два тома такой книги невозможно, и поэтому во втором издании пришлось описать и постройку телескопа из очковых стекол (было высказано много таких пожеланий), и камер Шмидта, Максутава, коронографа и т. п. (таких пожеланий было высказано еще больше). Не знаю, хорошо ли «в одну упряжь впрягать коня и трепетную лань», но пока дело обстоит именно так.

Была также высказана мысль, что моя первая книга должна была заменить книгу М. С. Навашина и что она не выполнила эту задачу. Нет более неблагодарного дела, чем попытка одного автора заменить собой другого. Со всей определенностью скажу, что книга М. С. Навашина — уникальное явление нашей культуры, она неподражаема. Принимаясь за работу, я думал создать нечто другое,

свое. У меня были иные планы — написать книгу, которая хотя бы отчасти продемонстрировала сегодняшнее состояние дел в любительском телескопостроении и хотя бы контурно наметила перспективу этого дела в нашей стране. Такая попытка была сделана еще в 1976—1977 гг., когда я подготовил рукопись такой книги. По ряду причин в первом издании пришлось описать только простейшие любительские конструкции. Кстати говоря, первоначальное название той книги было «Телескоп начинающего любителя». Оно, мне кажется, вернее отражало содержание.

Теперь старая затея в основном выполнена, хотя и сейчас часть интересных вопросов из-за недостатка места не вошла в книгу. По той же причине кое-чем пришлось пожертвовать: методом Ронки — Мобсби, «олл-скай камерой», солнечными телескопами и др.

Так или иначе в этом издании я старался удовлетворить практически все разумные пожелания, и содержание книги во многом определено письмами и высказываниями читателей. Мне очень дороги мнения о книге ныне покойного Б. К. Иоаннисиани, много сделавшего для обоих изданий Н. Н. Михельсона, доброжелательного Г. С. Хромова и некоторых других профессиональных оптиков и астрономов. Мне очень дороги замечания и советы известных наших любителей телескопостроения А. С. Фомина, С. И. Сорина, и других. Особенно же я признателен И. И. Станкевичу, обнаружившему накануне печатания книги (!) грубую ошибку в одной из таблиц первого издания, и спасшего книгу от неминуемого позора. Я искренне признателен С. А. Жаркову и А. С. Белоусову, выполнившим проверку и оптимизацию конструктивных элементов менисковых систем, приведенных в книге. Заканчивая эту работу, я в глубине души надеюсь, что она окажется небесполезной для многих и многих людей, посвятивших свой досуг одному из самых замечательных увлечений.

ВВЕДЕНИЕ

Дата рождения телескопа, как и имя его подлинного изобретателя, навсегда кануло в Лету. Историки науки чаще всего называют Иоганна Липперсгея (он же Ганс или Иоанн Лепрей), Захария Янсена или Якоба Метциуса, которые в начале XVII в. в Голландии вели долгий спор о приоритете. В 1634 г. после смерти З. Янсена его сын Иоганн сообщил физику Бикману, что его отец в 1604 г. был первым в Голландии, кто построил зрительную трубу после итальянской модели, на которой было написано «Аппо 1590»... Итак, телескоп был известен по крайней мере в 1590 г. в Италии [23] *).

Когда в 1609 г. энергичному и деятельному Галилео Галилею стало известно, что в Венецию попал экземпляр «голландской» трубы, ему потребовались только сутки, чтобы догадаться об ее устройстве и даже построить свой первый телескоп с трехкратным увеличением. Галилей не был первым, кто построил зрительную трубу, он не был первым, кто направил ее на небо, но он сделал первые телескопические открытия и важные обобщения. Собственно, только после этого зрительная труба или, как ее еще называли, «окуляр», стала телескопом. Поэтому часто изобретение телескопа мы связываем с его именем.

В 1668 г. произошло событие, имевшее громадное значение для телескопостроения, особенно любительского: Президент Лондонского Королевского общества сэр Исаак Ньютон изобрел и собственноручно построил зеркальный телескоп, получивший впоследствии его имя. Это не было первым изобретением зеркального телескопа, так как в 1616 г. французский математик Н. Цукки, в 1663 г. шотландский математик Джеймс Грэгори, а в 1672 г. француз-

*) Числа в квадратных скобках означают номера работ в списке литературы в конце книги.

ский скульптор и художник Грийом Кассегрен предложили каждый свою схему зеркального телескопа, но ни один из этих телескопов не был построен в следующие 50 лет. Телескоп же Ньютона несмотря на маленький диаметр зеркала (2,5 см) и фокусное расстояние (16 см) давал прекрасные изображения и ничем не уступал более крупным рефракторам.

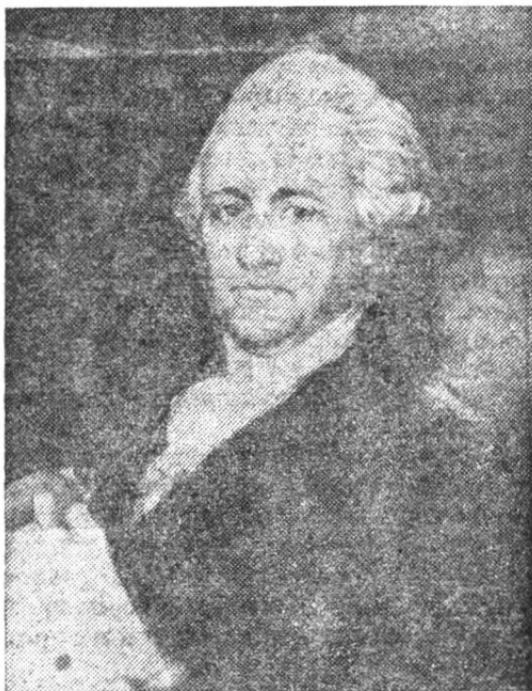


Галилео Галилей (1564—1642)

Позже схему Цукки независимо друг от друга предлагали М. В. Ломоносов в России и У. Гершель в Англии. Подобно Ньютону Гершель не только предложил схему, но и построил несколько телескопов по этой схеме. С помощью своих телескопов он совершил выдающиеся открытия, которые сделали его едва ли не самым крупным астрономом за последние 350 лет.

Беспримерный подвиг музыканта Гершеля, отшлифовавшего за свою жизнь более ста зеркал и построившего десятки телескопов, поражает воображение. Англичане пивовар У. Лассель, лорд Росс, инженер А. Коммон, русский художник и журналист А. А. Чикин и многие другие, будучи

любителями, достигли таких вершин, что каждый стал для своего времени ведущим специалистом. Англичанин Рассел Пёртер — полярный исследователь, штурман, художник и любитель телескопостроения стал в начале нашего века таким авторитетом, что при проектировании 5-метрового рефлектора обсерватории Маунт Паломар (США) его



Уильям Гершель (1738—1822)

пригласили для разработки конструкции монтировки. Знаменитое теперь «ядро с подковой» — это одна из многочисленных разработок Портера.

Легендарный наш оптик Д. Д. Максудов начинал тоже любителем. Двенадцатилетним мальчиком он заинтересовался астрономией и, как большинство любителей, построил сначала 180-миллиметровый, а позже 210-миллиметровый рефлекторы. Интересно, что, став впоследствии одним из самых образованных оптиков XX в., он не имел университетского образования в обычном смысле этого слова. Всем тем, чего он достиг в жизни, он был обязан своему необы-

чайному трудолюбию, настойчивости и, конечно, прирожденному таланту. Это был чрезвычайно яркий человек. Его знаменитые розыгрыши, в которых с удовольствием принимал участие и М. С. Навашин, стали целой ветвью в «фольклоре» Пулковской обсерватории.

Главное изобретение Д. Д. МаксUTOва — менисковые системы. Они стали вехой в истории оптики и получили распространение не только в астрономии. Более всего у нас известны фотографические телеобъективы «МТО» и «ЗТМ». Подобные объективы выпускаются и за рубежом. Крупнейшие менисковые телескопы — 700-миллиметровый телескоп Абастуманской обсерватории и 700-миллиметровый менисковый астрограф для Советской экспедиции в Чили на обсерватории Серро Робле, который с большим успехом служил науке до прихода к власти Пиночета. В мире построено много любительских менисковых телескопов, из которых крупнейший сооружен чешскими любителями Вилемом и Йозефом Эрхартами. Диаметр его мениска 625 мм! Установлена камера на горе Клеть в 17 км от г. Ческе Будевицы. На этом телескопе в 1980 г. З. Ваврова открыла астероид № 2568, которому по желанию открывателя было присвоено имя МаксUTOва.

Сегодня любительское телескопостроение — одно из самых распространенных научно-технических увлечений. Среди капиталистических стран в этом деле лидируют США, Австралия, Канада, Франция, Великобритания, Голландия, ФРГ, среди социалистических ЧССР, где еще в 60-е годы Эрхарты построили рефлектор с зеркалом диаметром 1 м! До сих пор он остается крупнейшим в мире любительским телескопом.

Сегодня нет никакой возможности рассказать о любителях разных стран, но о советских нужно сказать хотя бы несколько слов. История любительского телескопостроения у нас в стране началась после выхода в 1915 г. книги А. А. Чикина «Отражательные телескопы: Изготовление рефлекторов доступными для любителя средствами». Более тридцати лет она оставалась единственным серьезным руководством для любителей. Только в 1949 г. почти одновременно появились краткая «Инструкция по изготовлению самодельного рефлектора» и книга «Самодельный телескоп-рефлектор», написанные цитогенетиком профессором М. С. Навашиным. Эта книга много раз переиздавалась под названием «Телескоп астронома-любителя». В 1946 и в 1948 гг. вышли две монографии Д. Д. МаксUTOва «Астрономическая оптика» и «Изготовление и исследование астроно-

мической оптики». Обе книги адресовались профессионалам, но написаны были таким простым языком, что даже автор этой книги — в то время 12-летний мальчик — кое-что понял и принялся за шлифовку своего первого телескопа. Эти две книги и особенно книги М. С. Навашина резко оживили любительское движение у нас в стране.



Дмитрий Дмитриевич Максудов (1896—1964)

В те же годы М. С. Навашин организовал технический отдел Московского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО). Через несколько лет он переехал в Ленинград, и отдел свернул свою работу до 1959 г., когда во главе его стал художник М. М. Шемякин. Вплоть до 1986 г. он руководил отделом и сумел выпустить в свет три сборника по любительскому телескопостроению (1964, 1966 и 1975 гг.). С помощью Центрального Совета ВАГО удалось наладить систематическое проведение Все-

союзных коллоквиумов по любительскому телескопостроению, которые проводятся с 1960 г. примерно раз в два года.

К сожалению, самый больной вопрос о снабжении любителей необходимыми материалами до сих пор не решен. Не решен и вопрос о создании Всесоюзного клуба любителей телескопостроения — это сдерживает инициативу многих десятков тысяч людей, желающих построить телескоп. Тем не менее около сорока лет в Ленинграде успешно работает инженер А. С. Фомин. Уже в 60-е годы его телескопы практически ничем не отличались от фабричных и в оптике, и в механике, и в электронике, и особенно в дизайне. А. С. Фомин построил несколько ньютоновских и кассегреневских телескопов, камеру Шмидта и 310-миллиметровый телескоп Ричи — Кретьена. Сегодня у нас это один из наиболее серьезных любителей.

Около тридцати лет успешно работал в Ростове-на-Дону А. А. Михеев. Он построил несколько ньютоновских телескопов с оптикой высокого класса и сделал несколько интересных наблюдений. Задолго до полетов автоматических станций к Марсу он увидел в свой 320-миллиметровый рефлектор на поверхности планеты кратеры, и хотя до сих пор многие сомневаются в самой возможности увидеть эти образования на Марсе с поверхности Земли, факт остается фактом. Ведь о своем открытии А. А. Михеев сообщил в то время, когда даже идея о марсианских кратерах многим казалась абсурдной. На окраине города он построил прекрасную обсерваторию с вращающимся куполом, позволяющим открыть для наблюдений половину неба. Это одна из самых замечательных самодеятельных обсерваторий.

В Баку работает один из старейших наших любителей С. И. Сорин. Он руководит кружком детей — любителей астрономии. Вместе с ними С. И. Сорин построил несколько интересных телескопов, в том числе 540-миллиметровый рефлектор Кассегрена. Удобное географическое положение города позволило С. И. Сорину сконцентрировать свои усилия на астрономической фотографии. Для этого телескопы устанавливаются или уже установлены на территории Шемахинской астрофизической обсерватории вблизи поселка Пиркули.

Вскоре после войны молодой в то время В. В. Мартыненко организовал в Симферополе кружок любителей астрономии, который быстро разросся и стал самым крупным и наиболее серьезным детским коллективом. Обсерватория кружка расположена в живописном детском парке. Хотя оптику телескопов изготовили в Крымской астрофизической

обсерватории, а механику на местных заводах, обсерватория может служить примером для многих. Кроме 540- и 300-миллиметрового кассегреновских рефлекторов здесь установлены 200-миллиметровый рефрактор, горизонтальный солнечный телескоп со спектрогелиоскопом, 120-миллиметровый полярный солнечный телескоп, метеорный патруль и другие инструменты.

Сегодня, когда средства, затрачиваемые на профессиональную астрономию, несопоставимы со скромным бюджетом одинокого любителя, профессиональное телескопостроение ушло далеко вперед, и хотя в ЧССР построен 1-метровый рефлектор, а в США любители приступили к строительству 1,2-метрового телескопа и готова стеклянная заготовка диаметром 2,6 м, основная часть любителей, вероятно, и в относительно далеком будущем будет довольствоваться телескопами диаметром 150—300 мм. Большой телескоп не только труден в постройке, но и требует стационарной установки, а значит, специального помещения. Кроме того, бессмысленно устанавливать его в городе — он должен быть вдали от городских огней, а это означает, что рядом должно быть теплое помещение для наблюдателей. Все вместе выливается в крупное предприятие, которое часто недоступно одиночке. Единственный выход — объединение в клубы любительского телескопостроения, возможности которых значительно шире.

Как бы там ни было, с начала века построена по крайней мере сотня тысяч любительских телескопов, и чаще всего замечательные открытия любители делают с помощью сравнительно малых инструментов. Знаменитый чешский ловец комет А. Мркос начинал свою карьеру с первыми небольшими телескопами братьев Эрхартов. Австралийский ловец комет У. Брэдфилд все свои 13 комет открыл с помощью 15-сантиметрового телескопа, построенного его приятелем. Комета 1975 г. Кобаяси — Бергера — Милона открыта с телескопами диаметром от 10 до 20 см. Этот перечень можно продолжать очень долго.

Что же могут показать телескопы того или иного диаметра, если их оптика безупречна?

Телескоп диаметром 50 мм позволит увидеть кратеры на Луне, пятна на Солнце, пояса на диске Юпитера и четыре его крупных спутника, фазы Венеры, наличие колец Сатурна, компоненты двойных звезд с расстоянием между ними 2,5 секунды дуги (2,5"; эта величина называется *разрешающей силой* телескопа), слабые звезды до 10-й звездной величины (10^m; *проницающая способность*), самые яркие туман-

ности и галактики: М 31, М 42, прекрасный вид Плеяд и двойного скопления в созвездии Персея.

80-миллиметровый телескоп покажет детали в кратерах Луны и ее горных массивах, фазы Меркурия, щель Кассини в кольце Сатурна, его спутник Япет, наиболее крупные подробности в поясах Юпитера, полярные шапки Марса в эпохи его противостояний. Телескоп должен разрешать двойные звезды с расстоянием компонент $1,6''$ и иметь пронзающую способность до $11,5^m$.

150-миллиметровый телескоп кроме перечисленного выше даст возможность увидеть также детали солнечных пятен, факельных полей и грануляцию в годы максимума солнечной активности; он покажет Красное Пятно и многие детали в поясах Юпитера, сезонные изменения на поверхности Марса, семь спутников Сатурна, подробности на терминаторе Венеры. Разрешающая сила телескопа $0,8''$, пронзающая способность около 13^m . Телескоп покажет практически все объекты каталога Мессье. Телескоп может использоваться и визуально и фотографически.

250—300-миллиметровые телескопы покажут при большом раскрытии кольца Сатурна деление Энке, а также восемь спутников планеты, спутник Нептуна Тритон, диск Урана и пять его спутников, на пределе видимости можно заметить Плутон, многочисленные слабые галактики и многие объекты Нового общего каталога (New General Catalog — NGC). Такие телескопы представляют собой мощные любительские инструменты, которые можно применять для самых разнообразных визуальных и фотографических программ любительских наблюдений. Разрешение телескопов около $0,5''$, пронзающая сила примерно 14^m . Фотографическая же пронзающая сила составит примерно $17—18^m$.

В то же время следует сказать, что лучше иметь хорошо оснащенный и надежно работающий небольшой телескоп, чем большой, но имеющий плохие изображения и дрожащий от малейшего ветерка. В этом автор убедился за сорок лет занятий любительским телескопостроением. В конце концов оценивать телескоп нужно не по размерам, а по тем результатам, которые можно с ним получить. Это главное.

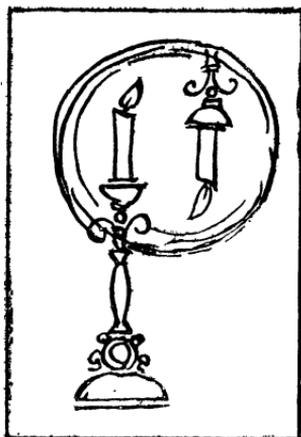
НЕМНОГО ТЕОРИИ

§ 1. СВЕТ, ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ
И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ

Основные сведения о свете читателю, вероятно, известны. Но для того, чтобы избежать недоразумений в терминологии и основных понятиях, договоримся о главном — значении слов.

Свет точечного источника распространяется *волнами*, которые в однородной среде имеют сферическую форму. Световая волна образует *волновой фронт*. Нормали к фронту, вдоль которых распространяется свет, называются световыми *лучами*. Лучи, исходящие из одной точки или собирающиеся в точку, называются *гомоцентрическими*. Если источник расположен очень далеко (в «бесконечности»), волновой фронт становится плоским, а пучок лучей — параллельным (рис. 1)

Световые волны имеют различную длину, которая определяет цвет излучения. Светящиеся твердые и жидкие тела излучают непрерывный спектр волн, газы и плазма — линейчатый. Водород излучает в видимой части спектра красную линию с длиной волны $\lambda = 6563 \text{ \AA} = 0,0006563 \text{ мм}$, синюю линию с длиной волны $4861 \text{ \AA} = 0,0004861 \text{ мм}$, фиолетовую линию с длиной волны $4340 \text{ \AA} = 0,0004340 \text{ мм}$. Пары натрия излучают две очень яркие линии с длинами волн $\lambda = 5896$ и 5890 \AA . Это знаменитый желтый дублет натрия. Белый солнечный свет — это сумма излучений в самых различных длинах волн. Хорошее доказательство сложности солнечного света — радуга.



В вакууме скорость распространения света $c = 300$ тыс. км/с. В других средах она меньше. Отношение скорости света в вакууме к скорости в другой оптической

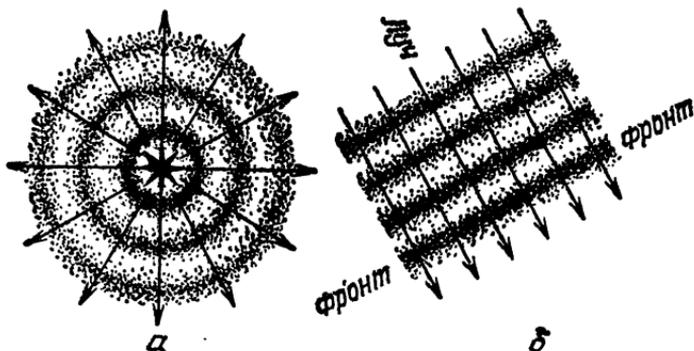


Рис. 1. Излучение светящейся точки (а) и волновой фронт (б)

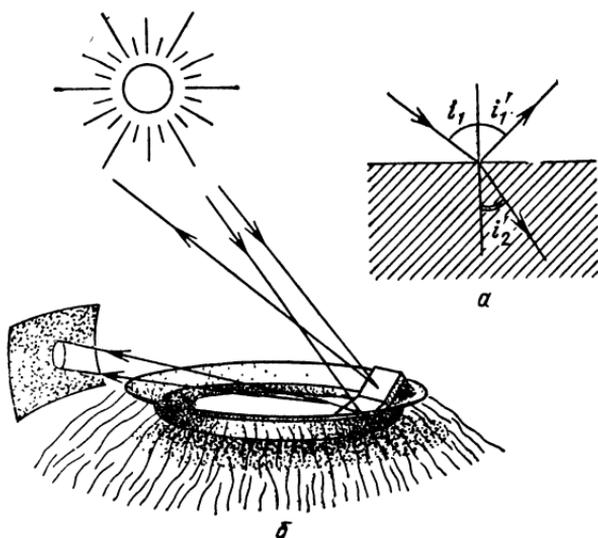


Рис. 2. Преломление и дисперсия света: углы падения i_1 , отражения i_1' и преломления i_2 на поверхности среды (а); тарелка с чистой водой и маленькое бытовое зеркало позволяют увидеть на экране спектр; наблюдатель, на глаз которого падает спектр, видит в тарелке яркие монохроматические изображения Солнца (б). С электрической лампой опыт получается хуже

среде $v_{ср}$ называется показателем преломления $n = c/v_{ср}$. Чем меньше скорость света в среде, тем больше ее показатель преломления и тем среда оптически более плотная.

Проведем нормаль к поверхности в точке падения луча на поверхность оптической среды (например, стекла) и изобразим лучи падающий, преломленный и отраженный. Углом падения i_1 называется угол между падающим лучом и нормалью к поверхности (но не между лучом и поверхностью), углом преломления i_2 — угол между преломленным лучом и нормалью. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть *показатель преломления* (рис. 2, а)

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}.$$

Свет различных длин волн имеет различные показатели преломления при переходе из одной среды в другую. Поэтому белый луч преломляется с *дисперсией* (разложением) на составные цвета (рис. 2, б).

Зеркала в оптике имеют, как правило, одну поверхность, так что свет не проходит сквозь стекло, а сразу отражается под тем же углом к нормали, под которым падает: угол падения i_1 равен *углу отражения* i_1' . Показатель преломления в этом случае равен $n = -1$ и дисперсия исключена.

Среди оптических деталей, с которыми мы будем иметь дело, — главным образом линзы и зеркала (рис. 3). Линза ограничена двумя сферическими поверхностями (одна из них может быть и плоской). Каждая поверхность линзы или зеркала имеет *радиус кривизны* R и *центр кривизны*. Величина, обратная радиусу кривизны, $\rho = 1/R$, называется *кривизной поверхности*. Оптические системы, состоящие из нескольких линз, зеркал, центры кривизны поверхностей которых лежат на одной прямой, называются *центрированными*, а сама эта прямая — *оптической осью*. У одиночной линзы оптическая ось проходит через оба ее центра кривизны, у сферического зеркала оптической осью называется линия, проходящая через центр кривизны и центр зеркала.

Линзы и зеркала, которые превращают параллельный пучок света в сходящийся, называются *собирательными*, или *положительными*. Отрицательные (рассеивающие) линзы и зеркала превращают параллельный пучок лучей в расходящийся. Точка, в которую собираются параллельные лучи после преломления, называется *фокусом* (F). Для отрицательных линз и зеркал фокусом называется точка, в которой собираются продолженные назад расходящиеся после преломления или отражения лучи. Пучки света, идущие под каким-нибудь углом к оси линзы или зеркала, собираются в точки, не лежащие на оптической оси. Эти точки образуют поверхность, которая называется

фокальной поверхностью. В первом приближении ее можно считать плоскостью, перпендикулярной оптической оси.

Каждая линза имеет два фокуса: один для лучей, идущих слева направо, а второй для лучей, идущих справа налево. В первом случае фокус называется задним (F'), а во

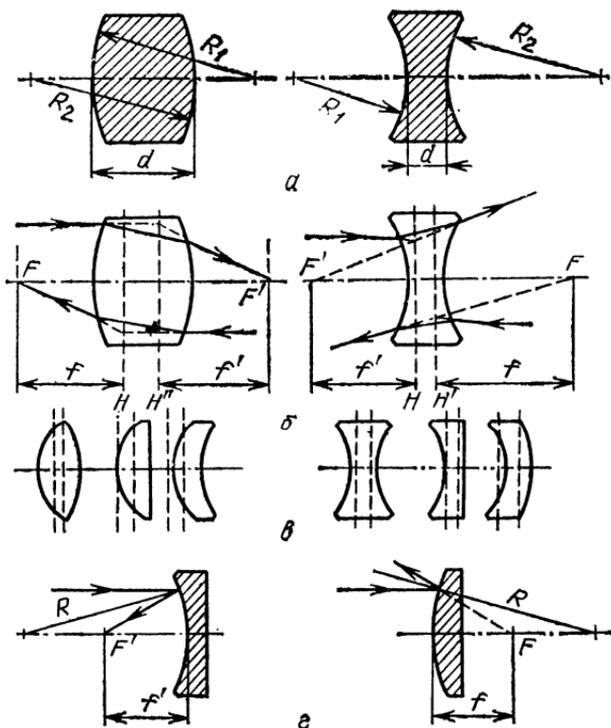


Рис. 3. Некоторые параметры линз и зеркал: радиусы кривизны и толщина линз (а), главные плоскости (б), положение главных плоскостей линз разной формы (в), параметры зеркал (г). Радиусы, обозначенные стрелкой, направленной навстречу падающим лучам, учитываются со знаком «плюс» и наоборот

втором — передним (F). Если вышедшие после преломления лучи продолжить назад до пересечения с лучами, падающими на линзу, то точки пересечения окажутся на одной из двух главных плоскостей H и H' . Расстояние от одной из этих плоскостей до ближайшей точки фокуса называется фокусным расстоянием f или f' . В однородной среде оба фокусных расстояния любой линзы равны между собой. В то же время расстояния между точками фокуса и ближайшими поверхностями линзы, называемые рабочими отрезками, часто неравны.

Если известны радиусы кривизны линзы R_1 и R_2 , показатель преломления стекла n и толщина линзы d , то ее фокусное расстояние равно

$$f' = \frac{R_1 R_2}{(n-1) \left(R_2 - R_1 + d \frac{n-1}{n} \right)}.$$

Для тонкой линзы, толщиной которой можно пренебречь,

$$f' = \frac{R_1 R_2}{(n-1)(R_2 - R_1)}.$$

Для плоско-вогнутой или плоско-выпуклой линзы один из радиусов кривизны равен бесконечности, а фокусное расстояние

$$f' = \frac{R_1}{n-1}.$$

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой*

$$\Phi = \frac{1}{f' [\text{м}]} \quad \text{или} \quad \Phi = \frac{1000}{f' (\text{мм})}.$$

Оптическая сила измеряется в диоптриях. Диоптрия — мера, обратная фокусному расстоянию, выраженному в метрах. Например, оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 50 см равна 2 диоптриям. Отрицательная линза с фокусным расстоянием 33 см имеет оптическую силу, равную —3. Зеркало с фокусным расстоянием 2 м имеет оптическую силу 0,5 диоптрии.

Фокусное расстояние системы из двух линз можно определить по формуле

$$f_c = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

где f_1 — фокусное расстояние первой линзы, f_2 — фокусное расстояние второй линзы, d — расстояние между ближайшими главными плоскостями первой и второй линз. В формуле фокусные расстояния положительных линз берутся со знаком «+», а отрицательных — со знаком «—». Если фокусы двух линз или зеркал совпадают, то фокусное расстояние системы равно бесконечности, пучок света выходит из системы параллельным, и система называется *афокальной*. К таким системам относятся все визуальные трубы, бинокли, телескопы.

Рассмотрим *гомоцентрический* (выходящий из одной точки) пучок и систему линз. Ясно, что не все лучи попадут на первую поверхность системы, но и те, что преломятся на первой поверхности, не обязательно пройдут через всю систему. Угол, внутри которого находятся все лучи, полностью проходящие через систему, называется *апертурным углом*. Оправа, ограничивающая пучок, называется *апертурной диафрагмой*.

Изображение апертурной диафрагмы, построенное системой линз, стоящих впереди нее, называется *входным зрачком*. Положительная компонента объектива, стоящая впереди апертурной диафрагмы, может рассматриваться как лупа, увеличивающая изображение апертурной диафрагмы, и входной зрачок будет больше апертурной диафрагмы. Если же впереди стоит отрицательная компонента, то входной зрачок будет меньше апертурной диафрагмы.

Изображение апертурной диафрагмы, построенное системой, стоящей позади нее, называется *выходным зрачком*. В визуальных телескопах выходной зрачок — это изображение *объектива* — передней линзы (или системы линз) телескопа, построенное *окуляром* — задней линзой. Его легко видеть, если рассматривать окуляр телескопа с расстояния 15—25 см, а телескоп направить на светлую поверхность. Диаметр выходного зрачка телескопа равен

$$d_{\text{зр}} = \frac{D}{\Gamma},$$

где D — диаметр объектива, а Γ — увеличение телескопа.

Пространство, лежащее перед первой поверхностью системы, называется *пространством предметов*, а пространство, лежащее позади последней поверхности, — *пространством изображений*.

Отношение диаметра падающего пучка света, который может проникнуть через систему (диаметра входного зрачка), к фокусному расстоянию системы называется *относительным отверстием*, а обратная величина — *относительным фокусным расстоянием*:

$$A = \frac{D}{f'}; \quad V = \frac{f'}{D}.$$

Для обычных телескопов-рефлекторов или рефракторов с одиночной линзой или «тонким» ахроматом (см. § 5, 6) входной зрачок равен диаметру линзы или главного зеркала. Относительное отверстие выражается простой дробью, в знаменателе которой может быть целое число или десятичная

дробь, а в числителе единица ($1/2$, $1/4$, $1/5$, 6 и т. д.). Относительное фокусное расстояние в фотографии называется *диафрагменным числом* (2 , 4 , $5,6$, ...).

Часть лучей наклонного пучка срезается оправой и диафрагмами. Если взглянуть сквозь длиннофокусный фотообъектив и наклонить его, то можно увидеть, что зрачок из круглого превращается в сплюснутый. От этого световой поток уменьшается, уменьшается и освещенность в фокальной плоскости. Этот эффект, называемый *виньетированием*, снижает освещенность на краю поля.

В телескопе-рефлекторе вторичное зеркало устанавливается на растяжках перед главным. Его оправа и растяжки экранируют часть пучка света, и хотя ни оправа, ни растяжки в окуляр не видны, они несколько снижают световой поток, проходящий через входной зрачок — производят *экранирование*.

В фокусе телескопа (подзорной трубы или бинокля) устанавливается круглая *полевая диафрагма*, назначение которой — срезать крайние части поля зрения, испорченные оптическими аберрациями (о них см. § 5, 6). Кроме того, вид резко очерченного поля зрения создает зрительный комфорт для наблюдателя. Так как фокус окуляра совмещается с фокусом объектива, то полевая диафрагма обычно конструктивно устанавливается в окуляре, в его переднем фокусе.

§ 2. КОНИЧЕСКИЕ СЕЧЕНИЯ. ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Рис. 4 показывает формы сечения конуса плоскостями, направленными под разными углами к его оси. Плоскость, перпендикулярная оси конуса, пересекает его поверхность по окружности. Если угол уменьшить, линия пересечения будет иметь вид эллипса. Плоскость, проходящая параллельно образующей конуса, пересекает его поверхность по параболе, а если угол еще уменьшить, то по гиперболе.

Точки окружности равноудалены от ее центра, и начертить ее проще всего циркулем. Эллипс можно начертить с помощью двух булавок и колечка из нитки. Точки, где воткнуты булавки, называются фокусами эллипса. Отношение расстояния между фокусами к большой оси эллипса называется *эксцентриситетом* e . Окружность можно рассматривать как эллипс, фокусы которого совпадают, расстояние между ними равно нулю и эксцентриситет окружности равен нулю. Если фокусы разнести на бесконечно большое расстояние, то эксцентриситет станет равным 1 , а эллипс превратит-

ся в параболу. Эксцентриситет гиперболы всегда больше единицы. Ветви параболы стремятся стать в бесконечности параллельными, а ветви гиперболы — слиться с двумя прямыми, угол между которыми может быть от нуля до 180° .

Если окружность, эллипс, параболу или гиперболу вращать вокруг оси симметрии, то образуются поверхности,

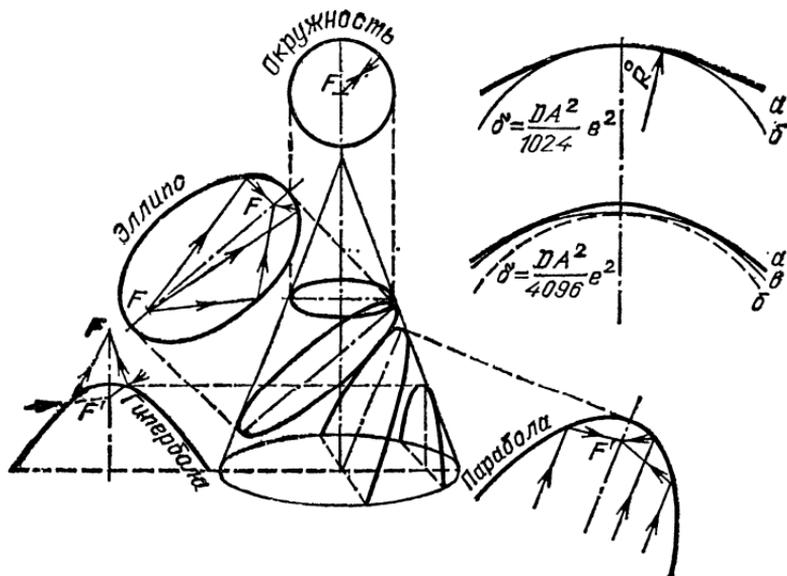


Рис. 4. Конические сечения и преломление лучей на них: асферическая поверхность (а), сфера сравнения при вершине (б), ближайшая сфера сравнения (в)

форма которых определяется этими кривыми. Окружность образует *сферу*, эллипс — *эллипсоид*, параболу — *параболоид*, гиперболу — *гиперболоид*. Вращение эллипса вокруг малой оси дает поверхность, называемую *сплюснутым сфероидом*. Эксцентриситет сплюснутого сфероида всегда отрицателен.

Из всех поверхностей, образованных коническими сечениями, только сфера имеет повсюду одинаковую кривизну и один радиус кривизны. Поэтому сделать оптически точную сферическую поверхность проще, чем любую другую. У эллипсоидов, параболоидов, гиперболоидов, сплюснутых сфероидов кривизна в вершине и на других зонах различна. Если радиусом кривизны при вершине любой из этих поверхностей очертить сферу, касательную в вершине, то такая сфера называется *параксиальной сферой*.

Максимальное отступление асферического зеркала от параксиальной сферы называется *асферичностью зеркала* (или любой асферической поверхности) (рис. 4). Она равна

$$\delta_{\max} = \frac{D}{1024V^3} e^2.$$

Можно подобрать такую сферу сравнения, когда ее отступление от данной асферической поверхности будет минимальным. Такая сфера называется *ближайшей сферой сравнения*. Асферичность одного и того же зеркала будет вчетверо меньше для ближайшей сферы сравнения, чем для параксиальной сферы:

$$\delta_{\max}^0 = \frac{D}{4096V^3} e^2.$$

В первом случае для получения асферической поверхности на первоначальной сфере придется споллировать наибольший слой стекла в центре зеркала. Во втором случае нужно споллировать частично центр и частично крайние зоны. Практически в обоих случаях мы получим совершенно одинаковые поверхности, хотя фокусное расстояние их и будет отличаться на 1—2 мм.

Представим себе, что все перечисленные поверхности алюминированы снаружи и внутри. Посмотрим, как будут вести себя лучи от точечного источника света, помещенного в некоторых особых точках. Если светящаяся точка помещена в центр сферы, то отраженные от сферы лучи построят изображение точки также в центре. Центр сферы является изображением самого себя. Он одновременно и геометрический фокус сферы.

Разместив светящуюся точку в одном из фокусов эллипсоида, мы получим ее изображение обязательно во втором фокусе. Фокусы эллипсоида являются изображениями друг друга. Один из фокусов параболоида расположен в бесконечности. Если светящаяся точка расположена в бесконечности, то ее изображение расположится во втором фокусе параболоида, лежащем на середине радиуса кривизны при вершине. Параболоид более всего подходит для изображения бесконечно удаленных предметов. Фокусы гиперболоида также являются изображениями друг друга.

То же произойдет, если на поверхность направить световые лучи снаружи. Если пучок гомоцентрический (см. § 1) и его центр совпадает с одним из фокусов поверхности, то мнимое изображение источника после отражения расположится во втором фокусе.

Изображения точек, расположенных в одном из фокусов перечисленных поверхностей, свободны от искажений (*аббераций*). Но если точку сместить из фокуса, то сопряженная точка (изображение) также сместится из второго фокуса и будет в той или иной мере искажена абберациями (см. § 5, 6).

Сплюснутый сфероид ни при каких обстоятельствах не построит безабберационное изображение. Это, конечно, не означает, что сплюснутый сфероид — «бесполезная» поверхность. В сочетании с другими поверхностями он может давать прекрасные результаты.

§ 3. КАК РАБОТАЕТ ТЕЛЕСКОП

Спроецируем с помощью линзы изображение предмета, например окна в комнате, на кусочек матового стекла или кальки и добьемся резкости. С противоположной стороны станем рассматривать изображение на матовом стекле с помощью лупы (рис. 5). Мы увидим увеличенное изображение,

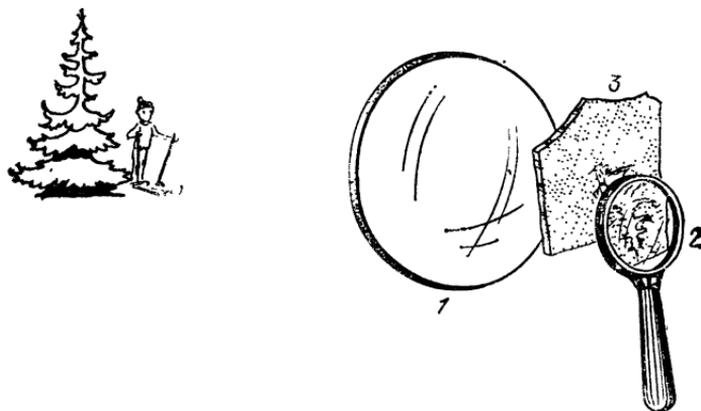


Рис. 5. Принцип действия телескопа-рефрактора: 1 — объектив, 2 — окуляр, 3 — матовое стекло, которое в реальных условиях отсутствует

которому будут мешать крапинки на стекле. Уберем матовое стекло, не меняя расстояние между первой линзой и лупой. Мы ясно увидим предмет, его «воздушное» изображение. Первая линза — объектив, вторая (лупа) — окуляр телескопа (рис. 6, а).

Чему равно увеличение телескопа?

Существует простая формула, по которой легко определить увеличение телескопа:

$$\Gamma = \frac{f'}{\phi}$$

Здесь f' — фокусное расстояние объектива, ϕ — фокусное расстояние окуляра. Чем больше фокусное расстояние объектива и меньше фокусное расстояние окуляра, тем больше увеличение телескопа. Например, фокусное расстояние

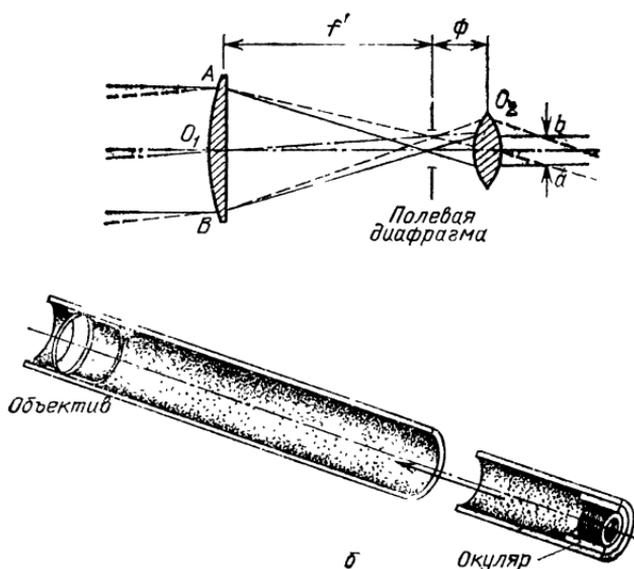


Рис. 6. Телескоп-рефрактор: схема (а), o_1 — объектив, o_2 — окуляр, ab — выходной зрачок; простейший телескоп (б)

объектива $f' = 500$ мм, фокусное расстояние окуляра $\phi = 20$ мм. Увеличение телескопа $\Gamma = 500 : 20 = 25\times$. На первый взгляд, подбирая различные фокусные расстояния объектива и окуляра, можно получить какие угодно большие увеличения телескопа. На самом же деле это совсем не так, но подробно этот вопрос мы рассмотрим позже. Пока же заметим, что минимальное разумное увеличение не нужно выбирать меньше

$$\Gamma_{\min} = \frac{D}{\delta}$$

где D — диаметр объектива или главного зеркала, а макси-

мальное не может быть больше

$$\Gamma = \frac{D}{0,7} = 1,4D.$$

Чему равно поле зрения телескопа?

Поднесем к глазу окуляр и направим его на небо, не закрывая второй глаз. Если нижнюю часть поля зрения совместить с горизонтом, то можно оценить на глаз, на сколько градусов над горизонтом поднимается верхняя часть поля зрения. Это «субъективное» поле зрения окуляра, выраженное в угловой мере. Для фабричных окуляров субъективное поле обычно равно $40\text{--}50^\circ$, реже $60\text{--}70^\circ$. Поле зрения одиночной линзы придется ограничить до $15\text{--}20^\circ$. Поле зрения телескопа равно субъективному полю зрения окуляра, деленному на увеличение телескопа с этим окуляром,

$$2W = \frac{2\omega}{\Gamma},$$

где 2ω — субъективное поле окуляра. Обычно в оптике рассматривают половину поля зрения, поэтому для выражения полного поля зрения приходится его удваивать, как это и сделано в формуле. Рассмотрим пример. Окуляр, дающий увеличение $50\times$, имеет поле зрения 50° . Поле зрения телескопа в пространстве предметов равняется 1° . Так как угловой видимый диаметр Луны равен $0,5^\circ$, то поле зрения телескопа составит два лунных диаметра. Кстати, телескоп увеличивает видимые угловые размеры объекта. Если видимые невооруженным глазом размеры объекта обозначить σ , то в телескоп он будет виден под углом $\varepsilon = \Gamma\sigma$.

При возрастании увеличения телескопа поле зрения в пространстве предметов уменьшается. Это ведет к неудобствам: труднее «поймать» объект, увеличивается «тряска» изображения из-за вибраций трубы телескопа, уменьшается яркость объектов в поле зрения. Поэтому максимальные увеличения не всегда удобны.

§ 4. ПРОСТЕЙШИЙ ТЕЛЕСКОП

Если вы впервые сталкиваетесь с телескопостроением, будет полезно построить небольшой телескоп, на сооружение которого уйдут один — два вечера. В качестве объектива лучше всего использовать ахроматический (склеенный из двух линз) объектив от подзорной трубы, теодолита, нивелира и т. п. Фокусные расстояния таких объективов

обычно от 200 до 500 мм. Если же такого объектива нет, можно воспользоваться одиночной, лучше плоско-выпуклой или двояко-выпуклой линзой. К сожалению, положительные очковые линзы и насадочные линзы к фотоаппаратам сейчас делают в виде менисков — вогнуто-выпуклых линз, которые меньше годятся для нашей цели. Но на худой конец подойдут и они. Только нельзя, как это иногда рекомендуется, ставить два мениска вогнутыми поверхностями друг к другу. От этого их сферическая аберрация (см. § 5) резко возрастает. Уж если мы и решили поставить две линзы-мениска, то лучше их обе ставить выпуклыми сторонами вперед.

В качестве окуляра можно использовать окуляр бинокля, зрительной трубы, микроскопа, короткофокусный объектив фото- или киноаппарата. Можно применить и лупу или объектив микроскопа с увеличением 7—15×. Чтобы определить фокусное расстояние микрообъектива, разделим 160 мм на увеличение объектива, которое нанесено на его оправе. Предположим, что у нас есть линза в 2 диоптрии ($f=500$ мм) и 15× микрообъектив ($f \approx 11$ мм). Телескоп будет иметь увеличение $\Gamma=500/11 \approx 45\times$.

Объектив нужно установить в трубке, длина которой на 100 мм меньше фокусного расстояния (рис. 6, б). Фокусное расстояние определит и общую длину телескопа. Обычно чтобы телескоп не получился слишком длинным, берут объектив с фокусным расстоянием не больше 500—750 мм. Но большие фокусные расстояния предпочтительнее с точки зрения качества изображения; поэтому, помня о гигантских телескопах Гевелия, Кассини или Гюйгенса, можно решиться и на телескоп с фокусным расстоянием 1 и даже 2 метра.

Окуляр также помещается в трубку длиной 250—300 мм, которая с трением вставляется в свободный конец первой трубки. Перемещая трубку вдоль оси, можно добиться резкости изображения. Наилучшая резкость наступает, когда фокусы объектива и окуляра совпадают.

Трубки могут быть алюминиевые, пластмассовые или склеенные на болванке из бумаги столярным, а лучше эпоксидным клеем (см. гл. 5, § 10). Для уменьшения рассеянного света, который засвечивает поле зрения телескопа, труба внутри красится черной матовой краской.

При увеличении 15—20× вибрация трубы телескопа приводит к заметной тряске изображения. Трубу нужно установить на штативе. Но те деревянные примитивные штативы, описания которых все еще можно встретить в руководствах

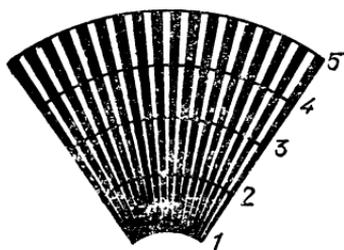


Рис. 7. Испытательная мира для визуального телескопа. Вычерчивается на листе ватмана, а затем фотографируется на контрастную пленку и печатается с уменьшением

базе без особых усилий соорудил телескоп с увеличением до $100\times$. Для визуальных испытаний объектива можно воспользоваться специальной испытательной таблицей — *мирой* (рис. 7) и с ее помощью решить вопрос о разрешающей силе телескопа (см. гл. 6, § 2). Мира располагается на улице на расстоянии по крайней мере 50—100 фокусных расстояний объектива. С помощью сильного окуляра рассматриваем миру в объектив и устанавливаем, на каком расстоянии на пределе видны отдельно самые тесно расположенные линии. Ясно, что в фокальной плоскости изображения линий будут расположены в l/f' раз теснее, где l — расстояние от объектива до миры, f' — фокусное расстояние объектива. Рассмотрим пример. Расстояние от объектива «МТО-1000» с фокусным расстоянием 1000 мм до миры равно 100 м или 100 000 мм. Расстояние между линиями, когда они при рассматривании в телескоп еще не сливаются в сплошную массу, на мире равно 2 мм. В фокусе объектива расстояние между изображениями линий будет в $100\,000 : 1000 = 100$ раз меньше. Значит, в фокусе расстояние между почти сливающимися линиями будет $2 : 100 = 0,02$ мм. В одном миллиметре разместится 50 линий. Это и есть разрешающая сила объектива — 50 лин/мм.

Угловое разрешение определится делением расстояния между линиями миры на расстояние до нее. В нашем случае это $2 : 100\,000 = 0,00002$ радиана, или $4''$. Это мало для объектива такого диаметра. В действительности обычно эти объективы лучше, и многие любители сейчас строят из них вполне приличные компактные телескопы [24, 25] (рис. 8).

для начинающих, совершенно не годятся. Лучше уж опирать телескоп во время наблюдений на подоконник, раму форточки, забор или специальную опору. Можно использовать и фотоштатив, если его головка позволяет направлять телескоп в зенит.

Любой высококачественный фотообъектив может стать основой телескопа. Более всего для этого подходят объективы «МТО» и «ЗТМ». В 1962 г. автор с трудом отобрал из восьми объективов «МТО-1000» один экземпляр и на его

Длиннофокусные объективы широкоугольных камер мало пригодны для визуальных телескопов, так как не выдерживают больших увеличений. Тем не менее У. Бредфилд открывает одну за другой кометы с помощью старинного объектива «Пецваль» диаметром 150 мм и фокусным расстоянием 1000 мм. Увеличение его кометоискателя $26\times$.

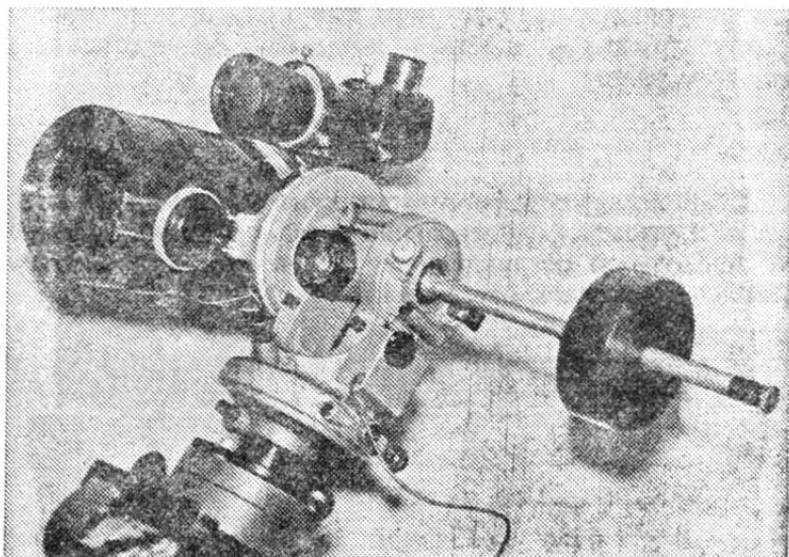


Рис. 8. Фотообъектив «МО-1000», превращенный в компактный телескоп. Монтажкой служит теодолит. Автор Ю. В. Заруба

В клубе им. Д. Д. Максудова имеются два кометоискателя на базе телевизионных объективов «ТО-1000» и «ТО-750» диаметром 160 и 130 мм с увеличениями 26 и $23\times$ (см. рис. 138).

§ 5. АБЕРРАЦИИ

Каждый объектив или окуляр в той или иной мере страдает от различных оптических дефектов — аберраций. Общая картина искажений вида предмета в фокальной плоскости сложна, но из этой сложной картины можно выделить главные составляющие.

Сферическая аберрация. Особенностью сферической поверхности является то, что ни линза, ни зеркало с такой поверхностью не могут свести параллельный пучок строго в точку. Это происходит от того, что оптическая сила краев такой линзы или зеркала больше, чем это надо было бы.

В результате фокусные расстояния для различных зон различны (рис. 9). Разница между фокусными расстояниями для разных зон называется *продольной сферической aberrацией*. Для зеркала она равна (без учета знаков)

$$\Delta S = \frac{1}{8} \frac{y^2}{f},$$

где y — радиус крайней зоны или полу диаметр зеркала. Радиус кружка рассеяния — *поперечная сферическая aberrация* — равен

$$\rho = \frac{1}{8} \frac{y^3}{f^2}.$$

Если окуляр или фотопластинку перефокусировать так, чтобы плоскость фокусирования оказалась где-то посередине продольной aberrации, то можно примерно вчетверо уменьшить кружок рассеяния.

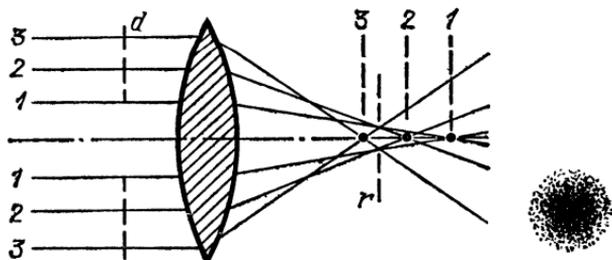


Рис. 9. Сферическая aberrация; r — кружок наименьшего рассеяния, справа — вид пятна в фокальной плоскости

Плоско-выпуклая линза, повернутая выпуклой стороной к предмету, имеет продольную сферическую aberrацию, равную (без учета знака)

$$\Delta S = 1,1 \frac{y^2}{f},$$

а поперечную

$$\rho = 1,1 \frac{y^3}{f^2}.$$

Если линзу повернуть плоской стороной к предмету, то обе aberrации возрастут почти в четыре раза:

$$\Delta S = 4,29 \frac{y^2}{f}, \quad \rho = 4,29 \frac{y^3}{f^2}.$$

Двояковыпуклая линза имеет сферическую aberrацию чуть меньше, чем плоско-выпуклая, повернутая выпуклой стороной к объекту.

Если линзу или зеркало задиафрагмировать, то сферическая aberrация станет меньше. Можно выбрать такое относительное отверстие, что сферическая aberrация станет равной практически нулю и никак не повлияет на качество

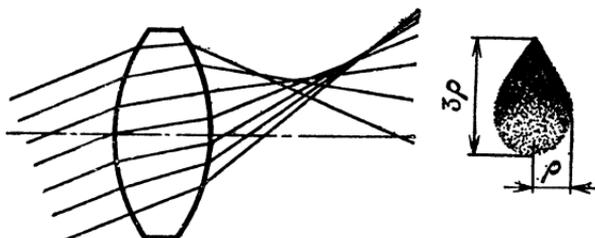


Рис. 10. Aberrация комы и вид пятна рассеяния

изображения. Для вогнутого сферического зеркала это относительное отверстие должно быть не более

$$A_{\max} = 0,659 \sqrt[3]{\frac{1}{D}};$$

а относительное фокусное расстояние не менее $V_{\min} = 1,516 \sqrt[3]{D}$. 100-миллиметровое зеркало при относительном отверстии 1/7 будет совершенно свободно от сферической aberrации.

Кома. Наклонные пучки света после преломления на линзе или отражения на вогнутом зеркале распространяются несимметрично относительно своей оси и дают в фокальной плоскости характерное пятно *комы* (рис. 10). Для параболического и сферического зеркал наибольший размер пятна комы в угловой мере равен

$$3\rho = \frac{3}{16} \omega A^2 \text{ (рад),}$$

где A — относительное отверстие, ω — угол между центром поля и изображением звезды, выраженный в радианах. Для того, чтобы получить выражение пятна комы в мм, нужно предыдущую формулу умножить на фокусное расстояние в миллиметрах. Например, зеркало диаметром 150 мм и с фокусным расстоянием 1050 мм на расстоянии $0,25^\circ$ даст пятно размером 3,4" вдоль большой его оси. Как решалась эта задача? Относительное отверстие параболиче-

ского зеркала $150/1050=1/7$, или $0,1429$. $0,25^\circ$ в радианной мере равно $0,0044$ (для этого нужно взять тангенс угла). Подставив эти величины в предыдущую формулу, получим величину наибольшей оси пятна комы равной $0,0000168$. Это в радианах. Взяв арктангенс этого угла, получим $0,000963^\circ$, или $3,4''$. Максимальное увеличение 150-миллиметрового телескопа составит примерно $230\times$. При таком увеличении и разрешающей силе глаза $2'$ ($120''$) на поле диаметром $8'$ практически кома не будет видна. Так как кома пропорциональна квадрату относительного отверстия, то диафрагмируя объектив в два раза, мы снижаем кому в четыре раза. Объектив с исправленной комой называется *апланатом*.

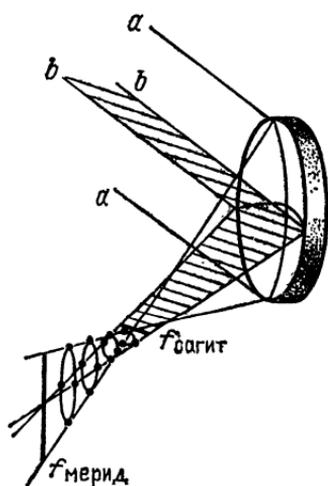


Рис. 11. Астигматизм: $a-a$ — меридиональный пучок, $b-b$ — сагиттальный пучок (заштриховано)

Астигматизм. Астигматизм — аберрация наклонных пучков (рис. 11). При попытке сфокусировать изображение звезды мы получим горизонтальный штрих. При перефокусировке — вертикальный. В промежуточных положениях будут получаться эллипсы, кружок и снова эллипсы.

Длина штриха равна

$$2a = A\omega^2 f.$$

Она пропорциональна квадрату угла и первой степени относительного отверстия. Это значит, что относительное отверстие в меньшей степени ответственно за астигматизм, но в ростом углового поля зрения астигматизм растет быстро. В приведенной формуле дана величина астигматического штриха, выраженная в миллиметрах. Чтобы ее выразить в угловой мере (в радианах), нужно величину $2a$ разделить на фокусное расстояние.

Кривизна поля. Аберрация *кривизна поля* выражается в том, что фокальная поверхность многих объективов не является плоскостью, а может быть поверхностью любой формы. Чаще всего она близка к сфере. У параболического зеркала она имеет сферическую форму и обращена вогнутой стороной к зеркалу. Радиус ее кривизны равен фокусному расстоянию зеркала.

Дисторсия выражается в том, что масштаб изображения на различном расстоянии от центра поля различен (рис. 12). *Дисторсия* может быть отрицательной — «бочкообразной» (особенно она выражена у объективов «рыбий глаз» и «олл-скай») и положительной — «подушкообразной». Положительная дисторсия чаще встречается у телеобъективов и

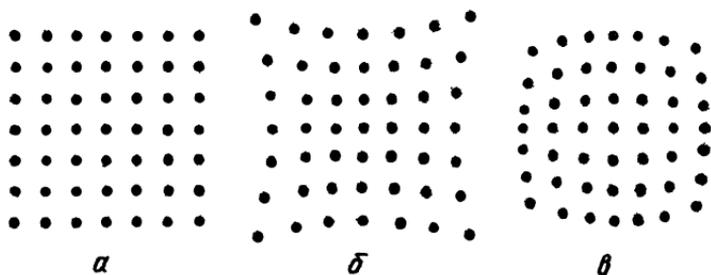


Рис. 12. Дисторсия. *a* — объект, *б* — положительная дисторсия, *в* — отрицательная дисторсия

зрительных труб. Параболическое и сферическое зеркала свободны от дисторсии. Свободен от дисторсии тонкий объектив, когда входной зрачок (диафрагма) совмещен с линзой. Свободно от дисторсии сферическое зеркало, входной зрачок которого совмещен с центром кривизны, как у камеры Шмидта.

Хроматические аберрации. Эти две аберрации вызваны тем, что показатель преломления стекол для различных длин волн различен. Стекло марки «крон 8», например для света с длиной волны 656,3 нм (водородная линия H_{α} или линия С) имеет показатель преломления $n_C=1,51390$. Для желтого излучения натрия с длинами волн 589,6 и 589,0 (линия D) $n_D=1,51630$. Для голубой линии водорода H_{β} с длиной волны 486,1 нм (линия F) $n_F=1,52196$ и т. п. Поэтому фокусные расстояния одной и той же линзы для различных длин различны. Голубые лучи фокусируются ближе к линзе, а красные — дальше. Это так называемый *хроматизм положения* (рис. 13, *a*). Разница между фокусными расстояниями для света с длиной волны 656,3 нм (линия С) и для 486,1 нм (линия F) называется *продольным хроматизмом*.

Радиус поперечного кружка хроматизма в $2f$ раза меньше величины продольного хроматизма.

Разница между показателем преломления для лучей С и F n_F-n_C называется *средней дисперсией* стекла, а отно-

шение $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ называется *числом Аббе*. Из него следует важное отношение

$$\nu \approx \frac{f'_D}{f'_F - f'_C} = \frac{f'_D}{\Delta f_{FC}}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{\nu} = \frac{\Delta f_{FC}}{f'}$$

Число Аббе показывает, какую часть фокусного расстояния линзы составляет продольный хроматизм. Для самого распространенного стекла К8 $\nu = 64,06$. Значит, продольный

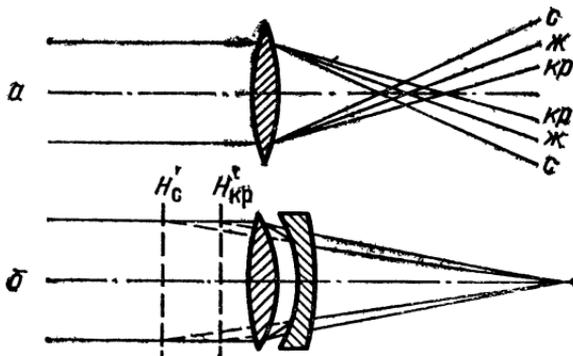


Рис. 13. Хроматическая aberrация: а — хроматизм положения, б — хроматизм увеличения

хроматизм любой линзы из этого стекла составит $\frac{1}{64,06} f = 0,0156 f$ или 1,56 % фокусного расстояния. Радиус абerrационного кружка рассеяния равен $\rho_{C, F} = \frac{D}{4\nu}$. Для стекла «крон 8» (К8) он равен $f_{CF} = 0,0039D$. В угловой мере та же величина равна $\eta_{C, F} = \frac{\rho_{C, F}}{f} = \frac{A}{4\nu}$. Для К8 $\rho_{F, C} = 0,0039A$.

То, о чем здесь сказано, давно обнаружено эмпирически. Огромные фокусные расстояния при умеренных диаметрах объективов однолинзовых рефракторов XVIII в. объяснялись тем, что при малых относительных отверстиях угловой поперечник хроматического кружка становился незаметным.

У автора имеется 150-миллиметровая одиночная линза из стекла К8 с фокусным расстоянием 7 м. Ее хроматизм достаточно велик и она мало пригодна для наблюдений в белом свете. Но, если ее задиафрагмировать до 50 мм, изображение становится заметно лучше. Для идеальных изображений нужна диафрагма 35—40 мм.

Если стекла группы «крон» имеют сравнительно большую дисперсию, то вторая группа — «флинты» малую. Так, стекло Ф2 обладает коэффициентом дисперсии $\nu=36,60$. Продольный хроматизм линзы из стекла Ф2 примерно вдвое больше: $\Delta f_{C, F} = \frac{1}{36,6} f = 0,0273 f$. Чтобы хроматизм линз из стекол К8 и Ф2 уравнять, нужно, чтобы оптическая сила флинтовой линзы была примерно вдвое меньше: $\Phi_{\text{Ф}} = \Phi_{\text{К}} \cdot \frac{0,0156}{0,0273}$.

Часто конструктору удается свести в одну точку лучи С и F, но при этом главные плоскости объектива для этих лучей могут оказаться несовпадающими. Поэтому, несмотря на то, что изображения в этих лучах лежат в одной плоскости, фокусные расстояния оказываются неравными. От этого неравны и масштабы изображения. Одно из изображений (например, синее) имеет чуть больший масштаб. Поэтому изображение яркого протяженного объекта, например Луны, оказывается окруженным цветовым ореолом. В нашем случае — это синий ореол Звезды, лежащие на краю поля зрения, вытягиваются в короткие спектрики. Это так называемый *хроматизм увеличения* (рис. 13, б).

§ 6. АХРОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ

В общем случае оптические силы линз из двух разных стекол и их числа Аббе можно подобрать так, чтобы хроматизм пары был равен нулю (такие системы называются *ахроматическими*, или *ахроматами*). Тогда $\frac{\Phi'}{\Phi''} = \frac{\nu'}{\nu''}$. В этом случае лучи С и F соберутся в одной точке, а все остальные в непосредственной близости. С таким объективом наблюдатель увидит значительно меньший ореол вокруг звезды. Это так называемый *остаточный хроматизм*.

Рассмотрим конкретный пример. Предположим, что мы изготовили положительную линзу из стекла К8 оптической силы +1 диоптрия. Тогда для определения оптической силы отрицательной линзы из стекла Ф2 воспользуемся отношением оптических сил линз к числу Аббе стекол:

$$\frac{+1}{64,06} = \frac{-\Phi''}{36,60},$$

откуда $\Phi'' = -36,6 \cdot 1 : 64,06 = -0,572$. Фокусное расстояние этой линзы равно $f'' = -1000 : 0,572 = -1750$ мм. Оптическая сила сложенных вместе линз равна $\Phi_{\text{вкв}} = +1 - 0,572 = 0,428$, а фокусное расстояние равно

$f = 1000 : 0,428 = 2337$ мм. При большом относительном отверстии остаточный хроматизм такой пары будет еще значителен. Поэтому выберем умеренное относительное отверстие по формуле, рекомендованной Г. Дмитриевым и Д. Бэкером [11],

$$f'_{\text{ахр}} = 0,2D^2 [\text{мм}] \quad \text{или} \quad D = \sqrt{5f'}$$

В приведенном выше примере диаметр ахромата не следует брать больше $D_{\text{max}} = \sqrt{5 \cdot 2337} = 108$ мм.

75-миллиметровый объектив может иметь относительное отверстие $1/15$, а фокусное расстояние 1280 мм, но уже 150-миллиметровый ахромат должен иметь относительное отверстие не более $1/30$, а фокусное расстояние не короче 4500 мм. Чаще всего ахроматические рефракторы более светосильны ($1/15$ — $1/20$), в результате их хроматическая aberrация превышает допустимую и тем больше, чем больше диаметр объектива.

В неответственных случаях, например при расчете ахроматических линз для окуляров, можно упростить расчет, считая, что показатели преломления К8 и Ф2 примерно равны, а число Аббе у К8 примерно вдвое больше, чем у Ф2. В этом случае положительную линзу из К8 можно сделать двояковыпуклой, а отрицательную из Ф2 плосковогнутой. Радиусы кривизны всех поверхностей равны. Сложив линзы вместе, мы получим ахромат с фокусным расстоянием, равным удвоенному радиусу кривизны неплоских поверхностей. Например,

$$R_1 = R_2 = -R_3 = 20 \text{ мм}, \quad f_{\text{ахр}} \approx 40 \text{ мм}.$$

§ 7. ИДЕАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Простейшее из возможных изображений — изображение светящейся точки. Это так сказать «атом» изображения. Но как и всякий атом, этот «атом» также имеет сложную структуру. При очень больших увеличениях при идеальных атмосферных условиях в высококачественный телескоп вместо точечного изображения звезды мы увидим круглое пятнышко света, окруженное несколькими светлыми колечками, яркость которых быстро падает при удалении от центра кружка. Это так называемая *дифракционная картина* точки. Центральный кружок называют *дифракционным кружком*, или *кружком Эри* в честь английского астронома Джорджа Эри, исследовавшего в первой половине прошлого

века это явление. Причина такой картины заключается в волновой природе света, и с этим ничего нельзя поделать (рис. 14, а).

Простой способ увидеть дифракционную картину — закрыть входное отверстие телескопа диафрагмой диаметром 10—15 мм при увеличении не менее 30—50×. Даже с помощью полевого бинокля можно наблюдать дифракционную картину, если его объектив закрыть куском картона с отверстием диаметром 2—3 мм. Конечно, наблюдать нужно яркие звезды.

В центральном кружке сконцентрировано 83,78 % всей энергии, собранной телескопом от звезды (рис. 14, б). В первом кольце 7,22, во втором 2,77 %, в третьем 1,46 % и т. д. Центральный кружок, как и кольца, не имеет резких границ. Поэтому условились считать радиусом кружка Эри расстояние от его центра до первого минимума интенсивности света между пятном и первым кольцом.

Радиус кружка Эри (радиус первого темного кольца) равен

$$r = 1,22\lambda\gamma,$$

где λ — длина волны света.

Например, если длина волны света красной водородной линии равна 0,6563 мкм, то при относительном отверстии, скажем, $A=1/6$ радиус кружка Эри будет равен

$$r = 1,22 \cdot 0,6563 \cdot 6 = 4,8 \text{ мкм.}$$

Это маленькая величина, но в сильный окуляр ее можно рассмотреть. Для голубой водородной линии H_β радиус кружка Эри равен 3,6 мкм. Разница в радиусах кружков и колец для различных длин волн приводит к тому, что для белого света дифракционные кольца окрашены в радужные цвета: внутренняя часть в голубой, внешняя — в красный.

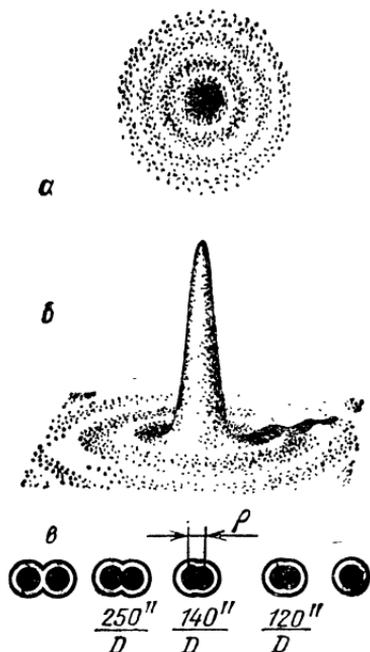


Рис. 14. Дифракционная точка: а — сильно увеличенный вид, б — трехмерная модель, в — изображение тесных звездных пар

При визуальных наблюдениях важно знать угловой радиус кружка Эри. Для этого его линейную величину разделим на фокусное расстояние объектива или зеркала:

$$\alpha_r = \frac{r}{f} = \frac{1,22\lambda}{D}.$$

В этом случае угловой радиус выражен в радианах. Чтобы его выразить в секундах дуги, правую часть формулы нужно умножить на 206 265". Для большинства практических целей можно умножать на 200 000. Под таким углом дифракционный кружок виден в проекции на небесную сферу.

Максимальная чувствительность глаза лежит в области желто-зеленой части спектра около 0,555 мкм. Если это значение подставить в предыдущую формулу, то получим диаметр первого темного кольца, выраженный в угловой мере,

$$\alpha_r = \frac{1,22 \cdot 0,000555}{D} \cdot 206265 = \frac{139,7''}{D} \approx \frac{140}{D}.$$

Диаметр второго темного кольца равен

$$r = 2,22\lambda \nu, \quad \alpha_r = \frac{2,22\lambda}{D} = \frac{2,22 \cdot 0,000555}{D} \cdot 206265 = \frac{254''}{D}.$$

Описанная картина дифракционного изображения светящейся точки характерна для круглого отверстия объектива без экранирования пучка света вспомогательными деталями. Это встречается у рефракторов и телескопов-брахитов (см. § 11 этой главы). При экранировании пучка вспомогательным зеркалом яркость колец возрастает, а центрального пучка падает. Если диаметр оправы вторичного зеркала составляет 0,05 диаметра главного, то в кружке Эри концентрируется не 0,838, а 0,832 общей энергии, при экранировании в 0,1 от диаметра главного зеркала — 0,818, при экранировании 0,15—0,795, при экранировании 0,25—0,732, при экранировании 0,3—0,682, при 0,4—0,584, при 0,5—0,579.

Одновременно с ростом экранирования уменьшается радиус первого темного кольца. При экранировании до 0,9 диаметра главного зеркала радиус первого темного кольца составляет примерно 65 % от первоначального. Этим путем можно было бы повысить разрешение телескопа, но, к сожалению, при таком значительном экранировании слишком велики светопотери, да и яркость светлых колец недопустимо высока.

Мы говорили ранее о том, что при искажении фронта волны не более $1/4$ длины волны изображение остается идеальным. В действительности дело обстоит сложнее. При любых искажениях фронта дифракционная картина меняется: яркость колец возрастает, как показано в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Распределение яркости в дифракционной картине

Искажения фронта на $\lambda/4$	I_0	I_1	I_2	r_1	r_2	P
Идеальное изображение	1,00	0,017	0,0042	1,22	2,22	0,84
Экранирование (0,2D)	0,92	0,028	0,0014	1,17	2,36	0,77
Сферическая аберрация	0,80	0,030	0,0034	1,20	2,87	0,68
Дефокусировка	0,81	0,032	0,0054	1,22	2,23	0,74

Здесь I_0 , I_1 , I_2 — интенсивность центрального кружка Эри, первого и второго колец при условии, что в идеальной дифракционной картине интенсивность центрального пятна принимается за 1, r_1 и r_2 — коэффициенты для формулы радиусов первого и второго темного колец, P — часть световой энергии, сконцентрированная в центральном пятне. В таблице первая строка соответствует идеальному изображению, вторая — то же при экранировании пучка до 0,2 по диаметру, третья — концентрация в кружке Эри при наличии сферической аберрации, когда искажение составляет $\lambda/4$, последняя строка соответствует искажению фронта на $\lambda/4$ от небольшой расфокусировки.

В некоторых случаях при наблюдении двойных звезд, когда блеск спутника мал, а его изображение попадает на первое кольцо, спутник сливается с кольцом и становится невидимым. В этом случае полезно немного задиафрагмировать объект с таким расчетом, чтобы диаметры колец возросли и спутник оказался в первом темном кольце.

У рефлекторов Ньютона, Кассегрена и камер Шмидта вторичное зеркало или кассета удерживается растяжками. Они вносят заметные искажения в вид дифракционной точки (рис. 15). От каждой из растяжек образуется по паре лучей. Поэтому три растяжки дают шесть лучей, а четыре — только четыре. Лучей можно избежать, если вместо растяжек применить специальные искривленные опоры особой формы (рис. 15, а). Лучи становятся практически незаметными, но яркость колец возрастает. Значительно лучше резко уменьшить толщину растяжек, и тогда лучи становятся

замечными только у самых ярких звезд. Последнее решение, пожалуй, наиболее практично. Вообще же, если растяжки экранируют 1 % зеркала по площади, то интенсивность всех четырех лучей составляет всего 1/40 000 интенсивности кружка Эри.

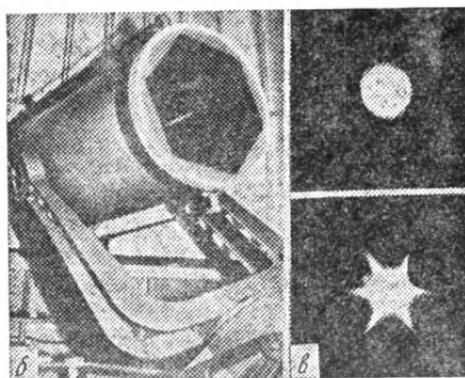
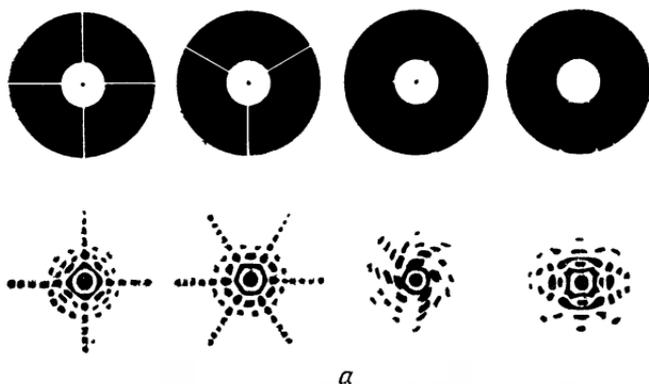


Рис. 15. Влияние формы растяжек на вид дифракционной картины (а), шестиугольная маска на входном отверстии телескопа (б), образовавшиеся от маски лучи уменьшили яркость центрального пятна, в результате чего стал виден спутник звезды (в)

Интересно, что независимо от формы и величины дифракционных лучей количество световой энергии во всем дифракционном пятне не меняется с изменением их числа и величины. Это значит, что при длинных и интенсивных лучах часть энергии «перекачивается» из центрального пятна в лучи и кружок Эри становится меньше. Поэтому разрешающая сила в промежутках между лучами выше, чем в случае идеального, без лучей, пятна. Интересно использовал это

обстоятельство любитель Деннис ди Чикко (США), чтобы получить фотографию Ригеля (звезды в созвездии Ориона) и его спутника. Разница в блеске у этой пары велика и спутник «тонет» в ореоле центральной звезды. Ди Чикко установил перед своим 360-миллиметровым телескопом

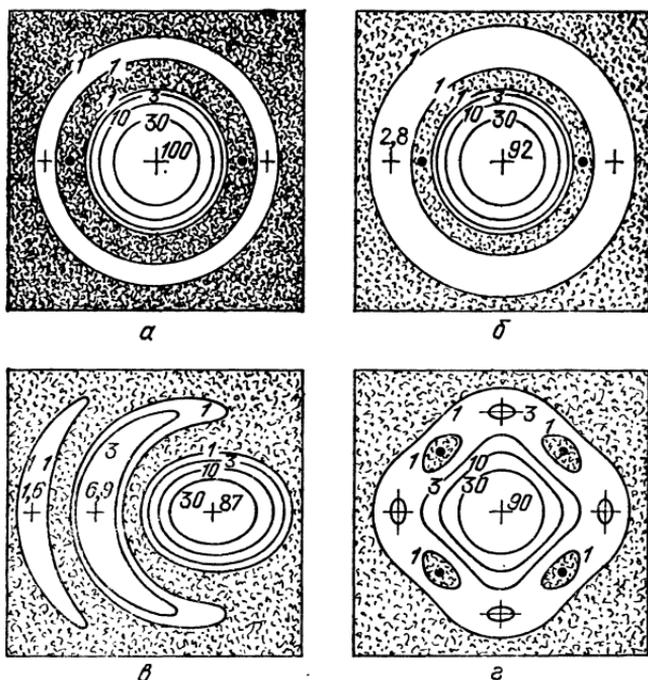


Рис. 16. Дифракционное изображение звезды в присутствии аберраций: а — идеальное изображение, б — сферическая аберрация, в — кома, г — астигматизм, плоскость расположена между двумя фокалями. Рисунок заимствован у оптика Х. Блёте (Нидерланды)

«Силестрон» шестиугольную маску (рис. 15, б) и сориентировал ее так, чтобы изображение спутника оказалось между лучами. В результате с окулярной камерой он получил снимок, где Ригель не экранирует спутник своим ореолом (рис. 15, в).

Спутник Сириуса 9^m (9-й звездной величины) был открыт только в конце прошлого века с помощью 90-сантиметрового рефрактора А. Кларка. Теперь, применяя маску, некоторым любителям удается сфотографировать эту двойную звезду даже с помощью 20-сантиметрового телескопа.

На рис 16 дан вид дифракционного изображения звезды в присутствии некоторых аберраций, когда изображение ис-

порчено в пределах $\lambda/4$ сферической аберрацией, комой и астигматизмом. Как видим, при наличии аберраций в пределах условия Рэлея дифракционная картина заметно искажена. При отражении на зеркале угол отражения удваивается и ошибки на поверхности должны быть не больше $\lambda/8$ или 0,00007 мм для желто-зеленой части спектра. В некоторых зарубежных руководствах рекомендуется вычислять допустимые погрешности для коротких волн синей части 0,00045. Тогда допустимая погрешность должна быть не больше 0,000056 мм.

Мы видели, что условие Рэлея недостаточно жестко. Поэтому Д. Д. Максудов полагал, что ошибки на поверхности зеркала должны быть не больше $\lambda/10$. Марешаль считает, что допуск нужно уменьшить до $\lambda/14$, тогда как некоторые из американских оптиков рекомендуют допуск для зеркальной поверхности $\lambda/16$. Впрочем, многие астрономы-наблюдатели полагают, что традиционного допуска Рэлея вполне достаточно для практических целей. Это значит, что, если взять три зеркала, выполненных с точностью $\lambda/8$, $\lambda/80$ и $\lambda/800$, практически никто из наблюдателей не сумеет отличить их по качеству.

Конечно зеркала с точностью поверхности $\lambda/7$ или $\lambda/6$ тоже хороши, но лучше сделать зеркало с точностью $\lambda/8$ — $\lambda/16$. Дальнейшее улучшение качества зеркала совершенно бессмысленно.

§ 8. РАЗРЕШАЮЩАЯ СИЛА ТЕЛЕСКОПА

Для 150-миллиметрового телескопа угловой радиус кружка Эри равен $140 : 150 = 0,93''$. Рэлей предложил считать, что если две звезды расположены на расстоянии одного радиуса кружка Эри, то они, хотя и будут частично накладываться друг на друга, но отчетливо будет видна их двойственность. По Рэлею телескоп уверенно разрешает двойную звезду, если угловое расстояние между ними равно $\alpha_r = \frac{140''}{D}$ (см. рис. 14, в и табл. 2).

Опытные наблюдатели при хороших атмосферных условиях различают и более тесные пары. Поэтому часто можно встретить другой критерий, когда считается, что пара разрешается, если расстояние между компонентами 0,85 радиуса кружка Эри, или разрешение телескопа $\alpha_{0,85} = \frac{120''}{D}$.

Наиболее опытные наблюдатели двойных звезд по тонким эффектам в дифракционной картине в состоянии разрешить

Характеристики идеальных визуальных телескопов

D, мм	Предельные увеличения		Проницающая способность		Разрешающая сила	
	$d_{зр}=6$ мм	$d_{зр}=0,7$ мм	$d_{зр}=6$ мм	$d_{зр}=1,0$ мм	$\alpha=140''/D$	$\alpha=120''/D$
50	8	71	8,1	10,0	2,8	2,4
75	12	107	9,2	11,0	1,9	1,6
100	16	143	9,5	11,6	1,4	1,2
130	21	186	10,2	12,2	1,1	0,92
150	25	214	10,4	12,5	0,93	0,80
200	33	286	10,9	13,1	0,70	0,60
250	41	357	11,6	13,6	0,56	0,48
300	50	429	12,0	14,0	0,47	0,40
350	59	500	12,4	14,4	0,40	0,34
400	68	571	12,6	14,7	0,35	0,30
500	83	714	13,2	15,2	0,28	0,24
600	100	857	13,6	15,6	0,23	0,20

двойную звезду, если расстояние между компонентами всего $\alpha = \frac{70''}{D}$ [26]. Но все это при исключительных обстоятельствах. Поэтому примем для себя значение $\alpha, = \frac{140''}{D}$ как наиболее надежное и обязательное для любого хорошего телескопа.

Все сказанное относится к случаю, когда блеск обеих звезд пары равен. Если же он отличается на 0,5 звездной величины, то предельный угол возрастает на 15 %, если разница в блеске 1^m , то угол возрастает на 25 %, при разности $1,5^m$ — на 30 %, при разности $2,0^m$ — на 40 % и при разности $2,5^m$ — на 50 % [26].

В практике наблюдений мы сталкиваемся не только со светящимися точками, но и со светлыми и темными линиями или темными точками на светлом фоне.

Здесь многое зависит от контраста между фоном и объектом.

Две черные точки на светлом, но неслепящем фоне видны, если расстояние между ними $\alpha = \frac{140''}{D}$. Но одиночная точка на светлом фоне будет еще видна, если ее видимые размеры не меньше $r_{\min} = \frac{18''}{D}$. Одиночная черная линия на светлом фоне еще различима, если ее угловая видимая

ширина не менее $R_{\min} = \frac{2,0''}{D}$ [1, 2]. Все это относится к случаю безупречных атмосферных условий и к совершенно чистому без царапин и пыли на поверхности объективу или зеркалу. В противном случае контраст мелких деталей резко падает и предельные углы возрастают. Объектив или зеркало для наблюдений Луны и планет должны содержаться в идеальном состоянии.

Разрешающая сила максимальна при некоторой оптимальной яркости объекта. По мере того как она возрастает или падает разрешающая сила снижается. Особенно это заметно при наблюдении слабых объектов вроде туманностей, комет, далеких скоплений, не разрешаемых на звезды. Разрешающая способность глаза при таких яркостях катастрофически падает. При пороговых яркостях она равняется нескольким градусам для невооруженного глаза. Например, в туманности Андромеды М 31 уже в непосредственной близости от центральной части при наблюдении в 250-миллиметровый рефлектор с увеличением $40\times$ пылевой рукав виден лишь на пределе. Его действительная видимая ширина $3'$. Значит, при увеличении $40\times$ он виден наблюдателю на пределе под углом 2° . Таким образом, при яркости спирали $5,8 \cdot 10^{-5}$ кд/м² (23^m с квадратной секунды) разрешение глаза падает до 2° ! По этой причине галактика М 33, несмотря на большую интегральную звездную величину (6^m), невооруженным глазом практически не видна даже при темном и прозрачном небе.

§ 9. ПРЕДЕЛЬНЫЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА

Ясно, что увеличения, при которых отчетливо видна дифракционная картина, бессмысленны. Новых подробностей мы не видим, а яркость и поле зрения продолжают уменьшаться. При выходных зрачках диаметром 1 мм или, иначе говоря, при увеличениях, численно равных диаметру объектива в миллиметрах, появляются первые признаки дифракционной картины. Это увеличение называют *разрешающим*. Можно еще несколько повысить увеличение до выходного зрачка 0,7 мм, чтобы картина Эри была видна уверенно, а разрешение надежным. Это увеличение называют *предельным* и оно равно

$$\Gamma_{\max} = \frac{D [\text{мм}]}{0,7 [\text{мм}]} = 1,4 D.$$

При наблюдении двойных звезд или при астроклиматических наблюдениях важно видеть дифракционную карти-

ну очень отчетливо во всех деталях. Тогда увеличение повышают еще и применяют выходные зрачки 0,5, 0,3 и даже 0,2 мм.

Если выходной зрачок телескопа, а значит, и диаметр выходящего из окуляра пучка света больше диаметра зрачка глаза наблюдателя, то часть собранного телескопом света не попадает в глаз. Это равносильно тому, что телескоп

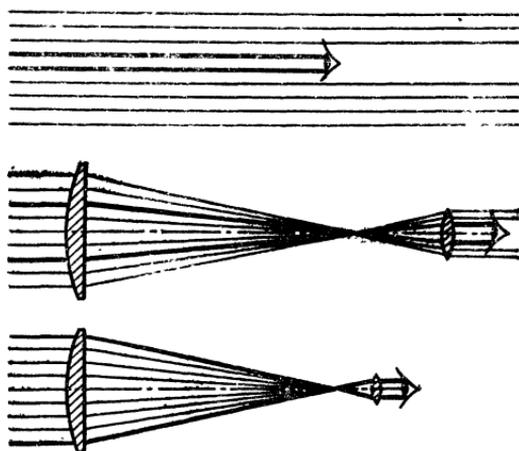


Рис. 17. Максимальный разумный выходной зрачок телескопа

задиафрагмирован (рис. 17). Следовательно, выходной зрачок телескопа не должен быть больше 6—8 мм. Для определенности его принимают равным 6 мм. Тогда минимальное разумное увеличение телескопа равно

$$\Gamma_{\min} = \frac{D \text{ [мм]}}{6 \text{ [мм]}}.$$

Например, для 250-миллиметрового рефлектора минимальное увеличение равно примерно $40\times$.

Каждый наблюдатель должен знать диаметр своего зрачка в полной темноте. Его можно измерить несколькими способами. В полной темноте рассматриваем неяркую точку, например звезду $1-2^m$, через линзу с оптической силой $+2$. Это для нормального глаза. Если читатель носит очки, то к диоптрийности его очков нужно добавить $+2$. В этом случае звезда представляется размытым пятнышком. Подносим к глазу плексигласовую миллиметровую линейку и сквозь ее деления смотрим на звезду. На фоне пятна видны штрихи линейки. Количество штрихов на светлом пятне — это и есть диаметр зрачка наблюдателя (рис. 18).

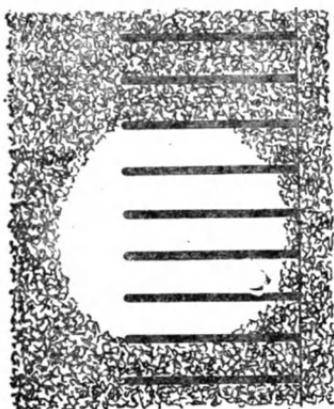


Рис. 18. Определение диаметра зрачка глаза с помощью прозрачной линейки



Рис. 19. Определение диаметра зрачка с лампой-вспышкой. Снимок сделан после 30-минутной адаптации глаз в полной темноте. Перепуганный вид экспериментатора-шестиклассника не должен смущать: процедура совершенно безопасна

Можно сфотографироваться при помощи фотовспышки. После 20—30 минутной адаптации в темноте подносим к лицу миллиметровую линейку и фотографируемся крупным планом. На фотографии оцениваем диаметр зрачка (рис. 19).

§ 10. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕЛЕСКОПА

Количество света, прошедшего через объектив, зависит только от его диаметра. Но видимая яркость протяженного объекта в телескоп падает с ростом увеличения. Это и понятно: при большом увеличении одно и то же количество световой энергии распределяется на большую площадь сетчатки, и субъективное ощущение яркости падает. Чем меньше увеличение данного телескопа, тем больше визуальная яркость протяженного объекта. Как мы видели, при зрачке выхода больше зрачка глаза часть света бессмысленно теряется. Поэтому максимальная видимая яркость ночью получается при выходном зрачке 6 мм. Очень важно то, что при увеличении диаметра объектива (или зеркала) видимая яркость протяженного объекта не увеличивается. Так, равнозрачковое увеличение 100-миллиметрового теле-

скопа равно $17\times$. Если теперь взять телескоп диаметром 200 мм, то количество прошедшего через объектив света будет в 4 раза больше. Но для 200-миллиметрового телескопа равнозрачковое увеличение равно $34\times$. В последнем случае изображение объекта, например туманности, увеличится вдвое, а площадь, которую оно займет на сетчатке, возрастет в 4 раза. Ясно, что вчетверо уменьшится освещенность сетчатки и вчетверо упадет видимая наблюдателем яркость. Иначе говоря, все телескопы при равнозрачковом (минимальном разумном) увеличении показывают протяженные объекты одинаковой яркости, и эта яркость та же, что и яркость для невооруженного глаза.

Почему же в более крупный телескоп слабые объекты видны явно более эффектно? Дело в том, что при наблюдении в крупный телескоп возрастают видимые размеры объекта, и глаз начинает различать детали, которые он не видел при меньших увеличениях (см. конец § 7).

В течение десятилетий существует одно из самых нелепых утверждений, что светосильные телескопы, т. е. телескопы с большим относительным отверстием, предпочтительнее для наблюдений комет и туманностей. Предыдущие рассуждения показывают, что телескоп с большим относительным отверстием потребует для равнозрачкового увеличения короткофокусный окуляр, а телескоп с малым относительным отверстием — длиннофокусный. В общем случае

$$f_{\text{ок}} = V \cdot d_{\text{сп}},$$

для равнозрачкового увеличения нужен окуляр с фокусным расстоянием

$$f_{\text{ок}} = V \cdot b.$$

Например, при относительном отверстии объектива $1/10$ (относительное фокусное расстояние $V=10$) потребуется окуляр с фокусным расстоянием $f_{\text{ок}}=10 \times 6=60$ мм.

Если под светосилой понимать большие возможности телескопа при рассматривании слабых протяженных объектов, то ясно, что только телескоп с большим диаметром и меньшими световыми потерями можно с натяжкой назвать светосильным. Относительное отверстие здесь ни при чем.

Рассмотрим вопрос о предельно слабых звездах, видимых в телескоп. Большой объектив соберет больше света, и точечные изображения звезд будут ярче. С другой стороны, при возрастании увеличения небо, являясь слабым протяженным объектом, будет выглядеть более темным, и на его фоне слабые точечные звезды выступят заметнее. Так

будет до тех пор, пока увеличение не достигнет разрешающего, когда появятся первые признаки дифракционной картины. Тогда звезды станут видны, как крошечные, но уже протяженные объекты, и при дальнейшем росте увеличения их яркость начнет падать. И. Боуэн и Р. Колман дают эмпирическую формулу, которая учитывает и увеличение телескопа и размывание звездных изображений атмосферной турбулентностью,

$$m_{\text{vis}} = C + 2,5 \lg D + 2,5 \lg \Gamma,$$

где D — диаметр объектива в см, Γ — увеличение телескопа между равнозрачковым и разрешающим, C — качество изображения. При отличных изображениях $C=3,9$, при хороших $C=3,3-3,9$, при средних $2,5-3,3$, при плохих $C=1,8-2,5$, при очень плохих $C < 1,8$.

Для практического определения проникающей силы телескопа существует несколько природных тест-объектов. Например, Плеяды содержат 28 звезд ярче $7,5^m$, и по ним можно испытать бинокль или подзорную трубу. Приложение 1 показывает в Плеядах звезды до 11^m . Этого достаточно для испытаний труб диаметром до 75—80 мм. Зная, что в шаровом скоплении $M 13$ в созвездии Геркулеса имеется около 30 звезд ярче $13,6^m$, можно испытать и 150-миллиметровый телескоп. В его поле зрения должно быть видно не только туманное пятно скопления, но и «мелкая звездная пыль» внутри него.

Нужно ли говорить, что для подобных испытаний нужны ночи с исключительно прозрачным и черным небом, когда невооруженным глазом видны звезды до $6,2-6,5^m$.

§ 11. ТИПЫ ТЕЛЕСКОПОВ

Первым телескопом был телескоп-рефрактор с одиночной линзой в качестве объектива. В наше время рефракторы с одиночной линзой применяются, пожалуй, только в корнографах и некоторых спектральных приборах. Все современные рефракторы снабжены ахроматическими объективами. Крупнейший из них телескоп Йеркской обсерватории (США) с объективом диаметром 1 м. Он построен в конце прошлого века, и с тех пор профессионалы больше не строят гигантские рефракторы *). Их останавливают не только

*) Еще больший рефрактор был заказан до революции Россией в Англии. Его объектив имел диаметр 104 см (41 дюйм). К сожалению, многочисленные катаклизмы и трагедии XX века не позволили закончить этот проект, хотя и объектив, и монтировка, и купол были готовы [27].

трудности получения больших однородных оптических заготовок стекла, не только ограниченный диапазон волн, которые может пропустить линза, но главным образом слишком большой и практически неустранимый хроматизм.

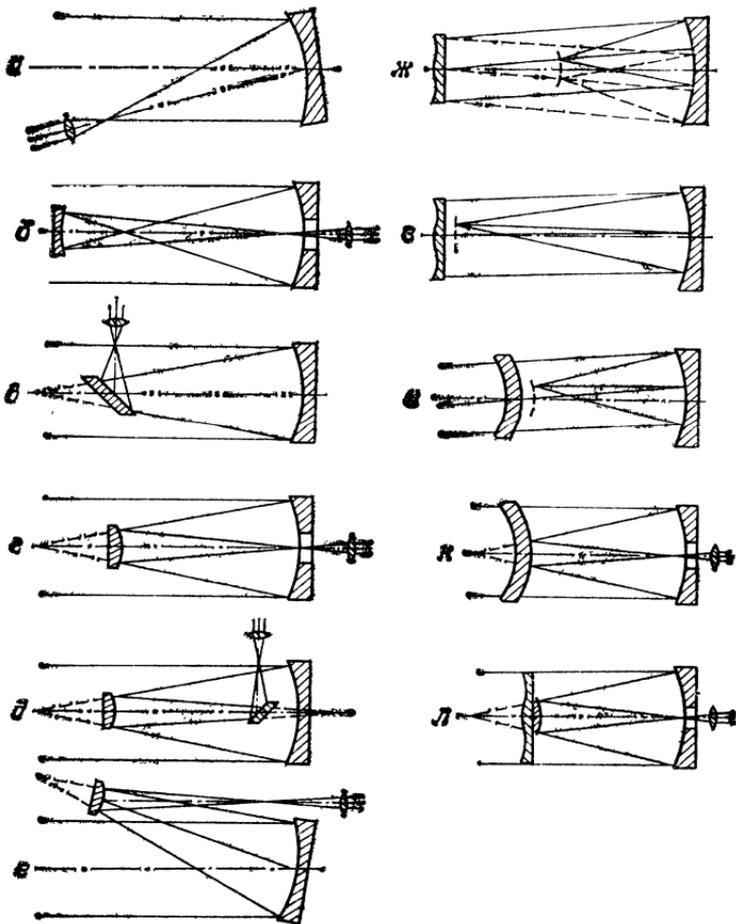


Рис. 20. Оптические схемы телескопов (подробности в тексте)

В 1616 г. Н. Цукки предложил заменить линзу вогнутым зеркалом, наклоненным к оптической оси телескопа (рис. 20, а). Во второй половине XVIII в. эту же систему независимо друг от друга предложили М. В. Ломоносов и У. Гершель. С помощью своих гигантских телескопов Гершель добился выдающихся результатов, и теперь эта систе-

ма носит его имя. Ее крупный недостаток — большая кома. Но если относительное отверстие невелико, кома практически незаметна. По этой схеме построены многие современные солнечные (башенные, горизонтальные или полярные) телескопы.

Если телескоп фотографический, кассету можно установить в фокусе на оси параболического зеркала. Она будет заслонять небольшую часть света, но сама кассета, естественно, в фокусе не видна. Впервые эта простейшая схема была использована в конце XIX в. у 91-сантиметрового Крослеевского рефлектора Ликской обсерватории. У крупнейших рефлекторов диаметром свыше 2,5 м в фокусе располагается и кабина наблюдателя. В СССР так устроен 6-метровый рефлектор специальной астрофизической обсерватории АН СССР близ станции Зеленчукской на Кавказе.

В 1663 г. шотландский математик Джеймс Грегори установил позади фокуса главного зеркала, на его оптической оси вторичное вогнутое зеркало, которое отражало пучок назад в центральное отверстие в зеркале. Сходимость пучка уменьшается, а фокусное расстояние возрастает в 4—6 раз (рис. 20, б).

Телескопы меньших размеров строятся по схеме, которую в 1667 г. предложил Исаак Ньютон (рис. 20, в). Здесь плоское диагональное зеркало, расположенное вблизи фокуса, отклоняет пучок света за пределы трубы, где изображение рассматривается через окуляр или фотографируется. Главное зеркало параболическое, но если относительное отверстие не слишком большое, оно может быть и сферическим.

В 1672 г. французский скульптор и художник Грийом Кассегрэн заменил вторичное вогнутое зеркало выпуклым. Его система при одинаковом главном зеркале короче системы Грегори примерно в 1,5 раза (рис. 20, г). Во второй половине XVII в. не было методов контроля вторичных зеркал, и первые телескопы Грегори и Кассегрена были построены примерно через 50 лет после изобретения. Особое распространение получили в те годы телескопы Грегори, так как они дают неперевернутое «земное» изображение и могут применяться для наблюдений земных объектов.

В настоящее время существует несколько модификаций телескопов Кассегрена и Грегори. Более всего известны системы Дблла — Кёркэма и Ричи — Кретьёна. Первая из них имеет эллиптическое (легкое в изготовлении) главное зеркало и сферическое вторичное. Предложили эту

систему в 1931 и 1932 гг. независимо друг от друга английский любитель астрономии Гóридж Долл (H. Dall) и американский любитель Алан Кёркэм (A. Kirkham). Одновременно (в 1932 г.) эту систему предложил и Д. Д. Максутов.

В 1922 г. Ш. Г. Кретьён рассчитал, что если главное зеркало кассегреновского телескопа сделать гиперболическим, то можно избавиться от комы, и телескоп становится апланатом. Построил телескоп этой системы Георг Ричи — французский оптик, ранее принимавший участие в строительстве 1,5- и 2,5-метровых рефлекторов обсерватории Маунт Вилсон.

В 1877 г. И. Фóрстер и К. Фрич вынесли вторичное кассегреновское зеркало за пределы пучка, падающего на главное зеркало (рис. 20, *е*). Эти телескопы, получившие название «брахиты», требуют внеосевого парабооида и гипербооида. Их изготовление сопряжено с большими трудностями. Но если относительное отверстие брахита и его диаметр невелики, зеркала могут быть сферическими. Кома и астигматизм главного зеркала компенсируются наклонами вторичного зеркала. Эти телескопы просты, и отсутствие экранирования делает изображения очень четкими и контрастными.

Крупнейшие телескопы нашего времени строятся по схеме Ричи — Кретьена. Наибольшие из них для обсерваторий Китт Пик и Серро Тололо имеют диаметр 4 м.

За 400-летнюю историю телескопа для объектива предлагались не раз сочетания линз и зеркал, но только в ХХ в. появилось несколько превосходных зеркально-линзовых телескопов.

В 1930 г. эстонский оптик, сотрудник Гамбургской обсерватории Барнхард Шмидт установил в центре кривизны сферического зеркала диафрагму, сразу устранив и кому и астигматизм (рис. 20, *ж*). Для устранения сферической aberrации он разместил в диафрагме линзу специальной формы. В результате получилась фотографическая камера с единственной aberrацией — кривизной поля и удивительными качествами: чем больше светосила камеры, тем лучше изображения, которые она дает, и больше поле зрения!

В 1935 г. Франклин Райт проанализировал камеру Шмидта при различных положениях пластины Шмидта относительно зеркала. В результате был найден интересный вариант, у которого хотя светосила и поле зрения меньше, чем у камеры Шмидта, но и длина вдвое меньше, а поле зрения плоское (рис. 20, *з*). В отличие от камеры

Шмидта камера Райта может быть и фотографической и визуальной.

В 1941 г. Д. Д. Максудов нашел, что сферическую aberrацию сферического зеркала можно компенсировать мениском большой кривизны. Найдя удачное расстояние между мениском и зеркалом, Максудов сумел избавиться от комы и астигматизма (рис. 20, *и*). Кривизну поля, как и в камере Шмидта, можно устранить, установив вблизи фокальной плоскости плоско-выпуклую линзу — так называемую линзу Пиацци — Смита. Поалюминировав центральную часть мениска, Максудов получил менисковые аналоги телескопов Кассегрена и Грегори (рис. 20, *к*). Были предложены менисковые аналоги практически всех интересных для астрономов телескопов.

В 1946 г. Джеймс Бэкер установил в камере Шмидта выпуклое вторичное зеркало и получил плоское поле. Несколько позже эта система была видоизменена и стала одной из самых совершенных систем: Шмидта — Кассегрена, которая на поле диаметром 2° дает дифракционное качество изображения (рис. 20, *л*). Между прочим, эти телескопы устанавливались на автоматических межпланетных станциях в США.

ГЛАВНОЕ ЗЕРКАЛО ТЕЛЕСКОПА-РЕФЛЕКТОРА

§ 1. КАК МЫ БУДЕМ ДЕЙСТВОВАТЬ

Замечательно, что практически для всех типов телескопов-рефлекторов нужно сделать главное зеркало сферическим либо параболическим. Поэтому нам следует подробно рассмотреть технологию изготовления главного сферического и параболического зеркал.

Для зеркала потребуется стеклянная заготовка достаточно толстая, чтобы предотвратить прогибы под действием собственного веса, которые могут привести к ухудшению качества изображения в телескопе.

Для того чтобы придать одной из поверхностей этой заготовки нужную кривизну, нам придется с помощью грубого абразивного порошка на специальном металлическом шлифовальнике или с помощью других средств вышлифовать углубление. Грубую матовость «ободранной» поверхности придется затем сделать мелкой (тонкой). Это мы делаем с помощью более мелких абразивных порошков. Порошки, возможно, придется приготовить самим. Поэтому мы даем описание процесса получения абразивов и их калибровки.

Чтобы получить идеально гладкую поверхность, зеркало придется отполировать. Для этого специальное основание, которым может служить шлифовальник, мы покроем слоем полировальной смолы. Она получается смешиванием расплавленного битума и канифоли в определенной пропорции. Полировка ведется с помощью крокуса либо (и это лучше) полирита. Крокус можно получить самим, но он



полирует медленно *), а полирит, который придется искать в оптических мастерских, полирует вдвое быстрее.

Получив идеально гладкую поверхность, мы должны убедиться и в том, что она выполнена с точностью, которая требуется для высокоточных оптических деталей, т. е. очень близка к сфере или параболоиду. Это мы сделаем сравнительно простыми средствами — с помощью теневого метода Л. Фуко. Если поверхность окажется далекой от идеала, нам придется ее исправлять путем *фигуризации* до тех пор, пока мы не получим то, что требуется от первоклассной оптической детали.

Завершив фигуризацию, мы будем должны поалюминировать или посеребрить наше зеркало, так как стекло отражает только 4—5 % падающего на него света. После алюминирования зеркало будет отражать 80 % света.

Хотя для телескопа придется сделать еще несколько оптических деталей и узлов, а также выполнить много механических работ, все-таки главным и менее всего знакомым делом является изготовление именно главного зеркала. Здесь важно подчеркнуть, что изготовление главного зеркала занимает примерно 5—10 % всего времени на постройку телескопа, но не менее важно следующее: телескоп на плохой механике, хотя и с трудом, сможет иногда показывать интересные подробности жизни неба, тогда как телескоп с плохим главным зеркалом никогда не сможет показать ничего по-настоящему интересного. Об этом никогда не нужно забывать.

§ 2. ПОДРОБНЕЕ О ТОЧНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

Ни один мастер не в силах сделать математически точную поверхность. Поэтому рассмотрим вопрос о допустимых погрешностях поверхности зеркала. Точность поверхности зеркала должна быть не ниже $\lambda/8$ (см. § 7 этой главы).

Если мастер видит, что его зеркало не уклоняется от требуемого более чем на $\lambda/8$, он может прекращать фигуризацию. Глаз более всего чувствителен к свету с длиной волны 0,56 мкм, и значит, погрешности поверхности зеркала не должны превышать 0,07 мкм или 0,00007 мм!

Большинство рефлекторов имеет параболическое главное зеркало. Нельзя ли обойтись сферическим зеркалом: ведь его сделать гораздо проще? Ясно, что если поверхность

*) Красный сурик — это и есть крокус, но его нужно тщательно взмучить, чтобы отделить грубые частицы (см. § 6 этой главы).

Таблица 3

Минимальное относительное фокусное расстояние сферического зеркала в зависимости от требований к точности поверхности

D, мм	Для $\lambda/4$		Для $\lambda/8$		Для $\lambda/16$	
	v	f	v	f	v	f
50	4,4	220	5,6	280	7,0	352
60	4,7	280	6,0	360	7,4	446
80	5,2	416	6,5	520	8,2	655
100	5,6	560	7,1	710	8,8	880
120	5,9	710	7,5	900	9,4	1125
150	6,4	956	8,1	1215	10,1	1514
180	6,8	1220	8,6	1550	10,7	1931
210	7,1	1498	9,0	1890	11,3	2823
250	7,6	1889	9,6	2400	12,0	2992
300	8,0	2409	10,2	3060	12,7	3816
360	8,5	3073	10,8	3890	13,5	4866
400	8,8	3537	11,2	4480	14,0	5600

этого сферического зеркала не будет отстоять от параболической поверхности больше чем на 0,00007 мм, то оно будет работать практически так же хорошо. Отступление параболоида от ближайшей сферы сравнения (его асферичность) равна

$$\delta_{\max} = \frac{D}{4096v^3} e^2.$$

Для парабоида $e^2=1$, и формула несколько упрощается. Подставим в эту формулу значение асферичности 0,00007.

Тогда $v_{\min}^3 = \frac{D}{4096 \cdot 0,00007} = 3,5D$ или $v = 1,52 \sqrt[3]{D}$ *).

Можно поступить наоборот: задавшись относительным фокусным расстоянием, вычислить предельный диаметр зеркала. Тогда $D_{\max} = 0,29v^3$.

Таблица 3 иллюстрирует это. Например, 100-миллиметровое зеркало не может иметь относительное фокусное расстояние больше чем $v_{\min} = 1,52 \sqrt[3]{100} = 1,52 \cdot 4,64 = 7,055$. Можно округлить до 7. Это значит, что если 100-миллиметровое сферическое зеркало имеет фокусное расстояние не

*) Для критерия $\lambda/10$ эта формула выглядит так: $v = 1,63 \sqrt[3]{D}$, для критерия $\lambda/14$ $v = 1,83 \sqrt[3]{D}$, для критерия $\lambda/16$ $v = 1,92 \sqrt[3]{D}$.

менее 700 мм, то качество изображения, которое оно дает, не ниже качества изображения параболического зеркала. Еще пример. Для относительного отверстия $1/10$ можно взять диаметр зеркала не больше $D=0,29 \cdot 10^3=287$ мм или примерно 290 мм. Любое зеркало меньшего диаметра с фокусным расстоянием 2900 мм может быть сферическим без ущерба для качества изображения. Но зеркала большого диаметра с тем же фокусным расстоянием придется параболизировать.

Какого относительного отверстия может быть параболическое зеркало? Любого. Но нужно иметь в виду, что трудности изготовления по мере роста диаметра растут пропорционально первой степени, а по мере роста относительного отверстия пропорционально кубу относительного отверстия.

Если диаметр зеркала увеличить вдвое, не меняя относительного отверстия, трудности изготовления возрастут вдвое. Но если вдвое увеличить относительное отверстие при том же диаметре, например с $1/8$ до $1/4$, то трудности возрастут в 8 раз!

§ 3. ЗАГОТОВКА ДЛЯ ЗЕРКАЛА

Достать хорошую стеклянную заготовку для зеркала нелегко, и часто приходится довольствоваться тем, что подвернется под руку.

Перечислим основные требования к такой заготовке. Стекло не должно иметь внутренних напряжений, оно должно быть хорошо отожжено. Совершенно не годятся закаленные стекла с пометкой «закал.» или «сталинит». Эти стекла часто используются для иллюминаторов речных судов. Их толщина 10—12 мм, диаметр от 160 мм до 400 мм. Выбирая заготовку среди иллюминаторов, надо быть очень осторожным.

Второе условие — заготовка должна иметь достаточную толщину, чтобы во время обработки и в телескопе прогибы под собственным весом не превышали $\lambda/8$ или 0,00007 мм. Иначе это скажется на качестве изображения. В табл. 4 указывается минимальная толщина d заготовки в зависимости от диаметра D с запасом для обработки. Таблица рассчитана для стекла К8 (см. дальше). Для стекол ЛК5 и ЛК7 толщину следует увеличить на 15—20 %. Ситалловые заготовки могут быть на 20—25 % тоньше. Имеется в виду, что зеркало опирается на три равноудаленные точки, лежащие на окружности, диаметр которой на 10 % меньше диаметра зеркала.

Разгрузка зеркала (все размеры в мм)

На 3 точки					
D	d	D	d	D	d
100	9	180	28	280	65
120	13	200	34	320	85
140	17	240	48	360	104
На 6 точек					
180	11	280	24	400	47
200	13	320	30	500	74
240	18	360	38	600	105
На 9 точек					
200	10	320	23	500	53
240	14	360	28	600	77
280	18	400	35	800	133

В тех случаях, когда заготовка опирается на 6 или 9 точек, толщина заготовки может быть меньше. Насколько нужно соблюдать приведенные значения толщины? Ее можно уменьшить на 5 %, а увеличить в 1,5—2 раза. Слишком толстые заготовки не стоит брать, так как стекло имеет малую теплопроводность, и при перепадах температуры воздуха температура внутренних и внешних частей выравнивается очень медленно, а это приводит к короблению зеркала до тех пор пока температура (внутри и снаружи зеркала) не выравнивается.

В наши дни лучшим материалом для зеркал является *астрономический ситалл* СО-115М. Его коэффициент температурного расширения для ночных температур не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ 1/°С. Стержень длиной 1000 мм из ситалла при нагревании на 1 °С увеличится на 0,0001 мм, а при нагревании на 100 °С — на 0,01 мм. Это в десятки раз меньше, чем у других стекол, и в сотни раз меньше, чем у металлов.

Сошлифовывается ситалл примерно вдвое медленнее, чем самое ходовое стекло К8, но полируется хорошо и почти без царапин.

Еще один материал — *термостойкие стекла ЛК5 и ЛК7*. Это советский «пайрекс» (пирекс). Пайрекс — материал, из которого делались крупнейшие зеркала мира до

появления ситаллов, пирокерама, цередура и подобных материалов. Стекла ЛК5 и ЛК7 примерно втрое дешевле ситалла: ЛК7 шлифуется, как К8, но в 1,5 раза быстрее ЛК5.

Стекло *крон 8*, или К8 (а также К108) — это самое распространенное стекло. По своим термическим и механическим свойствам к нему близко обычное оконное стекло. Из подобного стекла были сделаны зеркала первых гигантских рефлекторов XX века 1,5- и 2,5-метрового телескопов обсерватории Маунт Вилсон. На этих телескопах проведены фундаментальные исследования, а сами телескопы едва ли не самые знаменитые.

Иногда попадаются отрицательные линзы с вогнутыми поверхностями подходящего радиуса кривизны. Соблазнительно поалюминировать такую поверхность и использовать в качестве зеркала. К сожалению, отрицательные линзы обычно делаются из стекла марки «флинт», имеющего большой температурный коэффициент и потому мало пригодного для зеркал. Впрочем, такое зеркало диаметром 150—250 мм можно использовать для камеры Шмидта (см. § 4 в главе четвертой), где требования к качеству изображения ниже, чем у визуального телескопа.

§ 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАГОТОВКИ

Заготовку можно вырезать из витринного или другого достаточно толстого стекла. На ровную доску кладут лист

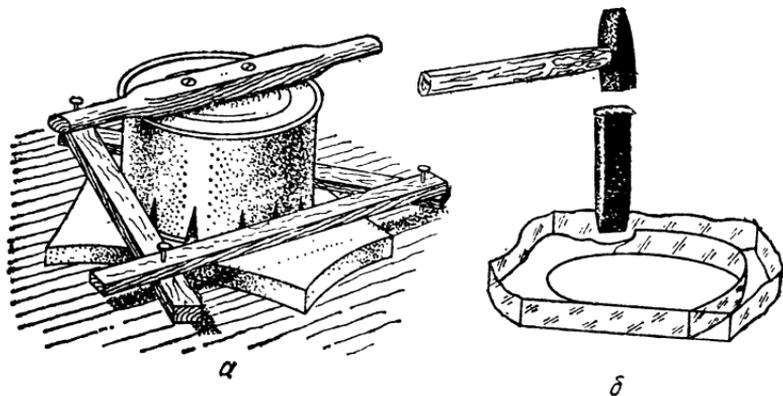


Рис. 21. Вырезание заготовки зеркала: а — сверлом, б — стекло-резом и зубилом

стекла, который прижимают тремя деревянными планками, образующими примерно равносторонний треугольник (рис. 21, а). Концы планок прибивают к столу. В образо-

вавшийся треугольник вставляется трубчатое сверло, которое лучше выточить на станке или подобрать из тонкостенной трубы. На худой конец можно использовать консервную банку или кастрюлю с незавальцованным краем.

Сверление ведут крупным наждачным порошком с обильным смачиванием водой. Чтобы абразив мог проваливаться в постепенно углубляющуюся канавку, на рабочей кромке сверла делают прорезы в виде широких щелей

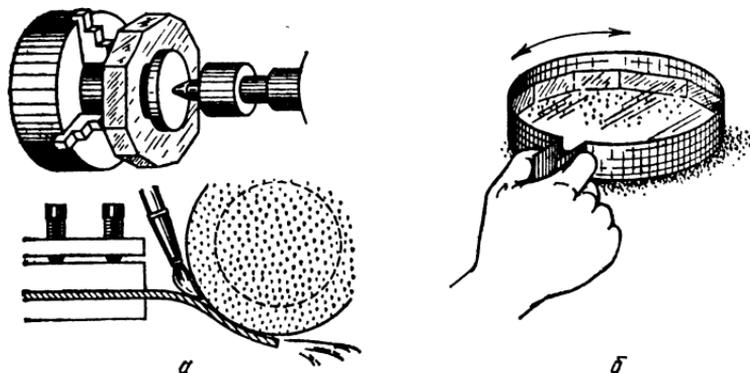


Рис. 22. Кругление заготовки: *а* — на токарном станке, *б* — вручную

или треугольников. Глубина вырезов на 20—30 % больше толщины стекла. Чтобы избежать сколов при выходе сверла из стекла, к тыльной его стороне горячей смолой приклеивают тонкий лист стекла или металла толщиной 2—3 мм.

Чтобы абразив с водой не растекался по стеклу, делают невысокий бортик из пластилина. Вырезание ведут, вращая сверло из стороны в сторону. Сильный хруст стекла вначале постепенно становится тише. Это означает, что надо подсыпать новую порцию абразива и подлить воды. Вырезание ведут с большим давлением и интенсивно вращая сверло. На вырезание небольшой заготовки диаметром 100—120 мм из стекла толщиной 10—12 мм уходит один — два часа.

Круглую заготовку можно вырезать и стеклорезом с роликом [28]. Сначала на листе стекла стеклорезом очерчивают окружность. Затем стекло переворачивают и укладывают на толстую ткань. Точно над царапиной устанавливают лезвие зубила и по зубилу постукивают легким молотком (рис. 21, б). В результате образуется трещина на всю глубину стекла. Чтобы стеклорез при работе с толстым стеклом действовал надежно, его ролик нужно смазать керосином или скипидаром. После вырезания край заготовки нужно

округлить — сошлифовать случайные выступы и сделать его ровным и матовым. Для этого больше всего подходит токарный станок, как это показано на рис. 22, а. Можно круглить и вручную с помощью металлического хомута и крупного абразива (рис. 22, б).

Заготовку можно склеить из двух относительно тонких пластин, между которыми устанавливаются круглые прокладки (рис. 23). Все склеиваемые поверхности шлифуются

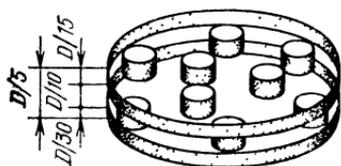


Рис. 23. Заготовка «сэндвич». Стеклянные прокладки разложены по схеме разгрузки на 9 точек. Диаметр прокладок $1/8$ — $1/10$ диаметра полной заготовки, толщина — одна-две толщины главных пластин. Нижняя пластина может быть в 1,5—2 раза тоньше лицевой

одним номером абразива. «Сэндвич» склеивается эпоксидной смолой. Смола должна быть достаточно жидкой. На собранную заготовку устанавливается большой равномерно распределенный груз, чтобы выдавились излишки смолы. Через час-два груз нужно снять, чтобы полимеризация смолы продолжалась без деформаций заготовки.

§ 5. КАК ИСПЫТАТЬ ЗАГОТОВКУ НА ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ?

Не затрагивая теорию этого метода, заметим только, что если рассматривать через поляризационный фильтр, прошедший сквозь заготовку поляризованный свет, то в местах напряжений будут видны цветные пятна. При отсутствии внутренних напряжений пятна отсутствуют.

Для испытаний соберем оптическую схему (рис. 24). Источником света будет служить лист белой бумаги, освещенный сильным светом электрической лампы мощностью 150—200 Вт. Для того чтобы свет, отраженный листом бумаги, поляризовать, уложим на стол лист оконного стекла, подложив под него черную бумагу. После отражения от этого стекла свет будет поляризован в одной плоскости. Далее по ходу луча установим собственно заготовку. Свет, прошедший сквозь заготовку, будем рассматривать через поляризационный фильтр. Диаметр фильтра неважен. Если нет фильтра, можно его изготовить самостоятельно. Для этого соберем в стопку 10—15 тонких кусочков стекла. Лучше всего взять покровные стекла от микроскопа. Их

толщина примерно 0,5—1,0 мм. Пластины в стопке должны быть установлены наклонно к лучам света под углом 57° .

Глядя через поляризационный фильтр (или стопку тонких пластин), расположим заготовку так, чтобы она была видна на фоне стекла, в котором отражается белый лист бумаги. Для того чтобы поляризация была максимальной, лучи от листа бумаги должны падать на стекло под углом примерно 57° . Если в заготовке есть внутренние напряжения, то мы увидим цветные пятна (в основном коричневые

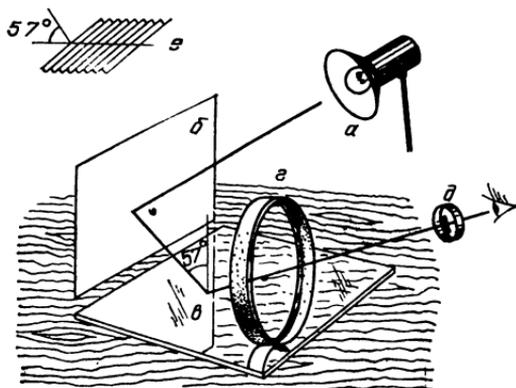


Рис. 24. Испытание заготовки на внутренние напряжения: *а* — лампа, *б* — лист белой бумаги, *в* — лист оконного стекла, *г* — исследуемая заготовка, *д* — поляризационный светофильтр, *е* — самодельный поляроид

и синеватые), которые могут иметь различную форму. К сожалению, так мы сможем только определить наличие напряжений, но не сможем узнать их величину. Но и в таком виде испытания дают очень много. Можно слегка покачивать заготовку, чтобы понять, где находятся напряжения: в самой заготовке или во вспомогательном листе стекла.

§ 6. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для обдирки и шлифовки зеркала потребуются шлифующие порошки, а для полировки полирит или крокус. Если вы не в состоянии приобрести эти материалы, придется их приготовить самому. В качестве шлифующих материалов применяют многие естественные и искусственные материалы, например, искусственные алмазы, корунд (окись алюминия), наждак (корунд, загрязненный гематитом, пиритом, магнетитом, слюдой), карбид кремния (карборунд) —

Гранулометрический состав шлифующих порошков

Средний размер зерен, мм	Обозначение по ГОСТ	Обозначение в английской системе
0,35—0,25	№ 25	№ 70
0,25—0,20	№ 20	№ 80
0,20—0,12	№ 12	№ 120
0,12—0,08	№ 8	№ 180, или трехминутник
0,08—0,06	№ 6	№ 280, или пятиминутник
0,04	M40	— 10-минутник
0,028	M28	№ 325, или 15-минутник
0,02	M20	№ 400, или 30-минутник
0,014	M14	№ 600, или 60-минутник
0,01	M10	— 120-минутник
0,007	M7	— 240-минутник

твердый материал, применяемый для обдирки, но мало-пригодный для тонкой шлифовки, так как случайные твердые частицы царапают поверхность. Электрокорунд применяется для всех стадий обработки, но более всего подходит для тонкой шлифовки. Карбид бора применяется для сверления отверстий и на первых стадиях шлифовки.

Таблица 5 показывает гранулометрический состав стандартных абразивных фракций.

Грубые порошки (шлифзерно) в домашних условиях можно получить, разбив на куски наждачный круг и затем измельчив их в ступе. При этом многие зерна разрушаются и порошок получается очень неоднородным. А. А. Михеев раздавливал мелкие обломки наждачного камня между двумя стальными плитами, становясь сверху на них и вращаясь из стороны в сторону [7]. Можно собирать порошок на лотке заточного станка. Но в этом случае вместе с абразивным порошком попадут и опилки металла. Чтобы избавиться от них, собранный порошок взбалтывают в воде и добавляют 20 % серную кислоту (5 мл на 1 литр воды). Через 2 часа выделение пузырьков водорода прекращается, что указывает на прекращение реакции. После этого нужно сделать пару промывок для того, чтобы удалить из раствора остатки кислоты и образовавшейся соли.

Полученный абразивный порошок содержит зерна самых различных размеров, и его нужно рассортировать по размерам (по фракциям). Самые крупные зерна можно просеять через сита с соответствующими отверстиями. Как определить размер отверстий? Положим сито на миллиметровую

линейку и с помощью лупы оценим размер отверстий. Особой точности здесь не нужно. Как пронумеровать абразивы? Возьмем три сита с ячейками размером 0,35, 0,25 и 0,20 мм. Просеем порошок через сито 0,35 мм. Оставшиеся на сите частицы выбросим или оставим для самых грубых работ. Провалившийся порошок просеем через сито с ячейками 0,25 мм. Ясно, что на этом сите останутся зерна с размерами зерен от 0,25 до 0,35 мм. Назовем этот порошок № 25. Провалившийся порошок просеем через сито 0,20 мм, остаток назовем № 20. Номер порошка присваивается по размеру ячеек сита, на котором он остается — по минимальным размерам фракции.

Самые частые сита могут быть сделаны из металлических сеток для масляных фильтров. Их ячейки так малы, что сухой порошок практически не просевается. Поэтому на сито выливают порошок, взболтанный в воде.

Самые мелкие абразивы лучше разделить, взбалтывая в воде и давая им отстояться. Ясно, что в первую очередь осядут более крупные зерна, а мелкие позже. Скорость опускания частицы в воде определяется законом

$$v, \text{ см/с} = 6\,000 (\rho - 1) d^2,$$

в этом уравнении ρ — плотность оседающей частицы (плотность корунда $\rho = 4 \text{ г/см}^3$, электрокорунда $3,2 \text{ г/см}^3$, карбида кремния $3,2 \text{ г/см}^3$, карбида бора $2,5 \text{ г/см}^3$). Все размеры в см. Скорость оседания частицы электрокорунда М 28 ($d = 0,0028 \text{ см}$) равна $0,103 \text{ см/с}$. Предположим, частица опускается в столбе воды высотой 100 см. Очевидно, что этот путь она пройдет за 16 мин, или приблизительно за 15 мин. Частица электрокорунда М7 ($0,0007 \text{ см}$) опустится в этом столбе за 240 мин. В английской системе эти фракции так и назывались: 15-минутник, 240-минутник. Вместо банки высотой 100 см можно взять банку другой высоты, например, 25 см, тогда время оседания частиц будет в 4 раза меньше. 15-минутник осядет за 4 минуты, а 120-минутник за 30 мин.

В широкую банку высотой чуть больше 25 см нальем теплой кипяченой воды и высынем примерно 100 г порошка всех фракций. Чтобы мелкие зерна не слипались в хлопья (флоккулы), нужно добавить дефлокулятор. Это может быть силикатный (конторский) клей в количестве 3—5 г на литр воды. Все это взмутим чистой деревянной палочкой. После этого дадим воде отстояться. Через 30 мин воду с самой мелкой, не успевшей осесть фракцией сольем с помощью

сифона, держа его конец на высоте 3—4 см над уровнем осевшего порошка, в банку или эмалированное ведро объемом в 3—4 раза больше, чем первая банка.

После этого в первую банку снова нальем воду, добавим дефлокулятор, все взболтаем и дадим снова отстояться 30 мин. Неосевший порошок снова сольем во вторую банку. Повторим операцию 3—4 раза, пока вода в первой банке после взмучивания и отстойки не станет практически прозрачной. Если высота банки 25 см, то во второй банке окажется 120-минутник (M10) и более мелкий порошок. Он потребуется на самых тонких стадиях шлифовки.

Теперь аналогичным способом взболтаем порошок в первой банке и дадим ему отстояться в течение 15 мин, собирая во второй банке фракцию 60-минутную, или M14. Время отстаивания каждый раз будем сокращать вдвое. В результате образуются фракции M20, M28 и M40. После наполнения второй банки каждый раз порошку дадим полностью отстояться. Кашицу со дна банки перенесем в пластмассовые бутылочки с пробками, имеющими небольшие (1—2 мм) отверстия. Высушивать порошки не нужно — при высыхании они могут слипаться в комочки, кроме того, наносить их на шлифовальник нужно все равно влажными. Сверху слоя порошка наливаем слой воды толщиной 3—5 мм. Перед началом работы взболтаем порошок и, нажимая на бутылочку, через отверстие в крышке нанесем его на шлифовальник.

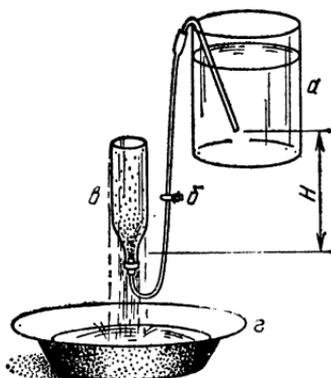
Описанный метод разделения абразива на фракции основан на различной скорости падения частиц в воде. Возможен и другой способ — вымывание частиц потоком воды, поднимающейся вверх [17]. Отстойник (рис. 25) представляет собой бутылку с отрезанным горячей проволокой дном (на худой конец воронку). К горлышку подведена резиновая трубка, через которую подается с одинаковым напором вода. В бутылку насыпают и взбалтывают порошок. Напор регулируется с помощью зажима наподобие тех, которые применяются в медицинских капельницах. Скорость подъема воды устанавливается на практике. Сначала определяют объем воды, вытекающий через край бутылки за единицу времени. Потом делят этот объем на площадь сечения бутылки сверху. Например за $t=1$ мин вытекает $v=1$ литр (1000 см^3) воды. Диаметр бутылки равен 10 см. Значит, площадь сечения равна $S=78 \text{ см}^2$, а скорость ее вытекания равна

$$v = \frac{V}{St} = \frac{1000}{78 \cdot 60} = 0,2 \text{ см/с.}$$

Эта скорость годится для вынесения из бутылки всех фракций от 0,04 мм (М40) и мельче. Уменьшив скорость мы добьемся того, что выноситься будет только более мелкий абразив.

Если наш прибор содержит один отстойник, то вынесенный абразив соберется в широком тазу внизу отстойника.

Рис. 25. Схема разделения абразивов: *a* — банка с дистиллированной или прокипяченной и отстоявшейся водой; эта «водонапорная башня» дает постоянный напор воды, который зависит только от высоты *H* верхнего конца резиновой трубки, *b* — зажим, регулирующий расход воды, *v* — отстойник, *г* — таз для сбора абразива



Но можно собрать систему из нескольких отстойников, следующих друг за другом. Их диаметры должны быть различными: для каждой следующей бутылки или воронки в 1,4 раза (площадь сечения в 2 раза) больше предыдущей. С некоторыми усовершенствованиями эта технология применяется в абразивной промышленности [17]. Об изготовлении абразивных порошков из алмазных паст можно прочесть в журнале «Земля и вселенная» [21].

§ 7. ШЛИФОВАЛЬНЫЕ СТАНКИ

Во время шлифовки шлифовальник должен быть прочно укреплен. Самое простое — установить его на устойчивую тумбу и шлифовать, двигая зеркало поперек шлифовальника, одновременно обходя вокруг тумбы (рис. 26, *a* и *б*). Это очень старый метод, но и сейчас время от времени можно прибегнуть к нему, особенно во время тонких работ по фигуризации зеркала в конце его обработки. При необходимости на тумбе укрепляют зеркало и двигают по нему шлифовальник.

Можно несколько облегчить работу, воспользовавшись круглой, восьмиугольной или квадратной доской, прибитой к основанию тумбы гвоздем в центре (рис. 26, *в*). Этот поворотный стол имеет три пробки, прибитые к нему с таким

расчетом, чтобы шлифовальник или зеркало устанавливалось между ними с небольшим (2—3 мм) зазором. В этот зазор вставляется клин, который надежно удерживает деталь или инструмент (шлифовальник, полировальник). Шлифуют в этом случае, двигая одной рукой зеркало по

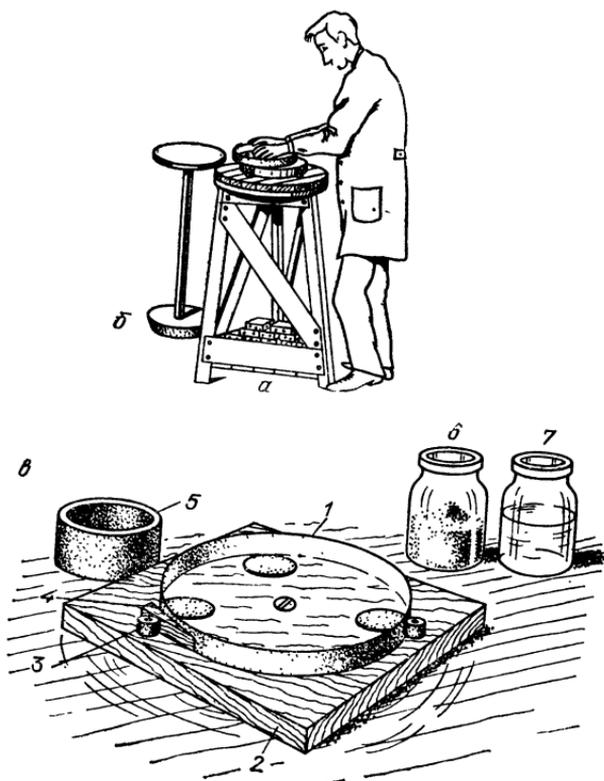


Рис. 26. Простые станки для обработки зеркал: *а* — деревянная тумба, загруженная для устойчивости кирпичами, *б* — тумба на стальной трубе, залитой в бетон, уложенный в хозяйственный таз, *в* — поворотный стол (*1* — зеркало, *2* — стол, *3* — упоры, *4* — клин, *5* — кольцо для обдирки, *6* — абразив, *7* — вода)

шлифовальнику по прямой (штрих шлифовки), а второй рукой вращая поворотный стол. Это, так же как и в предыдущем случае, позволяет вести обработку по всем направлениям для получения хорошей поверхности вращения.

Вместо поворотной доски в клубе им. Д. Д. Максимова много лет использовалась круглая коробка для хранения кинофильмов диаметром примерно 270 мм с низким бортиком. Она удобна тем, что обработанный шлам, стекающий

со шлифовальника, собирается на дне банки, и рабочий стол остается чистым. Это устройство показано в телефильме «Телескопы» (фильм второй, автор сценария и режиссер Л. Сикорук, оператор Г. Седов, производство Новосибирского телевидения, 1976 г.). Вместо банки можно взять старую сковородку, металлическую или пластмассовую тарелку и т. д.

Поворотный столик прекрасно работает, и нет никаких причин его усовершенствовать, скажем, устанавливая ось в подшипниках. Дело в том, что при поперечном штрихе, особенно если он делается по краю заготовки (шлифовка по хорде), слишком легко вращающийся стол юлит и вертится, и мастеру приходится тратить силы на то, чтобы его удерживать. Лучше, если он будет вращаться с некоторым трением.

Если у любителя, а тем более у кружка или клуба, есть планы на изготовление нескольких или многих зеркал и других деталей, лучше построить механический шлифовально-полировальный станок.

Станок, изображенный на рис. 27, построен автором для обработки небольших зеркал диаметром до 150 мм. Шлифовальник приклеивается смолой к планшайбе, установленной наверху вертикального шпинделя. Поводок приводится в движение шатуном с кривошипом. Для того, чтобы менять размах поводка, в диске просверлено несколько отверстий на различном расстоянии от центра. В эти отверстия вставляется ось кривошипа. Весь станок приводится во вращение электродвигателем мощностью 50 Вт. Схема редуктора показана на фото, но вообще каждый может ее устроить по-своему. Важно помнить о двух вещах. Во-первых, отношение числа оборотов шпинделя к числу движений поводка должно быть близким к $1/3$ — $1/5$, но ни в коем случае не должно быть кратным целому числу. Оно может быть, например, таким: $1/3, 1, 1/4, 8, 1/3, 7$ и т. п. Во-вторых, чтобы редуктор работал надежно, нужно, чтобы по мере приближения от двигателя к рабочим деталям станка прочность узлов и деталей передачи (шестерней, шкивов, ремней или пассиков) становилась все больше. В описанном станке редуктор приводится в действие от резинового пассика диаметром 3 мм, а последнее звено представляет собой велосипедную цепь.

50-ваттного электродвигателя достаточно для станка, на котором можно обрабатывать детали до 250 мм. Для более крупных станков можно применить два двигателя раздельно — на шпиндель и кривошип поводка. Можно несколько

усложнить верхнее звено станка. Например, таким образом, чтобы поводок вместе с «хоботом» отбрасывался в момент, когда нужно снять зеркало или вручную отформовать

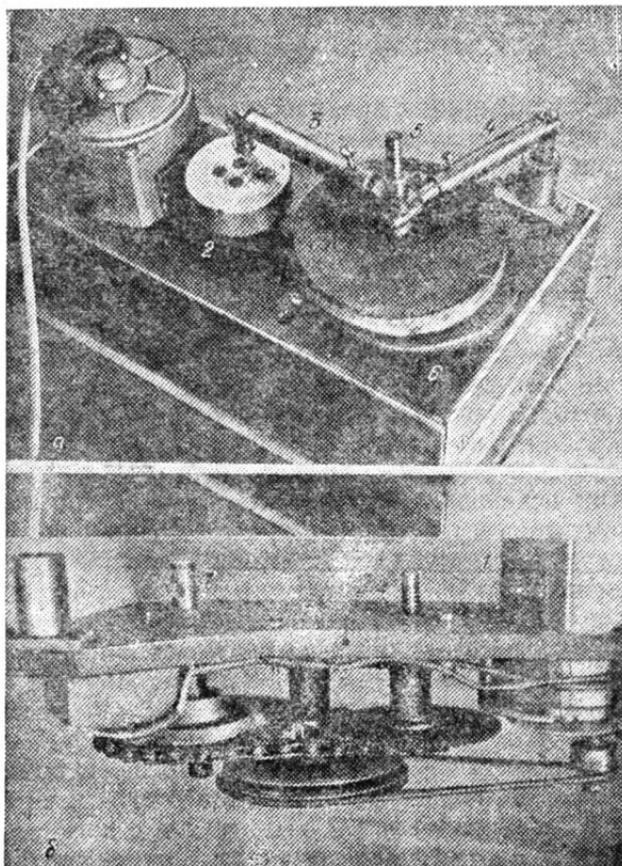


Рис. 27. Малый шлифовальный станок, построенный автором в 1972 г.: а — верхнее звено, б — редуктор (снято с противоположной стороны) (1 — электродвигатель, 2 — кривошип, 3 — шатун, 4 — хобот, 5 — поводок, 6 — обрабатываемое зеркало, 7 — вертикальный шпиндель)

полировальник на вращающемся шпинделе (рис. 28, в). Во время грубой обработки на поводок устанавливается груз.

Рассмотрим подробнее устройство станков и их узлов, изображенных на рис. 28. На рис. 28, а изображен станок, широко применявшийся в оптической промышленности еще сравнительно недавно. Вертикальный шпиндель, на кото-

ром крепится шлифовальник или зеркало, имеет на нижнем конце плоский диск, который опирается на ролик, приводимый во вращение электродвигателем через ременную передачу. Если этот ролик перемещать вдоль его оси, то можно плавно изменять скорость вращения шпинделя. В данном примере поводок приводится в действие вручную.

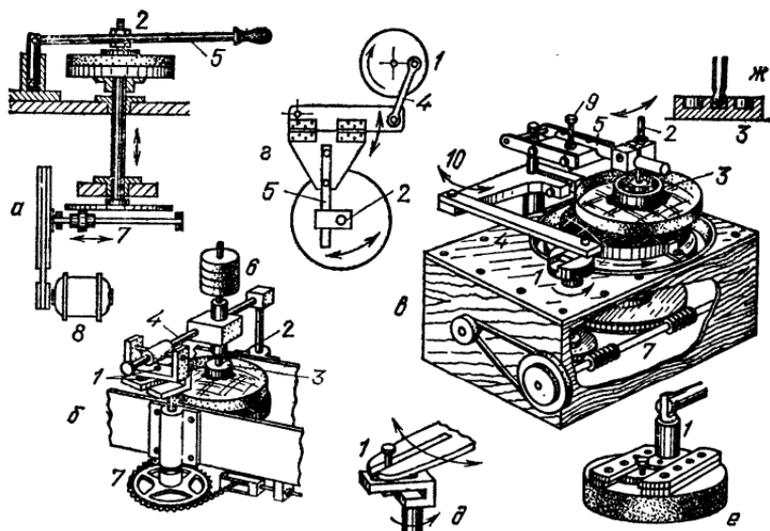


Рис. 28. Шлифовально-полировальные машины: *а* — вертикальный шпиндель с ручным приводом для штриха, *б* — механизм машины, выпускаемой одной из американских фирм, *в* — машина, построенная А. Н. Болтневым и автором, *г* — вариант верхнего звена станка, *д*, *е* — варианты кривошипа, *ж* — план-шайба Р. Кокса. Обозначения на всех рисунках: 1 — кривошип, 2 — поводок, 3 — план-шайба, 4 — шатун, 5 — «хобот», 6 — груз, 7 — редуктор, 8 — электродвигатель, 9 — винт, предохраняющий полировальник или зеркало при падении поводка, 10 — деталь для упора предохранительного винта

На рис. 28, *б* показано устройство шлифовального станка, выпускаемого одной из западных фирм. От электродвигателя (на рисунке не показан) и редуктора с помощью велосипедной цепи приводится во вращение вал кривошипа 1. Вдоль кривошипа перемещается и фиксируется с помощью винта П-образная деталь, удерживающая на оси трубку. Вдоль этой трубки свободно перемещается рычаг (шатун) 4. Благодаря этому устройству вращение кривошипа приводит к качанию шатуна, на котором укреплен поводок 2. На поводке может устанавливаться груз 6. Вал кривошипа и шпиндель станка на рис. 28, *в* приводятся во вращение дву-

мя червячными парами с червяками на общем валу 7. Кривошип 1 передает качательное движение шатуну 4, а тот «хоботу» 5. Поводок 2 через планшайбу 3 передает качательное движение зеркалу (или шлифовальнику, если он установлен сверху). Когда зеркало снимается, поводок может упасть на полировальник и разбить часть его поверхности. Особенно это опасно, когда снизу находится зеркало. Чтобы поводок не достигал поверхности полировальника, имеется винт 9, который при падении «хобота» упирается на нижнюю деталь второго звена шатуна 10.

На рис. 28, *г* показана широко применяемая конструкция верхнего подвижного звена станка. Кривошип 1 через шатун 4 передает качания «хоботу» 5 и поводку 2. Для того чтобы поводок мог свободно смещаться вертикально, на детали, расположенной между шатуном и «хоботом», имеется пара шарниров. На рис. 28, *д* и *е* показаны конструкции кривошипа, а на рис. 28, *ж* — разрез планшайбы, предохраняющей зеркало от случайного выскакивания поводка из гнезда. Примерные размеры деталей можно оценить по рисунку.

Д. Д. МаксUTOв [3] приводит формулу максимальной скорости вращения шпинделя для зеркал различного диаметра:

$$N = \frac{6000}{D} \text{ об/мин,}$$

где D — диаметр зеркала в мм. Если на станке обрабатываются детали различного диаметра, лучше предусмотреть две-три различные скорости вращения шпинделя, установив на двигателе и первом звене редуктора шкивы с несколькими канавками.

§ 8. ШЛИФОВАЛЬНИКИ

Придание грубой формы зеркалу можно сделать практически любым куском металла, стекла или пластмассы. Уже в начале нашего века широко применялась обдирка стеклянной заготовки стальным, чугунным или медным толсто-стенным кольцом, которое можно отрезать ножовкой и обработать торцы на токарном станке или напильником. Диаметр кольца должен быть немного меньше половины диаметра заготовки зеркала, а толщина стенок — 5—10 мм.

В качестве инструмента для обдирки можно использовать и алмазные круги с достаточно крупными зёрнами. В этом случае обдирку можно вести не добавляя абразивный порошок. Зёрна алмаза, закрепленные в «коронке», работа-

ют значительно быстрее, чем свободно перекатывающийся абразив. В этом случае достаточно только добавлять воды для еще большего ускорения шлифовки.

Кольцевые шлифовальники годятся главным образом для обдирки зеркала — придания ему самой приближительной формы. Для тонкой шлифовки, когда поверхность зеркала приближается к точной сфере, нужно сделать выпуклый шлифовальник с кривизной, равной кривизне зеркала. В профессиональной практике применяются сферические металлические (чугунные, стальные, латунные) шлифовальники. Однако выточить сферический шлифовальник с необходимой точностью — дело трудное. Р. Кларк предложил [16], а А. С. Фомин существенно усовершенствовал [4, 8] метод изготовления ступенчатых шлифовальников, которые в первом приближении можно считать сферическими (рис. 29). В ходе шлифовки ступеньки довольно быстро сошлифовываются и шлифовальник быстро пришлифовывается к зеркалу.

Прежде всего надо рассчитать диаметры ступенек для заданной их высоты. Обычно высоту каждой ступеньки берут равной 0,05—0,1 мм, при этом пользуются формулой

$$x = \frac{d_i^2}{8R},$$

где d_i — диаметр ступеньки, R — радиус кривизны, x — высота ступеньки, считая от вершины шлифовальника. Рассмотрим расчет диаметров ступенек на конкретном примере. Допустим, что нам необходимо изготовить шлифовальник для 150-миллиметрового зеркала с радиусом кривизны 2400 мм (фокусное расстояние 1200 мм). Выберем высоту ступенек равной 0,1 мм. Прежде всего вычислим, чему равно $8R$. В нашем случае $8 \cdot 2400 = 19\ 200$ мм. Эта величина остается постоянной для всех значений диаметров. Далее умножаем 19 200 последовательно на 0,1, 0,2, 0,3 и т. д. и записываем результаты в третью колонку табл. 6 ($8Rx$). Из чисел третьей колонки извлекаем квадратный корень и результат записываем в четвертую колонку. Это и есть диаметры ступенек d_i . Но при вытачивании шлифовальника на токарном станке нам удобнее пользоваться не размером диаметра ступеньки, а величиной подачи резца, которая

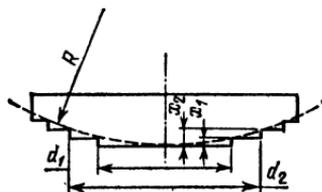


Рис. 29. Ступенчатый шлифовальник. Обратите внимание на монотонно уменьшающееся расстояние между ступеньками

равна разности между полным диаметром шлифовальника и диаметром каждой ступеньки. Величину поперечной подачи резца внесем в пятую колонку ($D_0 - d_i$).

В последней графе для высоты ступеньки 1,2 мм величина d_i получается равной 151,8 мм, т. е. больше диаметра шлифовальника, поэтому ограничимся 11-й ступенькой.

Таблица 6

Расчет диаметров ступенек шлифовальника

Номер ступеньки		$8R_x$	d_i	$D_0 - d_i$
1	0,1	1 920	43,8	106,2 (центр шлифовальника)
2	0,2	3 840	62,0	88,0
3	0,3	5 760	75,9	77,7
4	0,4	7 680	87,6	62,4
5	0,5	9 600	98,0	52,0
6	0,6	11 520	107,3	42,7
7	0,7	13 440	115,9	34,1
8	0,8	15 360	123,9	26,1
9	0,9	17 280	131,5	18,5
10	1,0	19 200	138,6	11,4
11	1,1	21 120	145,3	4,7
12	1,2	23 040	151,8	—

Как вытачивать выпуклый ступенчатый шлифовальник?

Устанавливаем в кулачках патрона станка плоскую алюминиевую, латунную, стальную или чугунную заготовку. Протачиваем край заготовки при продольной подаче резца. Закончив чистовую обработку, устанавливаем на лимбе барабана поперечной подачи «0» и надежно фиксируем барабан. В дальнейшем при вытачивании ступенек мы будем начинать движение резца от края заготовки или, иначе говоря, будем начинать вращать барабан поперечной подачи с нуля.

Закрепляем суппорт на продольных направляющих и с помощью верхней каретки подводим резец к плоской стороне заготовки. Обрабатываем, «торцуем» заготовку. После того как получится хорошая плоскость, устанавливаем на лимбе верхней каретки «0» и приступаем к вытачиванию канавок. Для этого, вращая барабан поперечной подачи против часовой стрелки, отводим резец за край заготовки, сделав лишние полоборота. Это нужно для того, чтобы во время движения резца к заготовке выбрать «мертвый» ход. Теперь подаем резец вдоль продольных направляющих с

помощью барабана верхней каретки на 0,1 мм к передней бабке (влево) — это высота первой ступеньки. Начинаем вращать барабан поперечной подачи по часовой стрелке, и резец начинает приближаться к заготовке. В тот момент, когда он коснется края, на лимбе барабана должен быть нуль. Теперь наша задача — продвинуть резец настолько, чтобы диаметр ступеньки стал равен расчетному. Для этого подадим резец на величину, указанную в первой строке пятой колонки. Надо помнить, что действительное перемещение резца в два раза меньше того, что показывает лимб на барабане. Дело в том, что при перемещении резца, например, на 5 мм по радиусу заготовки ее диаметр уменьшается на 10 мм. На лимбе указаны изменения диаметра, а не радиуса, и так как в пятой колонке вычислено изменение диаметра, то мы можем отсчитывать на лимбе именно величины пятой колонки. Обычно один полный поворот барабана соответствует уменьшению диаметра на 10 мм. Поэтому, если в числах пятой колонки перенести запятую на один знак влево, целое число будет показывать число поворотов барабана по часовой стрелке, а дробь после запятой нужно отсчитывать по делениям барабана. Например, при вытачивании первой ступеньки надо сделать 10 полных оборотов барабана и, продолжая вращать барабан, отсчитать 62 деления на лимбе. При вытачивании шестой ступеньки надо сделать четыре полных оборота барабана и отсчитать на лимбе 27 и т. д.

Проточив первую ступеньку, возвращаем резец на место, отведя его несколько дальше края, как и в первый раз. Подаем резец еще на 0,1 мм к заготовке, вращая барабан верхней каретки, и опять подаем резец к центру заготовки по радиусу. На этот раз делаем по часовой стрелке восемь полных оборотов барабана и 80 делений отсчитываем на лимбе. Так, снимая по 0,1 мм и продвигая резец по радиусу с каждым разом все меньше и меньше, мы вытачиваем все 11 ступенек.

Нужно следить за тем, чтобы резец был хорошо заточенным, а образующийся нагар нужно убирать сразу, как только резец отведен за край заготовки в исходное положение. После окончания протачивания ступенек на краю шлифовальника надо сделать фаски. Ширина ступенек монотонно уменьшается к краям. Если в этой, легко обнаруживаемой закономерности окажутся один-два сбоя, то это не очень страшно, так как во время шлифовки образуется единая сферическая поверхность и одна из несошлифованных канавок существенно не повлияет на форму зеркала.

Обдирать заготовку зеркала можно сразу на ступенчатом шлифовальнике. Но, для того чтобы не «срѣзать» вершину шлифовальника, шлифовку надо вести как через центр, так и по хорде, следя за тем, чтобы ступеньки шлифовальника сошлифовывались одинаково по всей его поверхности. Однако можно начать обдирку зеркала и с помощью трубчатого шлифовальника, а уже потом начать шлифовку на шлифовальнике.

В заключение заметим, что толщина металлического шлифовальника должна быть примерно такой же, как и толщина зеркала. Во-вторых, формула, приведенная в начале параграфа для вычисления диаметров ступенек, справедлива для параболоида. Так как наше зеркало очень мало отличается от параболоида, во время шлифовки этой разницей можно совершенно пренебречь. Однако в тех случаях, когда читатель захочет выточить ступенчатый шлифовальник для шлифовки линз большой кривизны, придется воспользоваться точной формулой для сферы, так как при значительных радиусах кривизны отступления параболоида от сферы значительны. В этом случае диаметр ступеньки вычисляется по формуле

$$D_i = \sqrt{8Rx - 4x^2}.$$

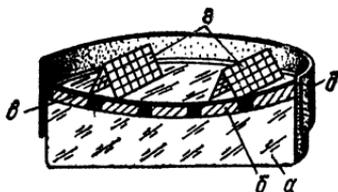
При вытачивании вогнутых шлифовальников расточка ведется от просверленного в центре отверстия диаметром 6—8 мм для больших и 2—3 мм для малых шлифовальников. Величина подачи резца (к себе) берется из четвертой колонки таблицы. Пятая колонка в этом случае не нужна.

Можно сделать комбинированный шлифовальник из бетона или гипса, покрытый слоем стекла или эпоксидной смолы. Уложим зеркало рабочей (ободранной кольцом) поверхностью вверх (см. § 7 главы второй), обернем бортиком из плотной промасленной бумаги, чтобы он выступал на высоту, равную толщине будущего шлифовальника. Смажем поверхность зеркала слоем вазелина толщиной примерно 1,5 мм *). На его поверхность равномерно с промежутками в 5—6 мм мы разложим кусочки предварительно нарезанного стекла размером 2,5×2,5 см и толщиной 5—6 мм. Вместо стекла можно использовать кафельные плитки того же размера и нарезанные обычным стеклорезом. Вдавливаем эти кусочки в вазелин до самой поверхности зеркала.

*) Предварительно очень важно заделать пластилином фаски зеркала до уровня (или выше) лицевой поверхности зеркала,

Теперь протрем открытые стороны квадратиков ацетоном от следов жира. Зальем все это слоем эпоксидной смолы и уложим на нее проволочную арматуру из металлической сетки (рис. 30). Нижняя часть арматурной сетки должна быть полностью покрыта смолой. Разведем гипс до консистенции негустой сметаны и, тщательно его перемешав, не мешкая выльем на зеркало до высоты бумажного бортика.

Рис. 30. Изготовление бетонного шлифовальника: *а* — зеркало, *б* — керамические или стеклянные плитки, *в* — эпоксидная смола, *г* — металлическая сетка, *д* — бортик из толстой бумаги



В течение суток дадим затвердеть и гипсу и эпоксидной смоле. Шлифовальник готов к работе.

Можно было бы обойтись без арматуры, но в этом случае в результате намокания во время работы слой клея и гипса отстают друг от друга. Сетка арматуры удерживает их.

Нужно позаботиться, чтобы песчинки со стенок шлифовальника не попадали на зеркало. Для этого шлифовальник со всех сторон нужно покрыть слоем эпоксидной смолы и во время работы время от времени его осматривать, чтобы вовремя заливать возникающие трещины.

Вместо гипса можно использовать цементно-песчаный раствор такого состава: 2 части песка и 1 часть цемента. Для больших шлифовальников можно приготовить бетонную смесь: 1 часть мелкого гравия (размер частиц 3—5 мм), 1 часть песка, 1 часть цемента. Смесь консистенции густой сметаны вываливаем на зеркало, накрытое слоем полиэтилена. Хорошо протрамбуем смесь, уложив на ее поверхность дощечку и постукивая по ней. Бетон и песчаный раствор твердеют при температуре 22—25 °С в течение трех-четырех дней и набирают проектную прочность только через три-четыре недели. Но шлифовку можно начинать через несколько дней. На шлифовальники диаметром 300—500 мм можно наклеивать стеклянные квадратики размером 30—50 мм.

Для небольших зеркал диаметром до 200—250 мм можно воспользоваться металлической пластиной толщиной примерно в 1/10 ее диаметра, которая покрывается слоем эпоксидной смолы. Зеркало с готовым углублением намазывается вазелином или маслом, на его поверхность кладется лист

полиэтилена. Фаски по краю зеркала, как и раньше, заделываются пластилином, чтобы они были на уровне поверхности зеркала. После этого по краю устанавливается промасленный бумажный бортик и на зеркало выливается эпоксидная смола толщиной 3—5 мм. Чтобы металлическое основание при укладывании на смолу не утонуло в ней, по краю зеркала проложим три маленькие деревянные прокладки, например, кусочки спичек. Поверхность такого шлифовальника после затвердевания смолы далека от сферы, но уже после короткого сеанса шлифовки она хорошо пришлифовывается и принимает сферическую форму. Для

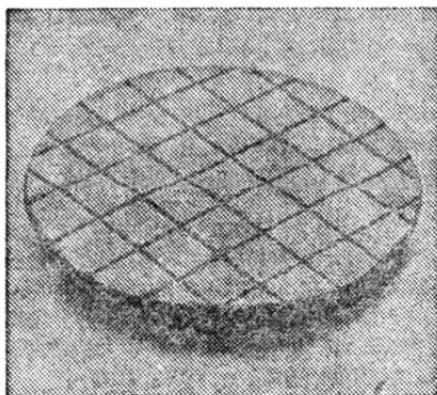


Рис. 31. Канавки на поверхности эпоксидной смолы. Поверхность смолы уже пришлифована к зеркалу

того чтобы абразив легко распределялся по шлифовальнику, полезно на поверхности смолы ножовкой по металлу прорезать серию канавок на глубину слоя (рис. 31), кроме того, в них проваливаются случайные крупные зерна абразива, не успевая поцарапать поверхность зеркала. Рисунок канавок при шлифовке неважен. Достаточно, чтобы они были распределены по поверхности более или менее равномерно. Эпоксидная смола — менее твердый, чем стекло, материал, поэтому на последних стадиях шлифовки полезно покрывать ею и металлические шлифовальники — матовость от этого получается тоньше. Многие любители вместо слоя эпоксидной смолы наклеивают на шлифовальник квадратики из плексигласа или другой пластмассы.

§ 9. ОБДИРКА ЗЕРКАЛА

Мы приступаем к первой стадии обработки зеркала — *обдирке*. Наша задача — придать плоской поверхности заготовки вогнутую форму с радиусом кривизны, который мы выбрали во время расчета относительного отверстия зеркала и его фокусного расстояния.

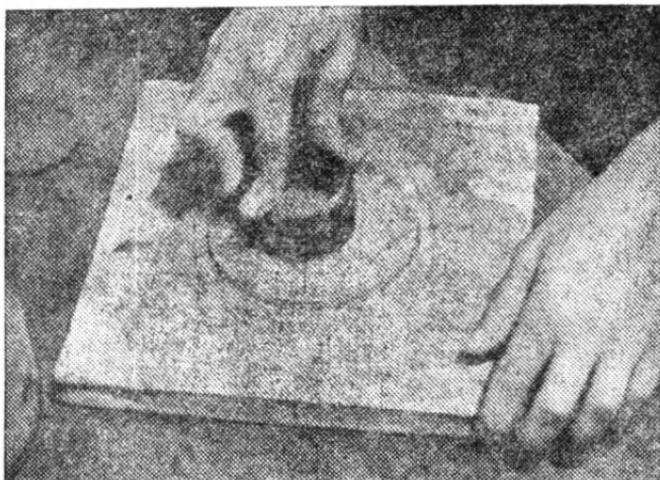


Рис. 32. Обдирка 110-миллиметрового зеркала кольцом на поворотном станке

Обдирку можно вести на металлическом шлифовальнике, но на первых порах, когда поверхность зеркала еще далека от заданного радиуса кривизны, велика возможность «срезать» (сошлифовать) вершину шлифовальника. Поэтому обдирку желательно вести другим шлифовальником того же радиуса кривизны. Его диаметр может быть в 1,5—2 раза меньше диаметра основного шлифовальника. Впрочем, обдирка — не такая уж ответственная операция, и многие любители часто обдирают заготовку чем придется, например металлическим толстостенным кольцом (рис. 32).

Установив заготовку зеркала на шлифовальном станке, насыпем на нее примерно половину чайной ложки грубого абразива № 25—30 и смочим его водой. Точный объем порции абразива можно узнать, если умножить площадь поверхности зеркала на средний размер зерна. Например, для 20-сантиметрового зеркала и абразива № 20 требуется $\frac{3,14 \cdot 20^2}{4} \cdot 0,02 \approx 6 \text{ см}^3$.

Взяв в правую руку кольцевой (или полный) шлифовальник и придерживая левой рукой поворотный столик, проведем первый штрих. Начинаем штрих с края заготовки и ведем шлифовальник до другого ее края (рис. 33, а, б).

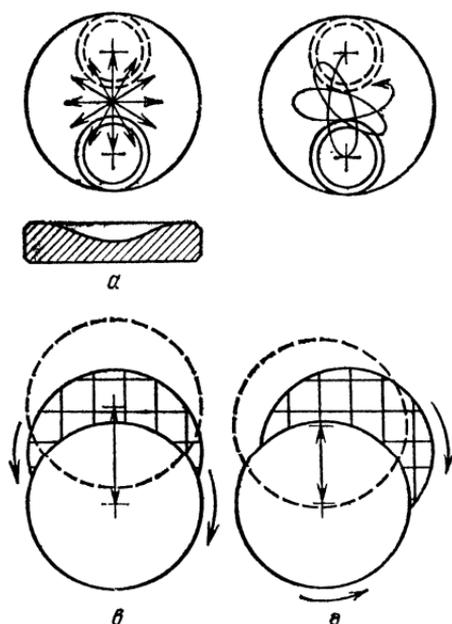


Рис. 33. Обдирка и шлифовка зеркала: а — обдирка кольцом через центр и поверхность, которая при этом получается, б — обдирка эллиптическим штрихом для устранения этого недостатка, в — обработка шлифовальником через центр, г — то же по хорде

Следим за тем, чтобы кольцевой шлифовальник не свисал с заготовки больше чем на 5 мм. Сделав два-три штриха, повернем поворотный столик с заготовкой на $15-30^\circ$. После этого сделаем еще пару штрихов.

Обдирку ведем с большим давлением на шлифовальник. Полный штрих — движение к себе и от себя — займет примерно полсекунды. Для зеркала $150-200$ мм скорость обдирки составит примерно 120 штрихов в минуту. Поворачивая столик после каждых двух штрихов на 30° , мы повернем зеркало на 360° за 12 секунд. Это вполне подходящая скорость вращения заготовки при ручной обработке.

Обработывая зеркало на тумбе, мы держим кольцо двумя руками и, произведя два-три штриха, делаем полшага в сторону и тем самым меняем направление штриха на $10-$

15°. После следующих двух-трех штрихов снова делаем полшага в ту же сторону. Постепенно обходя вокруг тумбы, мы обдираем зеркало равномерно во всех направлениях.

В тех случаях, когда обдирка ведется на сферическом или ступенчатом шлифовальнике полного диаметра, лучше шлифовальник располагать на тумбе или поворотном столе, а зеркало держать в руках. После каждого двух-трех штрихов делаем шаг вокруг тумбы, а само зеркало поворачиваем руками в противоположном направлении.

Вскоре после начала работы громкий хруст сменится легким шипением. Это значит, что абразив измельчился и его нужно заменить новой порцией. Сотрем грязной тряпкой сошлифованное стекло и измельченный абразив и насыпем новую порцию, при этом не будем скупиться на воду.

Если через 20—30 минут непрерывной работы снять зеркало и к матовой поверхности приложить металлическую линейку с ровным краем, то можно заметить, что между линейкой и зеркалом образовался просвет. Линейка опирается на края зеркала, а центр заготовки «провис». Заготовка начинает принимать вогнутую форму. Попробуем измерить фокусное расстояние этого, еще несовершенного зеркала. Обильно смочим водой (а лучше водой с глицерином) поверхность зеркала и попробуем поймать зайчик от смоченной поверхности. Повернем зеркало мокрой (рабочей) стороной к Солнцу примерно перпендикулярно к падающим лучам. На стенку, где расположено окно, направим зайчик, и, приближая или удаляя зеркало от стены, постараемся добиться того, чтобы зайчик стал как можно меньше и ярче. После этого измерим расстояние между зеркалом и стеной с помощью достаточно длинной палки, разделенной на сантиметры. Это и будет фокусное расстояние зеркала. После первых 20—30 минут обдирки оно будет слишком большим, поэтому продолжим обдирку, время от времени измеряя фокусное расстояние. Во время последующих стадий тонкой шлифовки радиус кривизны зеркала изменится мало, в основном он задается во время грубой обдирки.

Фокусное расстояние можно измерить иначе. Рядом с яркой лампой установим экран так, чтобы он был защищен от прямых лучей лампы. Установим зеркало так, чтобы зайчик падал на экран (рис. 34). Приближая или удаляя зеркало, добьемся, чтобы зайчик стал как можно резче и принял форму волоска лампы. После этого измерим расстояние между зеркалом и экраном. Если экран и лампа одинаково удалены от зеркала, то это расстояние и есть

радиус кривизны зеркала. Фокусное же расстояние вдвое меньше.

Радиус кривизны можно определить также путем измерения просвета между краем линейки и центром зеркала. Это так называемая *стрелка кривизны* сферической поверхности. Нарежем полоски бумаги или фольги шириной 5—10 мм, сложим вместе 20—30 полосок и измерим миллиметровой линейкой или штангенциркулем толщину стопки.

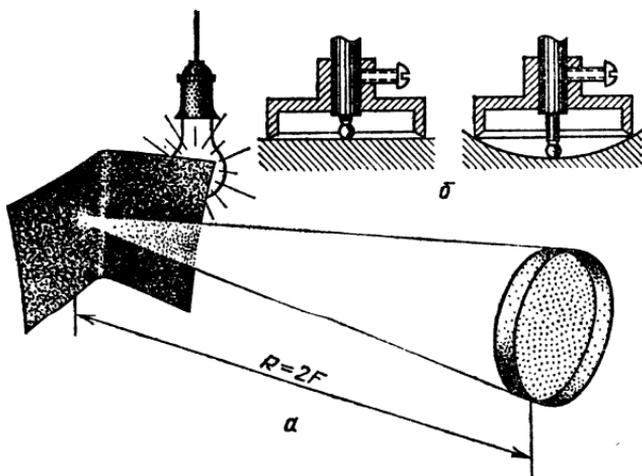


Рис. 34. Определение радиуса кривизны мокрого зеркала с лампой (а) и стрелки кривизны сферометром (б)

Разделив эту толщину на число полосок, получим толщину одного листка бумаги или фольги. Уложим несколько бумажек в центре зеркала и приложим линейку. Если остается просвет, добавим бумажек; если же линейка начинает покачиваться на бумажках, значит их много и надо убрать одну-две бумажки. Важно, чтобы линейка плотно лежала на бумажках и краях зеркала. Сосчитав бумажки в центре зеркала и умножив их число на толщину одной, получим величину стрелки кривизны. Зная стрелку кривизны, можно вычислить и радиус кривизны и фокусное расстояние

$$f = \frac{R}{2} = \frac{D^2}{16x},$$

где D — диаметр заготовки зеркала, x — стрелка кривизны.

Для более точного определения радиуса кривизны, особенно на первых стадиях шлифовки, лучше сделать сферометр на базе дискового (часового) индикатора (рис. 35 и

34, б). Этот индикатор потребуется и для теневого прибора, о котором говорится ниже.

Установим сферометр на хорошую плоскость и заметим его показание. После этого перенесем его на сферическую поверхность и снова заметим показания. Разность этих двух показаний и есть стрелка прогиба сферической поверхности на диаметре, равном базе сферометра. Предположим, что диаметр базы сферометра равен 80 мм, тогда радиус кривизны определим по простой формуле $R = \frac{80^2}{8x} = \frac{800}{x}$. Если диаметр базы взять равным 89,4 мм, то формула станет более удобной:

$$R = \frac{89,4^2}{8x} = \frac{8000}{8x} = \frac{1000}{x}.$$

По одной из приведенных выше формул определим радиус кривизны. Не нужно забывать, что при разных диаметрах базы сферометра стрелка прогиба на одной и той же поверхности окажется различной. Предположим, что база нашего сферометра 80 мм, а стрелка прогиба равна 0,1 мм.

Тогда радиус кривизны поверхности равен $R=8000$ мм. Сферометр с базой, равной 89,4 мм, на той же поверхности покажет стрелку прогиба $x=0,125$ мм.

Обычно при обдирке кольцом центральная часть принимает большую кривизну, чем крайние части (см. рис. 33, а). Поэтому прямолинейный штрих лучше заменить на эллиптический. Малая ось эллипса должна быть больше, если диаметр кольца мал (рис. 33, б). Так, если диаметр кольца составляет 1/3 диаметра зеркала, то малая ось эллиптического штриха должна составлять от 30 до 50 % большой. При этом имеется в виду, что эллипс описывается центром



Рис. 35. Сферометр на базе дискового индикатора

кольцевого шлифовальника. Вообще при любом диаметре шлифовальника шлифовка в течение некоторого времени эллиптическим штрихом не мешает.

Для точного определения радиуса кривизны можно грубо отшлифованную поверхность прополировать кусочком фетра или твердой резины с крокусом в течение 10—15 мин, как об этом рассказано в § 19 этой главы. За это время часть верхушек матового слоя сполрируется и начнет блестеть. Этого слабого блеска достаточно, чтобы легко определить фокусное расстояние по Солнцу или радиус кривизны с помощью лампы. Это наиболее точный способ определения радиуса кривизны на любой стадии шлифовки.

§ 10. ШЛИФОВКА

Получив нужное углубление, мы должны сгладить матовость на поверхности зеркала. Это делается с помощью более мелких абразивов. Шлифовальник полного размера располагается на тумбе или шпинделе машины, а зеркало наверху. Можно отшлифовать зеркало шлифовальником меньшего, чем зеркало, диаметра, но не следует брать его меньше 70—80 % от диаметра зеркала. Меньший шлифовальник располагается наверху зеркала.

После обдирки кольцом в центре зеркала возможно образование ямы. Поэтому шлифовальником меньшего, чем зеркало, диаметра нужно шлифовать эллиптическим штрихом, а на машине смещать поводок с таким расчетом, чтобы шлифовка шла по хорде, и центр шлифовальника проходил над «краем» ямы. Иначе говоря, его нужно сместить к краю приблизительно на 30 % радиуса заготовки зеркала. Полным шлифовальником можно шлифовать обычным образом без опасений, что яма углубится. Довольно скоро зеркало станет практически сферическим. Впрочем, нужно постоянно осматривать всю поверхность, как это рассказывается ниже, чтобы, заметив неоднородный мат, решить, где шлифовальник еще не пришел в контакт с зеркалом.

Если шлифовка ведется на металлическом или стеклянном шлифовальнике, то нужно перейти на более мелкий абразив. В нашем случае на № 12—8. Если же применяется шлифовальник, покрытый эпоксидной смолой или плексигласовыми пластинками, то нужно продолжить шлифовку абразивом № 25—20, так как пластмасса существенно мягче стекла, и матовость получается примерно вдвое мельче, чем на металлическом или стеклянном шлифовальниках.

Убедившись в том, что вся поверхность хорошо прошлифована, переходим к следующему номеру абразива. Нужно стремиться придерживаться уменьшения в 1,4—2 раза. Более крутая «лестница» нежелательна. Конечно, и в этом случае можно хорошо прошлифовать поверхность, но времени на это уйдет в несколько раз больше. При обработке электрокорундом и умеренном давлении переход на новый номер, меньший в 1,4 раза, потребует около 30 минут. Если следующий абразив в 2 раза мельче предыдущего, то на каждую стадию потребуется не менее часа.

Шлифпорошки № 25, 12, 6 наносят на шлифовальник чайной ложкой. Микропорошки М28, М20 и т. п. наносят иначе. Микропорошок насыпают в мягкую пластмассовую бутылочку с завинчивающейся крышкой, наливают кипяченой воды и, взболтав абразивную суспензию, дают ей отстояться и сливают излишек воды. В крышке толстой иглой делают отверстие диаметром 1 мм. Еще лучше, если крышка снабжена трубочкой, как, например, у бутылочек для бензина к зажигалкам.

Взболтав абразивную суспензию, наклоняют бутылочку отверстием вниз и, нажимая на стенки, выдавливают струйкой суспензию на шлифовальник. Взбалтывать нужно не до дна, так как там могут быть случайные крупные зерна.

Абразив можно подмазывать щетинной кистью. На ручку кисти надевается широкий картонный кружок, который прикрывает горлышко банки и предохраняет абразивную суспензию от пыли. Кроме того, он не дает кисти опускаться до дна банки, где могут быть крупные зерна.

Как часто надо наносить новые порции абразива? Чем мельче абразив, тем делать это нужно реже. Абразивы М28—М20 наносятся через 4—6 минут, М14—М10 — через 10—15 минут. Перед нанесением новой порции не нужно снимать зеркало со шлифовальника и протирать его. Слишком частое протирание приводит к попаданию на шлифовальник посторонних частиц, а это грозит появлением царапин. Лучшее три-четыре порции абразива нанести без удаления шлама. Только после этого и зеркало и шлифовальник следует промывать под струей воды из крана. Не давая им просохнуть наносят новую порцию абразива и продолжают работу.

Особое внимание нужно обратить на то, что шлифовка должна идти по всем направлениям. Для этого нужно равномерно обходить вокруг тумбы и одновременно вращать зеркало в противоположную сторону примерно с той же скоростью. То же относится и к работе на поворотном

столике. Это важно потому, что шлифовка вдоль одного азимута почти наверняка приведет к образованию тороидальной поверхности вместо сферической. Она, образно говоря, будет напоминать корыто, а это повлечет за собой астигматические изображения.

При обработке на машине находящееся сверху шлифовальника зеркало увлекается им во вращательное движение в том же направлении, но приблизительно вдвое медленнее.

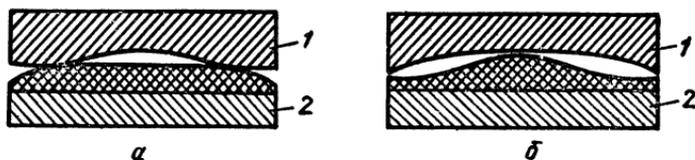


Рис. 36. Часто встречающиеся ошибки при обработке стеклянным или пластмассовым шлифовальником: *а* — завал края, *б* — подвернутый край

Этого достаточно, чтобы не беспокоиться об астигматизме. Поводок машины и планшайба не должны мешать свободному вращению зеркала в любом направлении.

Считается нормальным штрих длиной $1/3$ диаметра зеркала; сдвигать его можно как в одну сторону, так и в обе. Штрихи длиннее $1/3$ диаметра приведут к завалу на краю и яме в центре (увеличению радиуса кривизны на краю и сокращению в центральной зоне) (рис. 36). Штрихи короче $1/4$ диаметра приводят к появлению зональных ошибок, а также подвергнутого края, когда в центре кривизна меньше, чем на краю (рис. 36, б).

Не нужно стремиться делать штрихи строго одинаковой длины. Останавливаясь всегда на одном и том же месте, край шлифовальника может «нашлифовать» зональную ошибку. Особенно это важно при машинной шлифовке. Чтобы этого избежать, каждые 10—15 мин нужно несколько менять размах поводка и смещать его так, чтобы шлифовка время от времени слегка (на 1—2 см) смещалась с центрального штриха.

Для того чтобы проверить зеркало на предмет зональных ошибок, завала или подвернутого края, мокрым крокусом на кончике пальца проведем крест-накрест два диаметра по поверхности зеркала. Пока крокус мокрый, осторожно уложим зеркало на сухой шлифовальник и осторожно прижмем (не сдвигая!) их друг к другу. Там, где контакт хороший, крокус будет выдавлен на зоны — туда, где образовались зазоры между шлифовальником и зеркалом. Это

сразу укажет на наличие зональных ошибок. При завале края крокус соберется в центре и на краю, а при подвернутом крае на средних зонах.

Если обнаружен завал края, укоротим штрих до $1/4$ — $1/5$ диаметра, если подвернутый край — увеличим штрих до $2/5$ диаметра.

При ручной шлифовке нужно делать все штрихи плавно без рывков, а число штрихов не должно превышать двух в секунду на зеркале диаметром 150 мм. При больших диаметрах шлифовать нужно еще медленнее.

Во время машинной обработки надо внимательно следить за влажностью шлифовальника и зеркала. На машине из-за более интенсивной работы они высыхают быстрее. Высохший абразив может стать причиной царапин. Для того чтобы абразив легче распределялся по шлифовальнику, можно добавлять в суспензию немного моющего средства типа стирального порошка или шампуня по 3—4 капли на 100 мл воды.

Иногда при высыхании абразива шлифовальник присасывается к зеркалу и поводок может выскочить из гнезда в планшайбе и повредить зеркало. Р. Кокс предложил делать планшайбу формы, которая показана на рис. 28, ж. Как видно, если сейчас поводок выскочит, он останется на планшайбе.

Если зеркало присосалось к шлифовальнику, не нужно пытаться разъединить их силой, например, забивая клин между ними. Это приведет только к тому, что зеркало расколется. Обычно поступают так: зеркало вместе со шлифовальником погружают в теплую (50 — 60 °С) воду на 10—15 минут. После этого зеркало ставят под струю холодной воды. Температурные деформации слегка искажат форму зеркала. Этого достаточно, чтобы оно отделилось. В то же время такая разность температур не страшна, так как при ней зеркало не может лопнуть.

§ 11. ОБЪЕМ СТЕКЛА, СНИМАЕМОГО ПРИ ШЛИФОВКЕ И ПОЛИРОВКЕ

Вопрос об объеме стекла, снимаемого при обработке зеркала, содержит в себе и вопрос о времени обработки. Объем сегмента параболоида равен

$$V_{\text{пар}} = \frac{\pi y^4}{4R},$$

где y — полудиаметр заготовки, R — радиус кривизны

зеркала. Например, придавая грубую форму 20-сантиметровому зеркалу с радиусом кривизны 200 см, придется снять $V = \frac{3,14 \cdot 10^4}{4 \cdot 200} = 39,3 \text{ см}^3$ стекла. При обдирке сферической поверхности большой кривизны лучше использовать формулу объема сегмента сферы

$$V_{\text{сф}} = \frac{\pi y^4}{4R} \left(1 + \frac{y^2}{24R} \right).$$

Например, для придания грубой формы 165-миллиметровому мениску с радиусами примерно $R \approx 180$ мм в клубе им. Д. Д. Максудова пришлось сошлифовать с обеих сторон примерно 404 см^3 , т. е. всего около половины кубического дециметра. После обдирки и изготовления фаски 620-миллиметрового зеркала телескопа Ричи — Кретьена в клубе Д. Д. Максудова снимут около 2 дм^3 , и 52-килограммовая заготовка станет легче почти на 5 кг, а после сверления центрального отверстия зеркало станет легче еще на 5 кг.

Задача тонкой шлифовки — не только снять мат предыдущей фракции, но и трещиноватый подслоя. В результате толщина слоя, снимаемого каждой фракцией, в 1,5 раза больше, чем глубина ямок мата.

§ 12. ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ СКОРОСТЬ ШЛИФОВКИ?

Скорость шлифовки прежде всего зависит от твердости абразива, которым она ведется. Табл. 7 показывает относительную твердость различных естественных и искусственных материалов, применяемых в качестве шлифующих абразивов.

Во время обдирки стараются применить самые твердые материалы. Те же материалы применяются и при грубой шлифовке. На последних стадиях шлифовки применяются несколько более мягкие абразивы, например корунд. Из электрокорунда приготавливаются микропорошки от М40 и мельче.

Во-вторых, большое влияние на скорость шлифовки, впрочем, как и полировки, оказывает давление на зеркало. Считается [12], что наилучшее давление на инструмент 800 г на 1 см^2 . Однако для того, чтобы наше 150-миллиметровое зеркало, имеющее площадь 177 см^2 , подвергнуть такому давлению, надо поставить на него груз массой более 140 кг. Ни профессионалы, ни любители не используют оптимальное в смысле скорости шлифовки давление и обыч-

Твердость абразивных материалов

Наименование материала	Относительная твердость	Наименование материала	Относительная твердость
Кварцевый песок	1,0	Карбид кремния	2,9—3,3
Наждак	1,4	Карбид бора	4,8—4,9
Корунд	2,0	Алмаз	10,0

но ограничиваются давлением около 5 кПа (50 Г/см²). Для того чтобы создать такое давление на шлифовальнике, надо поставить на зеркало груз массой около 9 кг. Практически в любительской практике применяются еще меньшие давления, так как трудно передвигать зеркало, если на нем стоит тяжелый груз. Поэтому 150-миллиметровое зеркало нагружается грузом массой 2—3 кг, и удельное давление составляет 1—1,5 кПа, или 10—15 Г/см².

Нужно помнить еще об одном обстоятельстве, которое принуждает избегать больших давлений при обработке астрономических зеркал. Речь идет о деформациях заготовки при больших нагрузках, что может привести к грубым ошибкам на поверхности зеркала. Поэтому на последних стадиях тонкой шлифовки прием давление 1—1,5 кПа как оптимальное и не будем превышать это значение.

На однородности матирования сказывается продолжительность шлифовки одним номером абразива. Очевидно, что чем дольше мы шлифуем одним номером, тем равномернее будет матирование. Однако продолжительная шлифовка увеличивает вероятность попадания крупных зерен, которые могут поцарапать поверхность зеркала. Поэтому необходимо выбрать некую оптимальную продолжительность, когда матовость от предыдущего абразива совершенно явно сошлифована. Для электрокорунда эта продолжительность составляет примерно 15—20 минут, если каждый последующий номер имеет зерна в 1,4 раза меньше зерен предыдущего номера. Если «лестница» номеров «круче» и каждый последующий абразив мельче предыдущего в 2 раза, время шлифовки надо увеличить до 1—1,5 часа. При этом имеется в виду, что удельное давление составляет 1—1,5 кПа. Увеличение давления приводит к прямо пропорциональному увеличению скорости сошлифовывания стекла и, значит, к обратно пропорциональному сокращению времени шлифовки одним номером абразива. Поэтому во время обдирки

и на первых стадиях шлифовки надо применять как можно большее давление, помня, что даже усилие в 10 кГ на 150-миллиметровом зеркале приведет к удельному давлению всего около 6 кПа (60 Г/см²).

Долгое время считалось, что на поздних стадиях шлифовки давление должно быть резко уменьшено из-за опасности появления царапин. Исследования последних лет показывают, что число царапин совершенно не зависит от давления [12].

По мере того как стекло сошлифовывается, а абразив измельчается, на поверхности шлифовальника собирается большое количество шлама (отработанного абразива и измельченного стекла), который сам практически не принимает участия в процессе шлифования, но очень мешает шлифовке свежим абразивом, так как зеркало «плавает» на этом слое шлама и недостаточно прижимается к шлифовальнику. Чтобы этого избежать, необходимо своевременно убирать шлам. Для этого достаточно время от времени (через 2—3 порции абразива) добавлять побольше воды, которая смывает отработанный шлам, и он по канавкам в шлифовальнике стечет на ее края.

Однако через некоторое время нужно зеркало полностью отмыть от шлама. Чаще всего эта процедура совпадает с мытьем зеркала и шлифовальника перед переходом на более мелкий абразив.

§ 13. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МАТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Самое неприятное в ходе тонкой шлифовки — царапины и остатки матовости от предыдущих номеров абразива. Поэтому, прежде чем переходить на более мелкий абразив, нужно внимательно осмотреть матовую поверхность зеркала в косо падающем солнечном свете или свете сильной лампы, стараясь рассмотреть возможные ямки — «точки», которые выделяются на ровном фоне матовой поверхности, как яркие блески.

При рассматривании отражения в матовой поверхности зеркала большого не слишком яркого объекта, например окна днем (при косом падении света на зеркало), надо обращать внимание на то, что некоторые участки зеркала могут иметь более матовую поверхность, чем остальные. Однако надо помнить, что вид поверхности зависит и от угла падения света: при более скользком падении поверхность блестит больше. Покачивая зеркало, внимательно выискиваем матовость в виде кольца или пятна в центре, концент-

ричного с краем зеркала. Эта матовая зона говорит о том, что дело не в косом падении света, а действительно в остатках матовости после грубой шлифовки.

Если обратная сторона зеркала прозрачна, рассматриваем матовую поверхность в лупу через заготовку. Точки и царапины видны выступающими вверх и поэтому заметны значительно лучше.

Хорошие результаты можно получить, рассматривая поверхность зеркала в микроскоп с увеличением 50—100 раз. Имея слабый объектив от какого-нибудь старого микроскопа и окуляр, микроскоп можно сделать самому. Установив его на простом штативе из толстой проволоки, можно получить прекрасный инструмент (рис. 37).

Конечно, невозможно осмотреть всю поверхность зеркала в микроскоп; достаточно осмотреть несколько зон. Для этого надо от самого края зеркала пройти вдоль радиуса зеркала до самого центра. В тех случаях, когда на фоне мелкого матирования видны крупные ямки, надо осмотреть эту зону внимательно, двигаясь по окружности вдоль зоны.

Как оценить размер попадающихся ямок? Для этого в фокальную плоскость окуляра надо ввести кончик тонкой проволоки. Фокальная плоскость расположена там, где установлена так называемая полевая диафрагма окуляра; у обычных окуляров к микроскопу эта диафрагма установлена между линзами. Поэтому окуляр надо разобрать, вывинтив одну из линз. Впрочем, в некоторых микроскопах применяются окуляры с полевой диафрагмой, расположенной перед передней (не глазной) линзой. Тогда установить

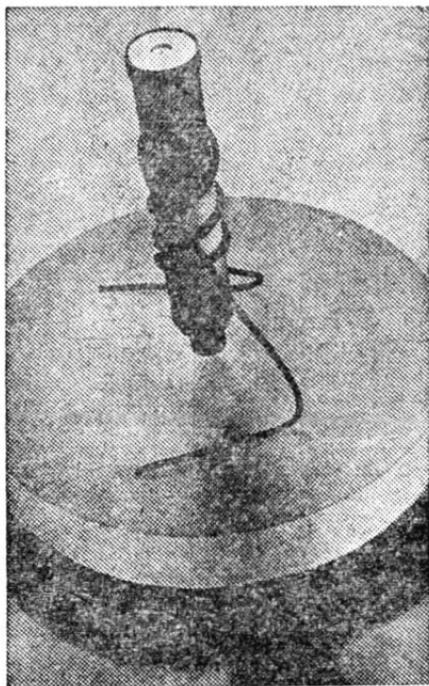


Рис. 37. Микроскоп для осмотра матовой поверхности

проволочку вообще не составит труда. Надо добиться, чтобы проволочка была видна резко одновременно с матовой поверхностью зеркала (рис. 38).

Следующий шаг заключается в том, что надо измерить диаметр поля зрения микроскопа в пространстве предметов. Для этого будем рассматривать миллиметровую линейку в микроскоп. Предположим, что в поле зрения видно одновременно 1,5 деления. Это значит, что поле зрения микроскопа составляет 1,5 мм в диаметре. Допустим, проволочка

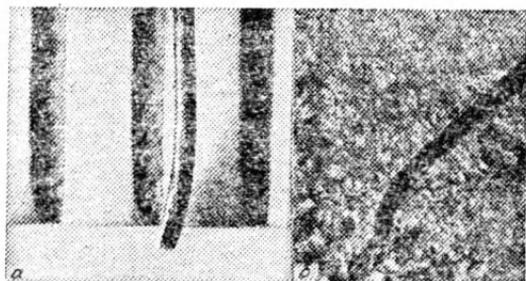


Рис. 38. Определение диаметра проволочки линейкой и вид матовой поверхности и проволочки в поле зрения микроскопа

видна такого размера, что ее толщина составляет $1/40$ диаметра поля зрения. Это значит, что в пространстве предметов проволочка проецируется размером $1,5 : 40 \approx 0,04$ мм или 40 мкм.

Как оценивать размер ямок? Глядя в микроскоп, сравниваем размер ямки с видимой толщиной проволочки. Предположим, что ямка имеет размер около $1/3$ толщины проволочки, значит, настоящий диаметр ямки равен 40 мкм : $3 \approx 13$ мкм.

Получив размер ямки, мы можем решить, каким образом ее можно сошлифовать. Практически при шлифовке с давлением около 1 кПа (10 Г/см^2) ямка сошлифовывается за 15—20 мин, если шлифовка ведется абразивом со средней величиной зерна того же размера, что и диаметр ямки. В нашем примере ямка будет сошлифована за 15—20 минут микропорошком М14.

Не нужно думать, что для оценки качества поверхности зеркала обязательно нужен микроскоп. Большинство любителей обходится лупой. Но микроскоп позволяет просто и быстро решать вопрос об устранении ямок или царапин.

§ 14. КАК ИЗБЕЖАТЬ ЦАРАПИН?

Надо сразу сказать, что универсального средства полностью избежать царапин нет. Проблема царапин настолько сложна, что даже в профессиональном производстве существуют допуски, позволяющие считать поверхность совершенной, если на ней есть некоторое число небольших царапин. ГОСТ предусматривает для астрономических объективов и зеркал класс чистоты VII. Это означает, что допускается некоторое число царапин шириной не более 0,1 мм, если их суммарная длина не превышает двух диаметров объектива. В нашем случае ГОСТ допускает несколько царапин общей длиной около 300 мм. На оптических деталях размером с наше зеркало не учитываются одиночные точки, если их диаметр не превышает 1,0 мм, а число не больше $0,5 D$ (D — диаметр зеркала в мм). На нашем зеркале может быть не более 75 точек диаметром до 1 мм.

Вообще же царапин и точек можно в значительной степени избежать, если в основу положить принцип: «Во всем абсолютная чистота и аккуратность». С этой целью не мешает лишний раз залить абразивы водой, взболтать и дать отстояться.

Для баночек, где хранятся микропорошки, ни в коем случае нельзя применять стеклянные пробки. Пробки должны быть корковые или пластмассовые.

Для взмучивания абразивов надо применять только хорошо отстоявшуюся свежевскипяченную воду.

Очень помогают канавки на шлифовальнике, куда крупные частицы проваливаются, не причинив вреда.

На рабочем месте не должно быть ничего лишнего. Для того чтобы отработанный абразив не скапливался на столе, надо почаще снимать и мыть клеенку, которой застелен стол и на которой установлен станок. Многие любители используют вместо клеенки стопу старых газет, грязные газеты снимают и выбрасывают при переходе к более мелкому абразиву.

Часто в толще стекла попадают мелкие пузырьки. Они не страшны. Но если такой пузырек расположен в непосредственной близости к поверхности зеркала, он может в ходе шлифовки вскрыться. В этом случае ямку надо расшлифовать с помощью мелкого абразива и гвоздя, установив гвоздь в ямку и вращая его пальцами. Это устранит еще одну опасность — скапливание в ямке отработанного абразива. Расшлифованная ямка практически не мешает работе зеркала. У 2,6-метрового телескопа Крымской астро-

физической обсерватории одно из вспомогательных зеркал имеет два расшлифованных пузырька диаметром примерно 6—7 мм.

Во время тонкой шлифовки чрезвычайно мелкий отработанный абразив слипается в прочные комочки. Эти комочки собираются на краю шлифовальника, где отработанный абразив быстро сохнет. Попав между зеркалом и шлифовальником, комочек не может быстро разрушиться и некоторое время катается по поверхности зеркала, производя царапины. В поле зрения микроскопа эти царапины выглядят не так, как обычные, образованные крупными зернами абразива. Если последние оставляют царапины, напоминающие овраги с рваными краями и очень неровным дном, то царапины от слипшихся комочков имеют совершенно плоское дно. Создается впечатление, что часть матовой поверхности осела на некоторую глубину. Чтобы избежать этих царапин, надо не давать высыхать абразиву на краю шлифовальника. Для этого край шлифовальника время от времени надо смачивать водой, следя за тем, чтобы он оставался всегда мокрым.

При рассматривании отшлифованной поверхности или в процессе полировки иногда можно заметить, что одна из зон явно хуже отшлифована и имеет более грубую матовость. Эта зона обычно располагается там, где добавляются свежие порции абразива. На этой зоне абразив еще не успевает разрушиться, тогда как на другие он попадает заметно измельченным. Чтобы этого избежать, надо наносить абразив не только на этой зоне, но и на других — на краю, в центре.

В крупных шлифовальниках диаметром более 400 мм на разных зонах делают несколько небольших отверстий с воронками, куда добавляются абразив и вода. Разумеется, что в этом случае шлифовальник может располагаться только сверху зеркала. Опасно оставлять на шлифовальнике мало абразива: это одна из причин появления царапин.

Канавки на шлифовальнике, защищая зеркало от царапин во время шлифовки, могут стать источником царапин во время смены номера абразива. Поэтому мыть такой шлифовальник нужно особенно тщательно, лучше всего со щеткой. Вообще нужно как можно реже разъединять зеркало со шлифовальником.

Протирать зеркала и шлифовальник лучше белыми полотняными салфетками. При переходе к новому более мелкому абразиву салфетку важно тщательно простирать и прополоскать, а лучше взять новую.

§ 15. КАК ИЗМЕНИТЬ РАДИУС КРИВИЗНЫ?

Давно замечено, что если две плоские стеклянные пластины долго шлифовать одну на другой, то верхняя пластина постепенно становится вогнутой, а нижняя выпуклой. Между прочим, уже два с половиной столетия это свойство шлифуемых поверхностей использовалось для того, чтобы придать зеркалу вогнутость, а шлифовальнику выпуклость.

В тот момент, когда во время ручной шлифовки оптик выносит верхний диск на край, максимальное давление приходится на центральные зоны верхнего диска и край нижнего. При совмещении центров дисков давление распределяется равномерно по всей их поверхности. При очередном выносе на край снова верхняя заготовка сошлифовывается больше в центре, а нижняя на краю. Постепенно верхний диск становится вогнутым, а нижний выпуклым. Сверху — будущее зеркало, внизу — шлифовальник. Равномерно шлифуя по всем направлениям, мы получаем две пришлифованные друг к другу сферические поверхности.

Тех, кого это заинтересует, отсылаем к книге М. С. Навашина «Телескоп астронома-любителя».

Нас сейчас интересует только возможность изменить величину радиуса кривизны зеркала. При шлифовке пластмассовым шлифовальником постоянное положение зеркала сверху приводит к тому, что его радиус кривизны, а значит, и фокусное расстояние постепенно уменьшаются. Например, при обработке автором зеркала диаметром 160 мм микропорошками М40, М28, М20, М14 в течение трех часов фокусное расстояние зеркала уменьшилось с 1000 мм до 940 мм, так как все это время зеркало находилось на шлифовальнике.

Чтобы увеличить фокусное расстояние, нужно зеркало и шлифовальник поменять местами: зеркало положить на стол, а шлифовальник сверху. Меняя положение зеркала и шлифовальника, можно сохранять величину радиуса кривизны и фокусного расстояния, если оно близко к расчетному.

Впрочем, некоторое изменение фокусного расстояния не страшно, так как от этого только несколько изменится длина трубы. Единственное, за чем надо следить, — это чтобы величина относительного фокусного расстояния не уменьшалась до величин, значительно меньших, чем приведены в табл. 3. В противном случае у сферического зеркала величина сферической аберрации будет превышать

допустимую. Металл сошлифовывается много медленнее стекла, поэтому изменить радиус зеркала, поменяв местами его и металлический шлифовальник, нельзя.

§ 16. КОГДА ЗАКАНЧИВАТЬ ШЛИФОВКУ?

Чем тоньше матовость, тем проще и быстрее идет полировка. Но при использовании слишком мелких микропорошков вероятность возникновения царапин резко возрастает. На это жалуются почти все любители. Поэтому ограничим себя микропорошком М10. На пластмассовом шлифовальнике он даст очень тонкую матовость, которая соответствует матовости от порошка № 7 на металлическом или стеклянном шлифовальнике. В то же время микропорошок М10 еще не дает тех царапин, которые характерны для номеров М7 или М5. Можно остановиться и на порошке М14. При этом в два раза увеличится время полировки.

После осмотра отшлифованной поверхности, как было описано выше, можно решиться на переход к полировке, если на матовой поверхности зеркала нет недопустимых дефектов. Здесь полезно еще раз отметить, что отдельные царапины и точки не сказываются на качестве изображения, но сеть мельчайших многочисленных царапин очень страшна. Поэтому, если на поверхности зеркала обнаружены многочисленные царапины или ямки, которые значительно глубже основной матовости, надо возвратиться к шлифовке с более крупным абразивом, прежде чем перейти к полировке. Можно затратить много часов непрерывной полировки, но так и не споллировать ямок диаметром 30—40 мкм.

§ 17. КАК ПРИГОТОВИТЬ ПОЛИРОВОЧНУЮ СМОЛУ?

Полировочная смола состоит из каменноугольного пека (битума, сапожного вара), канифоли и воска (без которого можно обойтись). В табл. 8 приведены составляющие полировочной смолы в зависимости от рабочей температуры помещения.

На разостланной газете разобьем пек (или битум) и канифоль на кусочки размером в 0,5—1 см, измельчим воск *). Перемешаем в пропорциях, указанных в таблице, и всыпем в металлическую баночку, в которой будем варить смолу. Смесь должна нагреваться на медленном огне, и при

*) Мутная, совершенно непрозрачная канифоль для приготовления полировочной смолы не годится.

Состав полировочных смол

Марка смолы	Канифоль, Г	Воск, Г	Пек, Г	Рабочая температура, °С
П10,5	840	10	150	40—35
П10	700	10	290	35—30
П9,5	600	10	390	30—25
П9	500	10	490	25—20
П8,5	380	10	610	25—20
П8	150	10	840	20—15

варке нельзя допускать, чтобы смола закипела. Тщательно перемешаем массу палочкой. Сначала на палочке налипнет почти вся смола, но по мере постепенного разогревания она равномерно заполнит банку. После получасового нагревания и помешивания смолу можно считать готовой. Теперь из смолы надо устранить возможные твердые крупинки. Для этого смолу надо процедить через марлю.

Если в ходе полировки обнаружится, что смола твердая, расплавим ее и добавим немного скипидара. Даже очень малая доза заметно влияет на твердость. Мягкую смолу нужно недолго прокипятить, чтобы часть летучих составляющих испарилась и смола стала тверже. Если при умеренном давлении ногтем большого пальца на смоле остается след, ее твердость достаточна.

§ 18. КАК СДЕЛАТЬ ПОЛИРОВАЛЬНИК?

Если шлифовка шла на достаточно твердом шлифовальнике, то полировка производится на относительно мягком полировальнике. Существует довольно много способов изготовления полировальников — нанесения смолы на металлическую основу. Мы опишем три из них.

Первый напоминает изготовление шлифовальника из эпоксидной смолы. На лицевую поверхность зеркала кладем пару кругов из промокательной или другой мягкой пористой бумаги, которая должна защитить зеркало от резкого перегрева в момент выливания на него смолы. Поверх промокательной бумаги укладываем круг из алюминиевой фольги, которую можно купить в хозяйственных магазинах.

Вокруг зеркала сделаем бортик из мокрой толстой бумаги в два слоя высотой в 5 мм над поверхностью зеркала

Выльем на фольгу разогретую до консистенции сметаны смолу (рис. 39). Когда уровень смолы выровняется с верхним краем бортика, положим на смолу подогретый металлический диск, протерев его предварительно скипидаром, и



Рис. 39А. Изготовление смоляного полировальника с помощью паяльника: *а* — зеркало укрыто двумя слоями промокательной бумаги, *б* — на уложенную поверх бумаги фольгу наливается смола, *в* — на незатвердевшую смолу укладывается подогретый шлифовальник, *г* — фольга легко сдирается с затвердевшей смолы

оставим остывать на смоле. Толщина слоя смолы должна быть около 5 мм.

Через 10 минут смола достаточно затвердеет, и мы сможем снять основание полировальника вместе со смолой. Перевернем его смолой вверх и удалим фольгу, которая снимается очень легко. Можно обойтись и без бумажного бор-

тика. Тогда наплывы смолы за край шлифовальника сколем мокрым ножом.

Окончательную форму полировальнику мы придадим на отшлифованной поверхности зеркала, но сначала нужно изготовить канавки, назначение которых станет ясным несколько позже.

Для изготовления канавок на жало электропаяльника прикрутим толстой медной проволокой наконечник из жести. Нарежем полоски газеты длиной примерно 150 мм и шириной 20 мм. Смочим и уложим их на поверхность смолы

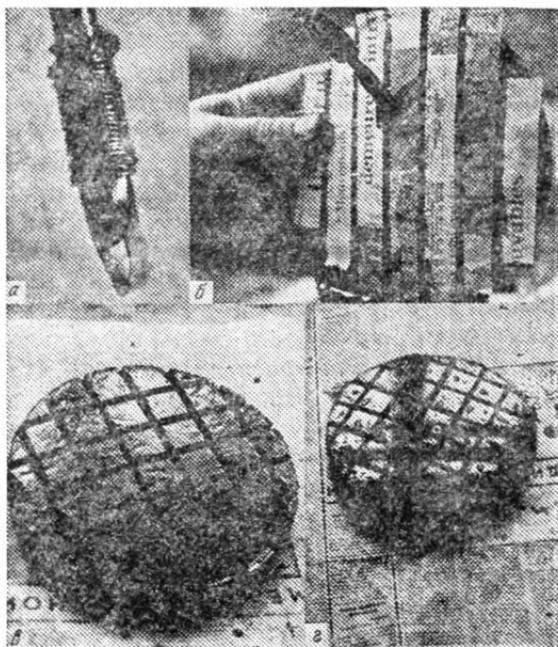


Рис. 39Б. Продолжение работы над полировальником: *а* — наконечник из жести укреплен на паяльнике, *б* — прорезание канавок горячим паяльником, *в* — готовый полировальник, *г* — сетка канавок смещена относительно центра полировальника (показан кружком)

параллельно друг другу с интервалом 5 мм. На края банки со смолой установим полировальник вертикально, рабочей стороной к себе и полосками вертикально. Подведем наконечник паяльника к одному из промежутков между полосками газеты и начнем прорезать горячим наконечником канав-

ку, ведя паяльник снизу вверх и касаясь его жалом металлического диска. Расплавленная смола по желобку накопника будет стекать вниз в баночку со смолой. Прорезав ряд канавок в одном направлении, укладываем мокрые полоски газеты в перпендикулярном направлении к уже прорезанным канавкам и прорезаем второй ряд канавок. Глубина канавок должна равняться толщине слоя смолы, так, чтобы каждый квадратик действовал как маленький самостоятельный полировальник. Важно проследить, чтобы все квадратики были аккуратными и одинаковыми. Но важно также и то, чтобы в целом сетка канавок не была симметричной относительно центра полировальника. Для этого надо, чтобы с центром полировальника не совпадали ни канавки, ни центры квадратиков.

После того как все канавки прорезаны, отформуем полировальник окончательно. Нагреем его в теплой (50—60°) воде, смочим теплой водой зеркало и, уложив теплый полировальник рабочей поверхностью вверх на станок, а верх него зеркало, начнем «полировку» без крокуса, делая это точно так же, как и при шлифовке. Слишком больших давлений здесь не нужно, так как канавки могут искривиться. Наша задача добиться того, чтобы вначале неровная и довольно матовая поверхность смолы стала ровной и зеркально блестящей. Нужно проследить за тем, чтобы на поверхности квадратиков не было ямок от мелких пузырьков воздуха, которые попадают между стеклом и смолой. Один-два пузырька не страшны, но сеточка мелких пузырьков на той или иной зоне непременно приведет к зональной ошибке. Участки полировальника, ослабленные сколами смолы, ямками от пузырей и т. п., полируют менее интенсивно и на этих зонах зеркала образуются валики. Обилие подобных неоднородностей приводит к «долгониграющей пластинке» на зеркале. Впрочем, при описанном способе получения полировальника этот дефект встречается очень редко.

Надо помнить, что во время формовки полировальника зеркало должно постоянно быть мокрым, иначе оно может накрепко приклеиться к смоле, и тогда придется нагревать полировальник и снимать зеркало вместе со смолой. Если такое случится, то сдирать смолу со стекла можно только деревянной палочкой, чтобы не поцарапать зеркало. Затем остатки смолы надо стереть ваткой, смоченной в бензине или керосине, и после этого вымыть зеркало водой с мылом.

Второй способ изготовления полировальника также

проводится в два приема: отливка с изготовлением канавок и формовка.

Отливку ведем на резиновый коврик с взаимно пересекающимися ребрами. Эти ребра в сечении должны быть трапецеидальными или, как сказал бы литейщик, они должны иметь конусность.

Укладываем коврик на зеркало ребрами вверх. Если зеркало мало и края коврика свисают, подложим под них

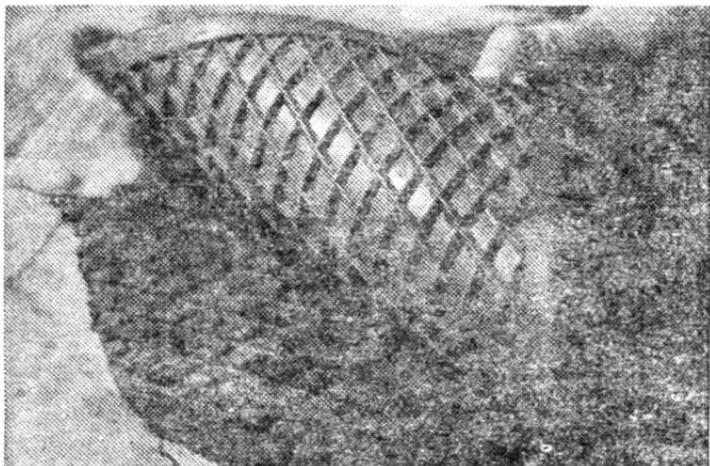


Рис. 40. Отливка полировальника на коврике. Излишки смолы скалываются мокрым ножом

что-нибудь, чтобы образовалась вогнутая поверхность приблизительно той же кривизны, что и зеркало.

Приготовим 2—3 см³ (один наперсток) смеси воды и полирита. Смесь должна быть достаточно густой. С помощью щетинной кисти закрасим полиритом ту часть коврика, которая лежит на зеркале. Сразу же выльем на коврик расплавленную смолу, чтобы она заполнила ямки, поднимаясь до уровня ребер.

Уложим на смолу шлифовальник рабочей стороной к смоле или любой металлический круг достаточной толщины (табл. 4). Через 10 минут снимем полировальник с коврика (рис. 40). Теперь сколем излишки смолы на краю мокрым перочинным или сапожным ножом.

Дальше нагреем полировальник в теплой воде до тех пор,

пока смола немного не размягчится. Уложим полировальник на тумбу и начнем зеркалом формировать его. Для этого надо двигать зеркало на нем, как во время шлифовки, добиваясь того, чтобы на поверхности смолы не осталось ямок и вся она заблестела. Возможно, что канавки несколько заплывут. Тогда их надо подровнять мокрым ножом. Если образуются сколы, их нужно заполнить смолой. Для этого нагретым наконечником на жале паяльника надо прикоснуться к кусочку смолы и капнуть смолой в ямку. После этого следует мокрым пальцем подровнять и заново отформовать весь полировальник. Если нет паяльника с наконечником, можно к кусочку смолы поднести горящую спичку.

Рисунок ребер на резиновом коврикe может быть различным: они могут пересекаться под прямым углом, под углом в 60° , образовывать шестиугольные ячейки и т. п. Здесь важно только, чтобы рисунок был однообразным по всей поверхности и несимметричным относительно центра полировальника.

Третий способ заключается в том, что смолу выливают на фольгу или мокрый пергамент (можно на кальку). Пока она мягка, мокрой деревянной линейкой проводим систему взаимно перпендикулярных канавок, подправляя их, если они заплывают. Дадим смоле окончательно затвердеть. После этого снимем слой с фольги или пергамента и разложим смолу на квадратики, как шоколадную плитку.

Теперь эти квадратики надо уложить на подогретую и протертую скипидаром (для лучшего сцепления) основу полировальника — металлический круг. Желательно, чтобы эта основа имела выпуклую форму того же радиуса кривизны, что и зеркало. Это нужно для того, чтобы слой смолы имел на всей площади полировальника примерно одинаковую толщину. Кстати, это желательно и для полировальников, описанных выше. К этому есть два простых пути. Во-первых, можно приготовить полировальник непосредственно на выпуклом шлифовальнике или сделать еще один диск с эпоксидным слоем по радиусу кривизны зеркала. Второй путь заключается в том, что алюминиевую пластину относительно небольшой толщины (для 150-миллиметрового зеркала она должна иметь толщину 10—12 мм) кладем на ровную поверхность песка и с силой тяжелым молотком бьем в центр круга, постоянно проверяя, как ведет себя обратная сторона диска. Таким образом, можно получить заготовку подходящей кривизны.

В ходе полировки канавки заплывают. Подравниваем их края острым концом мокрого ножа. Полировальник

обильно смачиваем водой, и осколки смолы постоянно смываем. Наклон стенок канавки 45° , ее глубина должна быть до основания полировальника.

§ 19. ПОЛИРОВКА

Отформовав полировальник, перейдем к полировке. Через 20—30 часов работы (а может быть, и раньше) зеркало станет совершенно гладким, и все следы матовости исчезнут. Кроме того, во время полировки зеркалу будет придана оптически точная поверхность.

Полировка во многом напоминает шлифовку. Длина штрихов и скорость перемещения полировальника та же. Строго одинаковые штрихи приведут к зональным ошибкам; поэтому, работая на машине, время от времени изменяем длину штриха от $1/3$ до $1/5$ диаметра зеркала. При ручной работе полезно через каждые 15—20 минут делать два-три десятка хаотических штрихов с той же скоростью, что и обычные. Вынос за край и в этом случае не должен превышать $1/3$ диаметра зеркала.

Для ускорения споллировывания стекла давление на первых порах должно быть достаточно большим, около 1 кПа (10 Г/см^2). По мере споллировывания мата давление можно снизить. Полирит споллировывает стекло вдвое быстрее крокуса, но у крокуса есть свои преимущества: он дает поверхность несколько лучшего качества и его можно получить самому [6].

В ходе полировки чистота рабочего места и инструмента необходимы в еще большей степени, чем при шлифовке. Полирит, как и микропорошки, наносим из пластмассовой бутылочки. Нужно внимательно следить за влажностью полировальника, добавляя, если нужно, несколько капель воды.

Полирита расходуется значительно меньше, чем микропорошков. Об этом начинающие часто забывают. От избытка полирита поверхность смолы становится блестящей и твердой, а полировка идет медленнее. Интервал между нанесениями порций полирита составляет от 30 мин до 2 ч. Только на первых стадиях, когда полировальник недостаточно точно повторяет форму зеркала, полирит можно наносить через 10—20 минут.

Итак, обильно обрызгаем полировальник полиритом и осторожно положим зеркало на поверхность смолы. Сквозь стекло видно, что значительная часть поверхности полировальника не прилегает к стеклу. В этих местах видны боль-

шие и маленькие воздушные полости. Осторожно без нажима сделаем несколько круговых движений, чтобы выдавить воздух в канавки.

В начале полировки зеркало может цепляться за полировальник от того, что форма полировальника еще не вполне точно соответствует форме зеркала. Чаще всего в центре зеркала образуется яма. В сильно преувеличенном виде это показано на рис. 36, а.

Самое простое средство от завала — уменьшение длины штриха до $1/5$ диаметра. Через полчаса такой полировки переходим к нормальному штриху. Если зеркало продолжает цепляться, то возможно, что смола слишком мягка. Собьем ее с полировальника, расплавим и либо добавим немного канифоли, либо недолго прокипятим, после чего снова делаем полировальник.

Мягкая смола легко приводит к завалу, так как идущий впереди край зеркала слегка зарывается в нее. Твердая смола, напротив, легко сохраняет форму, и сферу на ней получить проще, но по этой же причине на ней трудно параболить зеркало. Мягкая смола полирует быстрее и царапины на зеркале появляются реже.

Добившись плавности движения, продолжим полировку. Для лучшего распределения полирита по поверхности полировальника добавим одну-две капли шампуня.

Через час работы снимем зеркало, протрем его гигроскопической ватой, бумажным полотенцем или чистым носовым платком. Оно довольно хорошо отражает предметы, но часть его поверхности наверняка еще более матовая, чем остальная. Обычно это бывает на краю или на средних зонах. Эти матовые зоны говорят о том, что зеркало еще далеко от сферы. В микроскоп видно, что большие площадки стекла уже почти полностью отполированы, но часть поверхности занимают ямки мата. Пройдемся по радиусу зеркала. Если остатки мата занимают на всех зонах примерно одну и ту же площадь, дело идет хорошо. Если через час-два полировки в матовых зонах совсем нет сполитрованных «вершин» матовой поверхности, возможно, придется вернуться к шлифовке. Оценив в микроскоп размер наиболее часто встречающихся ямок, выберем подходящий номер абразива.

Если полировальник долго не приходит в контакт с зеркалом, полировальник можно разогреть в горячей воде (60—80 °С), наложить на него кусок тюля или другой равномерной сетки и, положив сверху зеркало с грузом 2—3 кг, дать отформоваться. Сняв зеркало и тюль, мы увидим на поверхности каждой фасетки (квадратика) мелкую сетку канавок.

Каждая из этих крошечных фасеток работает как самостоятельный квадратик, и смола имеет возможность быстро принимать нужную форму. Полировка идет равномерно по всей поверхности.

Во время работы канавки на смоле постоянно заплывают. Это плохо. Ведь каждый квадратик работает как самостоятельный полировальник и легко приспосабливается к поверхности зеркала. Когда канавки заплывают, слой смолы становится сплошным и плохо деформируется. Поэтому время от времени кончиком мокрого сапожного или перочинного ножа прорезаем канавки до самого основания полировальника, срезая стенки канавок под углом 45° .

После перерыва в несколько часов следует сделать холодную формовку полировальника. Смажем полиритом поверхность полировальника, совместим центры полировальника и зеркала и плотно прижмем зеркало к смоле. Установим на зеркало груз в 2—3 кг и через 15—20 минут начнем полировку.

Еще лучше во время одно-двухдневного перерыва зеркало на полировальнике устанавливать в таз с водой, погружая его так, чтобы уровень воды все это время от испарения не опускался ниже границы между полировальником и зеркалом. Нужно быть осторожным зимой, когда влажность в помещениях низкая и вода испаряется быстро. Если уровень воды в тазу не опустился ниже допустимого, то зеркало снимается легко. В противном случае зеркало безнадежно приклеится к смоле. Если такое случилось, то можно попытаться, резко постукивая по краю металлического шлифовальника молотком, сбить его с зеркала. Можно, наклонив зеркало и полировальник под углом 45° к поверхности стола, сделать несколько ударов полировальником по тумбе. Если это не поможет, придется осторожно разогреть полировальник и стащить с него зеркало вместе со смолой.

При обработке на машине полирит из-за более интенсивной работы высыхает быстрее, чем при ручной обработке, поэтому важно постоянно следить за влажностью полировальника. Вообще надо помнить, что машина — это еще не автомат. Предоставленная самой себе она может наделать бед. Например, при присасывании зеркала к полировальнику вырвать кусок смолы, сбросить зеркало и даже сломать его. Сорвавшийся поводок может упасть на зеркало и повредить его. Нужно стараться использовать планшайбу, предложенную Р. Коксом (см. рис. 28, *жс*).

Если все пойдет хорошо, зеркало через 5—10 часов работы будет отполировано, но нужно быть готовым к тому,

что тонкая шлифовка была недостаточно качественной, и полировка может растянуться на 20—30 часов. Это тоже не слишком много. Во всяком случае у начинающих любителей такое время считается вполне приемлемым.

Решив, что полировка подходит к концу, устроим серьезное испытание зеркала на остатки матовости и царапины. Для этого поместим его в лучах Солнца и будем рассматривать поверхность на черном фоне. Вместо лучей Солнца можно использовать лампу, свет которой с помощью положительной линзы фокусируется на поверхности зеркала.

В ходе полировки важно вести журнал с указанием каждой операции, ее продолжительности и результата. Это нужно, чтобы снова и снова не повторять прежние ошибки. Особенно важен журнал во время следующего этапа — фигуризации, во время которого зеркало станет оптически точной поверхностью. Здесь не только важно знать, как получить идеальную поверхность, но, может быть, еще важнее, знать, как контролировать ход фигуризации, как обнаруживать имеющиеся ошибки поверхности. Для этих целей применяют теневой метод Фуко.

§ 20. ЧТО ТАКОЕ ТЕНЕВОЙ МЕТОД ФУКО?

Во времена Уильяма Гершеля получить хорошее зеркало часто было делом случая, так как вплоть до середины XIX в. не было надежного способа контроля формы зеркал. Лишь в 1859 г. великий французский физик Леон Фуко предложил свой гениальный метод контроля вогнутых оптически точных поверхностей. Этот метод столь же изящен по своей идее, сколь чувствителен и надежен на практике. Его суть сводится к следующему.

Близ центра кривизны O (на удвоенном фокусном расстоянии) вогнутого зеркала (рис. 41) устанавливается крошечный, но яркий источник света («искусственная звезда») M . Этой звездой может служить маленькая (0,1—0,3 мм) дырочка в куске алюминиевой фольги, которой оборачивают лампочку карманного фонарика. Лампочка может быть вставлена в патрон от елочной гирлянды или просто припаяна к проводам, ведущим к батарейке или трансформатору. Так как «искусственная звезда» установлена вблизи центра кривизны зеркала (чуть сбоку от оси зеркала), зеркало строит ее изображение также вблизи центра кривизны, но по другую от оси сторону. Если позади изображения «искусственной звезды» поместить глаз, чтобы весь пучок света «провалился» в зрачок, мы увидим, что зеркало равномерно

по всей поверхности залито светом «звезды». Это и понятно: ведь в этот момент все без исключения лучи «звезды», отраженные зеркалом, соберутся в зрачке.

Представим себе, что мы испытываем идеальное сферическое зеркало. Это значит, что лучи, отраженные каждым участком зеркала, каждой его зоной, все пересекутся в точке фокуса *). Осторожно введем непрозрачный экранчик



Леон Фуко (1819—1868)

с острым (без зазубрин) краем (например, лезвие безопасной бритвы) в вершину конуса лучей, чтобы перекрыть изображение «звезды». Одновременно смотрим на зеркало, чтобы оно оставалось равномерно освещенным.

Если лезвие вводить очень осторожно, чтобы оно перекрыло только часть дифракционного изображения «звезды», зеркало померкнет лишь отчасти, но также по всей поверхности одновременно. Важно понять, что в построении каж-

*) При описании метода Фуко словом «фокус» обозначается фокус сферической волны, расположенный в центре кривизны сферы, а не главный фокус зеркала.

лого участка изображения «звезды», даже если это изображение дифракционное, участвует в с я поверхность идеального сферического зеркала одновременно. Именно поэтому, какую бы часть изображения мы ни перекрыли, зер-

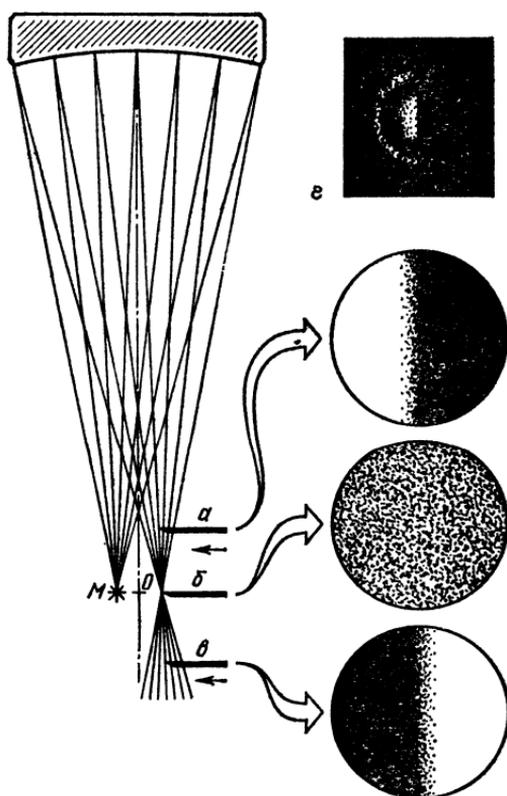


Рис. 41. Схема метода Фуко: *a* — предфокальное положение ножа, *b* — фокальное положение ножа, *v* — зафокальное положение, *e* — сильно увеличенный вид дифракционного изображения точки *M*, пересеченной ножом Фуко в положении *b*

кало будет гаснуть одновременно по всей поверхности. (рис. 41. *b* и *e*).

Теперь несколько изменим опыт. Введем лезвие, которое принято называть ножом Фуко, в конус лучей до их пересечения в фокусе. Нож расположен в этом случае на 1—2 см ближе к зеркалу. Это положение называется предфокальным. Если теперь мы посмотрим на зеркало (конечно, оставляя глаз все так же в пучке света), то увидим, что часть зеркала погасла, тогда как другая часть его по-преж-

нему освещена лампой. Если нож введен справа, то погаснет правая часть. Это происходит потому, что нож пересек часть пучка, идущую от правой части зеркала.

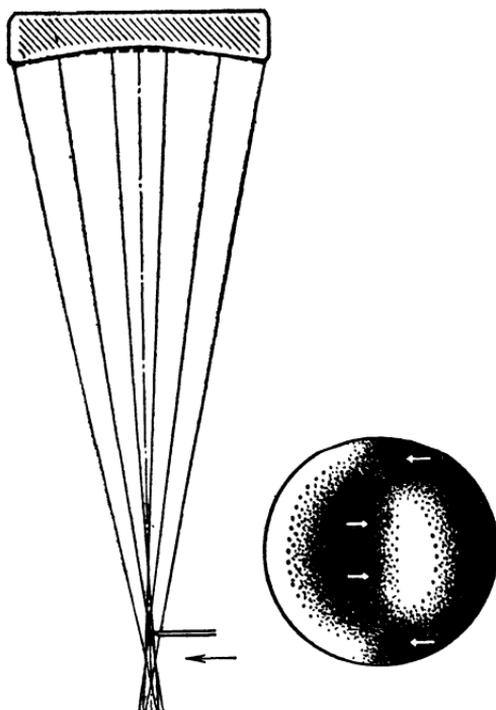


Рис. 42. Теневая картина, когда зеркало имеет в центре большую кривизну, чем на краях

Еще раз изменим наш эксперимент. Введем нож в пучок позади изображения «звезды». Теперь при введении ножа справа гаснет левая часть зеркала. Это происходит потому, что после пересечения в точке лучи, идущие с левой стороны зеркала, оказываются справа от оптической оси.

Сформулируем важное правило: если нож вводится в пучок справа в предфокальном положении, то гаснет правая часть зеркала. Если нож вводится в пучок справа в зафокальном положении, то гаснет левая часть зеркала.

Иначе говоря, в предфокальном положении тень ножа на зеркале движется в ту же сторону, что и нож, а в зафо-

кальном положении тень движется навстречу ножу.

Теперь сосредоточим все внимание. Допустим, что зеркало — не идеальная сфера, а имеет завал на краю и яму в центре (рис. 42). В этом случае радиус кривизны центральной части короче радиуса кривизны края зеркала. Это означает, что и фокусное расстояние центра короче фокусного расстояния краев; фокус некоторой промежуточной зоны окажется где-то между фокусами центра и края.

«Поймаем» глазом пучок чуть дальше фокусов всех зон и снова введем нож в районе фокуса промежуточной зоны. Очевидно, что для крайней зоны положение ножа окажется предфокальным, и на краю зеркала тень разместится справа. Для центральной зоны это же положение ножа окажется зафокальным, и в центре зеркала тень расположится слева от вертикальной оси симметрии.

На промежуточной зоне, в фокусе которой находится нож, мы увидим «полутень», когда поверхность гаснет лишь отчасти.

Окинув взглядом все зеркало, мы увидим, что зеркало сейчас напоминает не то лунный кратер (как кажется автору книги), не то бублик (как кажется другим любителям). Мы явно видим «яму» в центре и «вал» на средней зоне, тогда как край зеркала «опущен» или «завален».

Задача оптика состоит в том, чтобы, рассматривая теневой «рельеф», решить, как нужно изменить ход полировки, чтобы сnivelировать «бугры», «ямы», «канавки», «валики» и получить «плоский» теневой рельеф. Именно плоский теневой рельеф соответствует идеальной сфере.

§ 21. ЧТО НУЖНО ПРИГОТОВИТЬ ДЛЯ ТЕНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ?

Прежде чем мы приступим на практике к первым теневым испытаниям зеркала, надо изготовить простое приспособление, без которого испытания превратятся в настоящую пытку. Это оправа для зеркала. Она служит для того, чтобы удерживать зеркало в вертикальном положении, и позволяет наклонять его в небольших пределах (рис. 43). Две взаимно перпендикулярные доски скреплены так, что нижний край вертикальной доски слегка выступает. На свободном конце горизонтальной доски привернем парой коротких шурупов или прибьем гвоздями 3—5-миллиметровую пластину из стали или латуни; если пластина из алюминия, то она должна быть потолще. В пластине про-

сверлим отверстие и нарежем резьбу. В это отверстие ввернем винт, который пропустим насквозь через доску. Теперь наше приспособление опирается на край вертикальной доски и на кончик винта. Вращая винт в ту или иную сторону, мы сможем в небольших пределах наклонять вертикальную доску, а вместе с ней и зеркало. В вертикальную доску вобьем два гвоздя, к которым привяжем широкую тесьму. Длина тесьмы должна быть такой, чтобы зеркало, вложенное в нее, оказалось примерно в середине доски. Чтобы зеркало не опрокидывалось, в торцы доски вобьем еще по гвоздику, к которым привяжем резинку. Эта резинка будет прижимать зеркало к доске. Итак, в нашем распоряжении оказалась довольно удобная оправа зеркала, которая позволит нам слегка его наклонять и поворачивать.

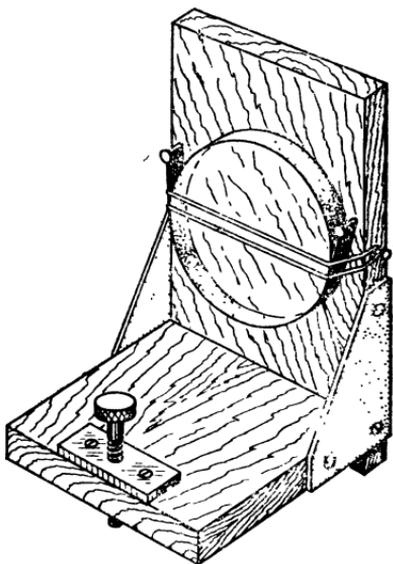


Рис. 43. Простая оправа зеркала для теневых испытаний

§ 22. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТРЕНИРОВКА

Прежде всего немного усовершенствуем искусственную звезду. В трубку диаметром около 10 мм вставим патрончик от елочной гирлянды так, чтобы ввернутая лампочка оказалась в самом начале трубки. Далее установим зеркало в оправе на устойчивый стол и отмерим от его поверхности вдоль оптической оси (оси симметрии зеркала) два его фокусных расстояния. Для фокусного расстояния 1200 мм это составит 2400 мм. В этой точке, которая является центром кривизны поверхности зеркала, установим трубку с лампочкой, чтобы она освещала зеркало. Затемним комнату шторами или займемся этим вечером в неосвещенной комнате. Поворачивая и наклоняя зеркало, а также передвигая вправо или влево лампочку, добьемся того, чтобы изображение волоска лампочки оказалось рядом с самой лампочкой. Для этого рядом с трубкой установим белый экран шириной 4—5 см и высотой 10—15 см с небольшим отверстием в верхней части диаметром 5—6 мм (рис. 44). Когда изображение

волоска лампочки окажется на экране, двигая экран взад и вперед, добьемся того, чтобы изображение волоска оказалось достаточно резким. Наклоняя зеркало и перемещая экран, добьемся того, чтобы изображение волоска «проваливалось» в отверстие. Расположившись сзади экрана, будем смотреть через отверстие на зеркало: Мы увидим сквозь отверстие изображение волоска, которое «висит» в нем. Не

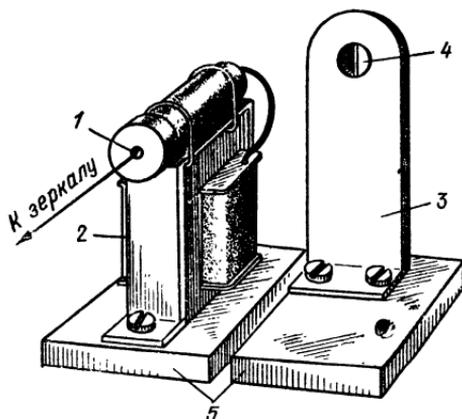


Рис. 44. Простой теневого прибор: 1 — искусственная звезда, 2 — трансформатор, 3 — экран, 4 — лезвие бритвы, 5 — основание

теряя это изображение из виду, будем приближать постепенно глаз к отверстию в экране. При этом мы заметим, что видимые размеры волоска растут. Приближаем глаз до тех пор, пока яркое изображение не заполнит всю поверхность зеркала. Это означает, что изображение волоска оказалось на хрусталике глаза и все без исключения лучи, отраженные зеркалом, собираются в глазу. Вообще же волосок лампочки — слишком грубый объект для таких испытаний. Поэтому продолжим усовершенствование искусственной звезды. Сделаем к нашей трубке с лампочкой крышку с отверстием около 1—1,5 мм в диаметре (рис. 44 слева). С внутренней стороны приклеим к крышке кусочек фольги, в котором иглой проткнем крошечное отверстие диаметром примерно 0,1—0,3 мм. Чтобы отверстие не получилось слишком большим, положим кусочек фольги на стекло и прикоснемся к ней иглой. Сняв крышку мы работаем с волоском лампы, надев ее — со «звездой».

Много времени, особенно у начинающих, тратится на то, чтобы поймать глазом изображение искусственной звезды и добиться того, чтобы вся поверхность зеркала была равно-

мерно залита светом. Мне хорошо известно, что многие начинающие любители настолько изматываются поисками «звезды», что на собственно испытания ножом Фуко у них не остается сил. Здесь я хочу обратить внимание на то, что испытания без помощи ножа совершенно бессмысленны.

Мы ввели в традиционную схему Фуко «звезду» со съемной крышкой и белый вертикальный экран с отверстием, чтобы значительно облегчить поиски изображения «звезды».

Кстати говоря, нож Фуко можно крепить прямо на отверстии, чтобы он делил его пополам, как показано на рисунке. Тогда работа еще больше упростится.

§ 23. ТЕНЕВОЕ ИСПЫТАНИЕ

Поймав зрачком изображение волоска лампочки, надеваем крышку со «звездой» и, добившись того, чтобы все зеркало было залито светом, вводим лезвие ножа в пучок света, держа нож в 1—4 см от глаза и без напряжения глядя на зеркало, но не на нож!

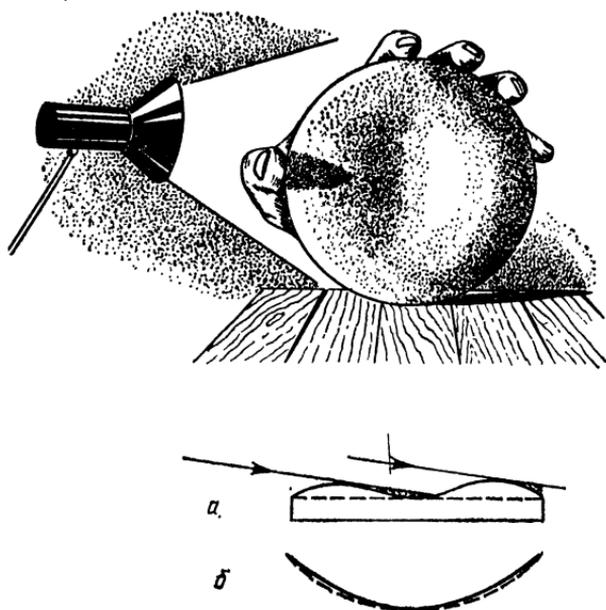


Рис. 45. Чтение теневой картины. При введении ножа справа зеркало имеет такой теневой рельеф, как если бы оно было освещено косыми лучами лампы, расположенной слева. Ниже показаны видимый рельеф (а) и действительная фигура зеркала (б), Кривизны сильно преувеличены

Договоримся, что всегда будем вводить нож справа налево, хотя в большинстве руководств предлагается вводить его с обратной стороны. Мы отступаем от этого потому, что

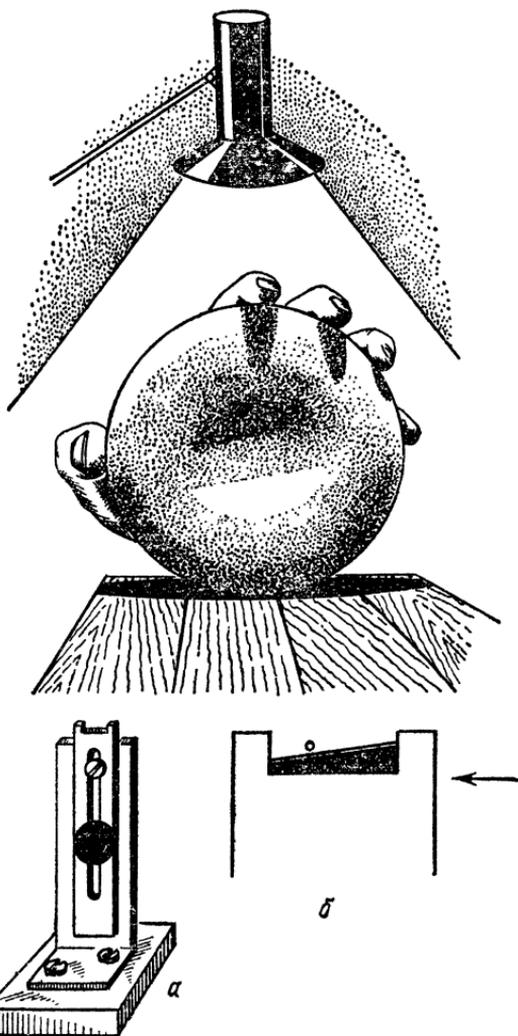


Рис. 46. Теневой рельеф и теневая картина при горизонтальном расположении ножа: *а* — стойка ножа с грубым вертикальным перемещением, *б* — для тонкого перемещения по вертикали чуть косо установленное лезвие перемещается горизонтально

в противном случае при наблюдении правым глазом мешает нос и очень трудно разместить глаз близко к лезвию. Сам Л. Фуко вводил нож также справа налево, о чем можно

судить по рисункам теневых картин, которые остались после его смерти [30]. Д. Д. Максудов, судя по конструкции теневого прибора, описанного в его монографии [3], также предпочитал движение ножа в этом направлении. Сейчас нам важно это для того, чтобы в дальнейшем специально не оговаривать направление движения ножа.

Рассмотрим снова теньевую картину зеркала с завалом на краю и с ямой в центре. Кстати говоря, это одна из самых распространенных ошибок поверхности зеркала. Представим на минутку, что перед нами не кусок стекла, а гипсовая модель рельефа, которую освещает сбоку косым светом настольная лампа. Лампа расположена всегда так, что ее свет направлен на зеркало-модель навстречу движению ножа (рис. 45 и 46). Поскольку мы условились, что нож всегда движется справа налево, воображаемая лампа всегда будет освещать воображаемую гипсовую модель слева. Нетрудно видеть, что зеркало имеет именно яму (а не бугор) в центре и заваленный край.

Легко догадаться, что если на таком зеркале спланировать валик, напоминающий бублик, то мы получим совершенно одинаковые радиусы кривизны и фокусные расстояния для всех зон, и теневой рельеф превратится в «плоский».

Каким бы ни был рельеф в начале испытания, наша задача превратить его в плоский. А все «валики» и «бугры» означают, что в данной зоне радиус кривизны больше некоторого среднего, «ямы» же и «канавы» показывают, что здесь радиус кривизны короче.

Особое внимание нужно обратить на то, что чувствительность метода максимальна только в том случае, когда нож расположен вблизи центра кривизны зеркала, когда точки схождения лучей от одних зон ближе ножа, а от других — дальше. В этом случае на части зон тень надвигается навстречу ножу, на других зонах — в том же направлении,

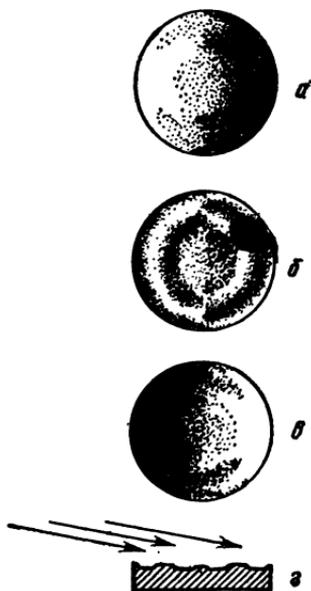


Рис. 47. Изменение теневой картины при перемещении ножа вдоль оси зеркала: а — предфокальное положение, б — положение вблизи фокуса, в — зафокальное положение ножа

что и нож. Только в таком положении теневой метод имеет ту чувствительность, о которой мы говорили.

Чтобы быть уверенным в том, что нож находится именно там, где надо, поступим следующим образом. Сначала поместим нож в предфокальном положении для всех зон, так что на всех зонах тень будет двигаться в том же направлении, что и нож (рис. 47, *а*). Не выводя ножа из пучка лучей, или, что все равно, не теряя тени ножа на зеркале, начнем отодвигать нож от зеркала. Граница тени будет становиться все менее резкой, и при малейшем поперечном движении

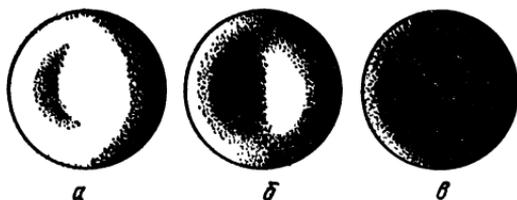


Рис. 48. Изменение теневой картины при перемещении ножа поперек оси зеркала: *а* — нож коснулся пучка света, *б* — нож в наиболее выгодном положении на оси зеркала, *в* — нож перекрыл основную часть пучка

она будет сходиться с зеркалом. Это и понятно: по мере того как нож приближается к вершине конуса лучей, поперечное сечение конуса становится все меньше и меньше, и нож очень легко выходит за его пределы. Отведем нож еще дальше от зеркала, пока тень не окажется на всех зонах на противоположной стороне зеркала. Теперь при поперечном движении ножа она движется навстречу ножу (рис. 47, *в*). Это значит, что нож оказался дальше фокусов всех зон.

Начнем снова приближать нож к зеркалу. Тень становится все более нерезкой, ее граница — полутень — заполняет всё большую площадь. Наконец, мы увидим, что полутень разбежалась по некоторым зонам, тогда как тень заполнила другие зоны (рис. 47, *б*).

При поперечном движении ножа теневая картина немного меняется (рис. 48). Поэтому, чтобы добиться наиболее верного представления о теневой картине, а заодно добиться максимальной чувствительности, будем стараться, чтобы суммарная площадь тени,двигающейся в том же направлении что и нож, приблизительно равнялась площади теней, движущихся навстречу ножу (рис. 48, *б*).

Когда нож находится вблизи точки фокуса, он пересекает очень тонкий пучок света. Сечение пучка становится все меньше по мере того, как поверхность зеркала прибли-

жается к сфере. Чтобы сделать введение ножа в пучок света более плавным, иногда достаточно нажимать на край основания теневого прибора. В результате нож чуть-чуть наклонится в ту же сторону и плавно войдет в пучок.

§ 24. ФИГУРИЗАЦИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Приступаем к безусловно самой интересной части изготовления астрономического зеркала: фигуризации — приданию его поверхности строго сферической формы с точностью, о которой не раз говорили. Именно сейчас мы сможем продемонстрировать, на что способен оптик в сравнении с рабочим, обрабатывающим металл. Сейчас мы постараемся получить (и наверняка получим) точность не ниже 0,05 мкм, а может быть, и выше.

Есть много факторов, влияющих в ходе полировки на форму зеркала. Это длина штриха, его форма, скорость перемещения зеркала по поверхности полировальника, неоднородность смолы, наличие ямок на поверхности смолы; это и специальные методы воздействия на форму зеркала — подрезка, формовка полировальника и др. Результаты большинства этих методов трудно воспроизводимы. Получив однажды хороший результат, мы не сможем его получить во второй раз, как бы ни старались. Наиболее разумный способ управлять процессом — свести к минимуму число непостоянных факторов, оставив 2—3, которыми пользоваться всегда, и получить максимальный опыт их применения. Остальные факторы должны оставаться неизменными на протяжении всего процесса фигуризации.

Рассмотрим основные из этих факторов.

Форма штриха — лучше прямолинейная с центральным положением полировальника в начале штриха. Криволинейный штрих приводит к завалу края. Штрих по хорде также приводит к завалу. Длина штриха должна составлять около $1/3$ диаметра зеркала при смещении всегда в одну сторону. Увеличенный штрих приводит к завалу на краю, укороченный — к подвернутому краю. Так как исправление завала гораздо сложнее, чем подвернутого края, многие любители при полировке переходят на штрих около $1/4$ диаметра.

Большую роль играет твердость смолы. Твердость зависит от содержания канифоли и от рабочей температуры полировальника. Слишком мягкая смола полирует быстрее, но на ней легко возникает завал края. Твердая смола позво-

ляет быстрее получить сферу, но вероятность царапин при полировке твердой смолой возрастет.

Неоднородность смолы приводит к появлению зональных ошибок в виде «валиков» и «канав». Неоднородность может быть результатом плохого перемешивания смолы во время варки или в результате неравномерного нагрева во время работы. Обычно крайние зоны разогреваются сильнее центральных и слегка «проседают».

Такой фактор, как неоднородность поверхности полировальника, появляется, например, во время его формовки, когда смола слишком размягчена и крошечные пузырьки воздуха, оказавшиеся между зеркалом и полировальником, выдавливают на поверхности смолы ямки, которые в дальнейшем довольно трудно устранить *). Еще одна неприятность может возникнуть, если канавки на поверхности полировальника расположены симметрично относительно центра полировальника. Это приводит к тому, что на одних зонах сполировывание идет быстро, на других медленно. В результате появляются зональные ошибки.

На форму зеркала воздействуем следующими способами:

1. Обнаружив на зеркале во время теневых испытаний «яму» или «канавку», отмечаем соответствующую зону на полировальнике и «ослабляем» ее, соскоблив небольшие участки смолы вдоль этой зоны. Эта процедура называется «подрезкой» полировальника (рис. 49, *г* — 2, 4, 6, 7, 8, 10). Глубина соскобленных участков — около 0,5 мм. Продолжим полировку. Очевидно, что ослабленные зоны полировальника будут полировать медленнее, поэтому остальные зоны опустятся до уровня «дна канавки». Полируя на подрезанном полировальнике, надо контролировать поверхность на теневом приборе каждые 10—15 минут, так как подрезка — средство довольно сильное. Незадолго до полного исчезновения канавки заново отформируем полировальник, помня, что после устранения подрезки полировальник некоторое время продолжает «по инерции» работать в том же режиме.

Можно поступить иначе. Вырезать из ватмана кольцо того же диаметра и несколько меньшей ширины, что и «канавка». Разогреть полировальник в теплой воде, уложить на него смоченное водой кольцо и отформовать все вместе (рис. 49, *д* — 2, 4, 6, 7, 8, 10). На поверхности полироваль-

*) Для того чтобы устранить ямки, рассыпанные на поверхности полировальника, отформируем полировальник с куском тюля, как это описано в § 19. В ходе полировки сетка мелких канавок запылет.

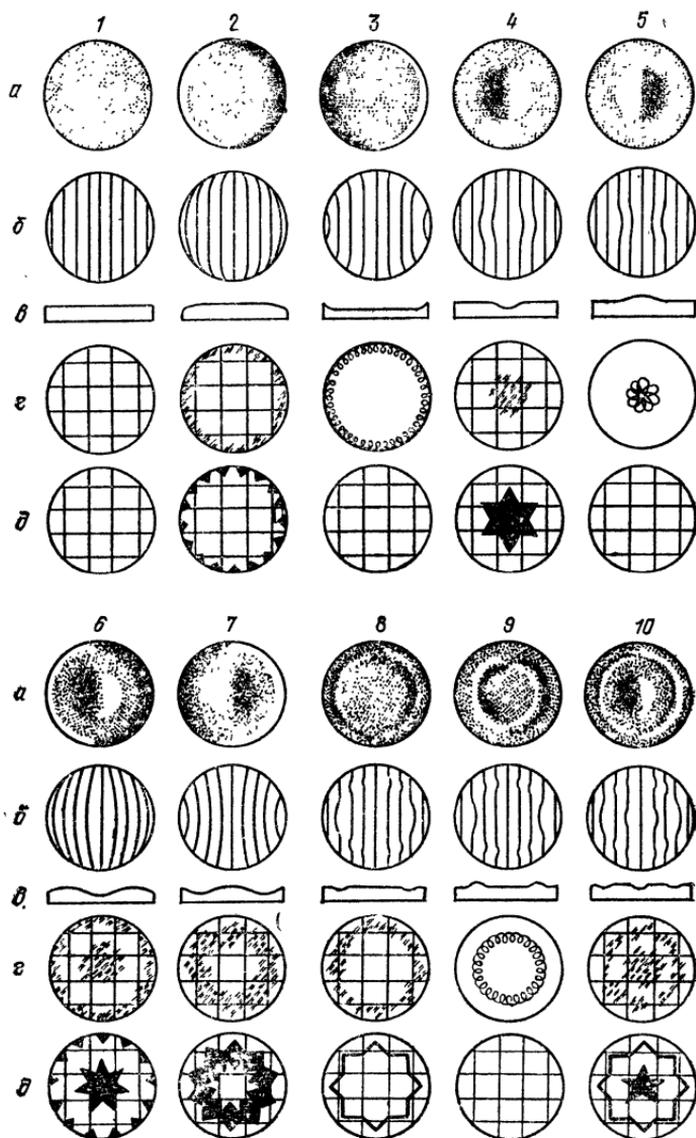


Рис. 49. Зональные ошибки зеркала и способы их устранения: *а* — теневая картина Фуко, *б* — теневая картина Ронки, *в* — теневой рельеф, *г* — подрезка полировальника и местная ретушь, *д* — специальная формовка полировальника. 1 — идеальная сфера с «плоским» рельефом, 2 — завал края, 3 — подвернутый край, 4 — яма в центре, 5 — бугор в центре, 6 — яма в центре и завал края, 7 — подвернутый край и бугор в центре, 8 — канавка, 9 — валик, 10 — яма в центре и канавка

ника появится углубление, которое не будет полировать вообще. Особенно хорошо так устраняются яма в центре и завал на краю. Незадолго до полного исчезновения канавки заново формуем полировальный зеркалом.

2. В тех случаях, когда мы имеем дело с «буграми» и «валиками», лучше применить местную ретушь — сполировывание бугра маленьким полировальником. Этот полировальник может быть куском металла или пластмассы, на которую наклеен кусочек фетра, войлока, твердой резины или кожи. Диаметр полировальника должен составлять $1/2$ — $1/3$ ширины «валика». В простейшем случае это может быть просто палец. Смачиваем поверхность зеркала вдоль валика, набираем на палец полирит или смазываем полиритом полировальник и начинаем петлеобразными движениями полировать с большим давлением (рис. 28, *г* — 3, 5, 9). Важно ни в коем случае не выходить за пределы зоны, которую мы полируем. Ретушь идет быстро. Опасность сполировать больше, чем надо, очень велика. Поэтому зеркало надо контролировать во время местной ретуши каждые 1—3 минуты, если ретушируется центральный валик или зона небольшого диаметра, и каждые 3—5 минут при сполировывании зоны на краю.

Вместо высокого валика после ретуши получается масса мелких местных ошибок на протяжении всей зоны. По абсолютной величине они гораздо мельче валика. Чтобы их устранить, продолжим полировку на смоляном полировальнике, предварительно отформовав его заново.

Если зеркало имеет большое число (3—6) зональных ошибок, можно применить полировку по хорде ($1/4$ диаметра от центра). Такая полировка ведет к быстрому сполировыванию зональных ошибок, но чревата возникновением завала на краю. Поэтому после 3—5 минут полировки по хорде возвращаемся на 15—30 минут к полировке через центр, проверяя после каждого сеанса полировки по хорде зеркало на теневом приборе и обращая большое внимание на край зеркала.

Так как завал края возникает почти при любом нарушении режима полировки, предусмотрим небольшую, но надежную меру для его предупреждения. На зоне примерно в 3—5 мм шириной на самом краю полировальника резко расширим канавки, ослабив на этой зоне полировальник (рис. 49, *д* — 2). После этого возможно появление подвернутого края, но эта ошибка устраняется очень легко простым увеличением длины штриха. До возникновения подвернутого края полируем обычным образом.

§ 25. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ФИГУРИЗАЦИИ И ТЕНЕВЫМ ИСПЫТАНИЯМ

Процесс фигуризации и теневых испытаний трудно разделить на составляющие — это единый творческий процесс, где решающую роль часто играют не только знания, но и интуиция. Вообще, это занятие настолько интересно само по себе, что автор, например, часто не торопится с окончанием, пробуя работать и так и этак, находя большое удовольствие в процессе фигуризации, хотя, спору нет, вид совершенно плоской теневой картины — зрелище потрясающее.

В процессе полировки, по словам Дж. Маттьюсона [22], «всегда есть элемент мистики». Отчасти это объясняется тем, что процесс полировки во многом недостаточно изучен, но отчасти и тем, что мастеру самому часто хочется немного мистики, когда фигуризация перестает быть просто технологией, а становится в значительной степени искусством. Не зря Д. Д. Максудов говорил [3], что оптик предпочитает «колдовать» над самодельной смолой полировальника, не доверяя заводской смоле. (Правда, если вам представится возможность приобрести заводскую полировальную смолу, надо это сделать). Нередко успех дела решает творческий порыв, и чтобы для творчества оставалось побольше времени, надо предупредить причины, которые явно приводят к неприятностям.

Вибрацию зеркала и теневого прибора от проходящего по улице транспорта и ходьбы по комнате можно в значительной мере снизить, если и зеркало, и теневой прибор будут установлены на «оптической скамье». Это может быть толстая доска длиной, немного более радиуса кривизны зеркала. Еще лучше, если это будет короб из относительно тонких (10—15 мм) досок. Конечно, такое приспособление трудно держать в квартире, но кружок телескопостроения просто обязан иметь хорошую оптическую скамью. Надо сказать, что вредны не вообще вибрации, а вибрации теневого прибора относительно зеркала. Их-то и можно в значительной степени снизить, применив единое основание.

Турбулентция — вихреобразные движения воздуха также сильно мешают, затушевывая подлинную теневую картину. Можно проделать такой опыт: на фоне хорошего сферического зеркала поместить руку. Глядя на нее с помощью прибора Фуко, мы легко увидим струи теплого воздуха, которые поднимаются над черным силуэтом руки. Надо постараться разместить всю установку в стороне от отопи-

тельных батарей, окон и другие источников воздушных потоков. Если это сделать трудно, можно пучок лучей поместить в подходящую трубу, закрытый короб или под одеяло, повешенное на две рейки.

В ходе полировки зеркало нагревается неравномерно. Это служит источником других ошибок. После окончания очередного сеанса полировки перед началом теневых испытаний надо дать зеркалу «отстояться», чтобы вся его масса приняла температуру окружающего воздуха. 150-миллиметровое зеркало требует примерно пятиминутной отстойки. На последней стадии полировки 300-миллиметровое зеркало толщиной 35 мм отстаивалось у автора 15—20 минут.

Так как поверхностная яркость теневой картины невелика, испытания надо проводить в темноте. Однако полная темнота нежелательна, поэтому надо позаботиться о слабом освещении, которое позволило бы легко ориентироваться, но не мешало бы чтению теневых картин.

Дифракционные отклонения лучей на краю зеркала могут быть приняты за завал на краю. В действительности эта узкая (2—3 мм) светлая полоска — проявление волновой природы света. Она видна и на светлой и на теневой сторонах зеркала и этим отличается от завала. Впрочем, если она видна только с одной стороны, можно установить на фоне зеркала карандаш параллельно ножу и, рассматривая дифракцию на краю карандаша и сравнивая ее со светлой полоской на краю зеркала, решить, что же это в действительности.

Итак, мы изложили достаточно сведений для того, чтобы читатель мог самостоятельно изготовить сферическое зеркало для своего телескопа. Если на зеркале виден совершенно плоский рельеф — зеркало первоклассное, если едва заметные признаки теневого рельефа — оно также первоклассное. Мы помним, что при предфокальном и зафокальном положениях ножа тень на зеркале располагается с одной стороны зеркала, справа или слева. В промежутке между этими положениями на зеркале виден теневой рельеф. Назовем положение ножа, когда он из предфокального положения переходит в положение, при котором на зеркале становится виден теневой рельеф, критическим предфокальным положением ножа, а аналогичное положение ножа между зафокальным положением и положением, когда появляется теневой рельеф, — критическим зафокальным положением. Рис. 50 показывает серию теневых картин, на которой видно постепенное изменение теневого рельефа по

мере продвижения ножа вдоль оптической оси. Критические положения ножа — *a* и *д*. Назовем отрезок оптической оси между критическими положениями ножа продольной абберрацией зеркала. Эта абберрация вызвана ошибками

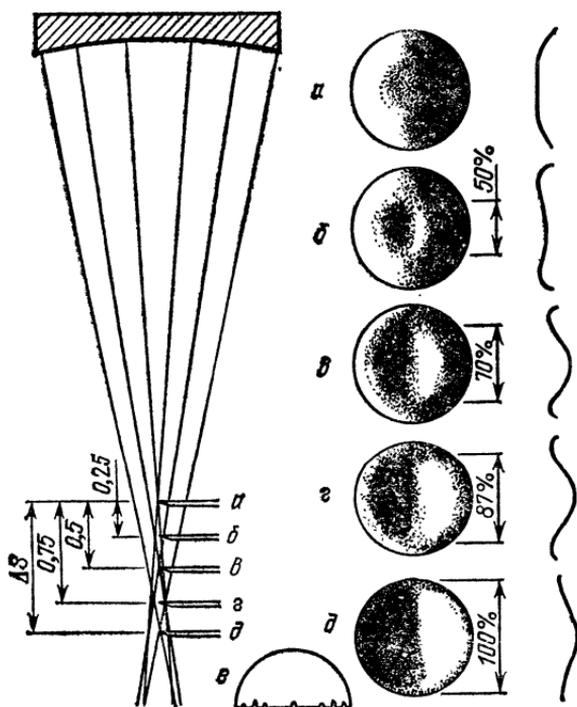


Рис. 50. Испытания параболического зеркала по зонам: *a* — нож в центре кривизны центральной зоны зеркала, *б* — нож перемещен на 25 % от величины продольной абберрации зеркала, диаметр полутени равен 0,5 диаметра зеркала, *в* — нож перемещен на 50 % продольной абберрации зеркала, диаметр полутени на зеркале равен 0,7 диаметра зеркала, *г* — нож перемещен на 75 % величины продольной абберрации, диаметр полутени равен 0,87 диаметра зеркала, *д* — нож в центре кривизны крайней зоны, полутень на краю зеркала, *е* — маска из проволоки, надеваемая на зеркало для его разметки на зоны. Справа рельефы одного и того же параболического зеркала при различных положениях ножа

зеркала. На практике это означает, что когда мы осторожно перемещаем нож вдоль оптической оси, например, удаляя от зеркала, и при этом проходим оба критических положения, то длина перемещения ножа, когда тень ножа справа полностью переместится на левую часть зеркала,

и есть продольная абберрация зеркала. Если продольная абберрация сферического зеркала в силу наличия зональных ошибок равна для 150—180-миллиметрового зеркала 1,5—2 мм, то зеркало можно считать вполне хорошим. Правда, надо уточнить, что в этом случае допускаются ошибки в сторону завала края, но не в сторону подвернутого края. Также важно отметить, что зеркало должно обязательно иметь плавную форму без резко выраженных зон и «переломов».

§ 26. ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО

Параболоид имеет в центре бóльшую кривизну, чем на краях. Его центр «опущен» на величину $\delta = D/1024 \nu^3 = y^4/8R^3$. Во время параболизации нужно центр сферы «опустить» на эту величину. Однако прежде чем начинать параболизацию, совершенно необходимо получить хорошую сферу. Только тогда сама параболизация при относительных отверстиях 1/7—1/6 займет сравнительно немного времени.

При испытании теньвым прибором, когда «звезда» и нож расположены в центре кривизны, теневая картина для параболоида должна иметь такой же вид, как для зеркала с завалом на краю (см. рис. 50, в). Этот завал — не любой, а совершенно точно рассчитанный. Разница положений центров кривизны центральной и других зон равна

$$\Delta s = \frac{D^2}{4R},$$

где D — диаметр зоны в миллиметрах, а R — радиус кривизны. Максимальная разница положений фокусов будет для центральной и крайней зон. Тогда D — это диаметр зеркала. Для нашего зеркала D и R равны 150 и 2400 мм соответственно. Продольная абберрация Δs этого параболоида при испытании из центра кривизны равна 2,3 мм. В предфокальном критическом положении ножа на теневой картине виден «бугор» с плоской вершиной — правую часть занимает на всех зонах тень, а на центральной зоне полутень. По мере передвижения ножа дальше от зеркала становится виден завал, напоминающий бублик. Этот «бублик» лучше всего виден, когда нож находится между двумя критическими положениями, точно посередине. Его «вершина» явно смещена со средних зон ближе к краю зеркала. Расчеты показывают, что при положении ножа точно посередине между критическими положениями «вершина» «бублика» находится на расстоянии 0,7 радиуса заготовки зеркала, в

нашем случае для 150-миллиметрового зеркала «вершина» расположена на расстоянии 53 мм от его центра. Наконец, когда нож подойдет к зафокальному критическому положению, вся тень, кроме ободка полутени, на краю зеркала, займет положение на левой стороне зеркала.

Если нам удастся искусственно исказить плоский рельеф так, чтобы он принял форму плавного без «переломов» (резко выраженных зон) «бублика», то это будет означать, что нам удалось из сферы получить параболюид. Еще раз напомним, что не любой завал, а только плавный «бублик» с «вершиной» на расстоянии 0,7 радиуса от центра заготовки зеркала и с заданной продольной аберацией и есть параболюид.

Чтобы получить плавную яму в центре и «опустить» края, надо увеличить кривизну в центре зеркала, чтобы она постепенно уменьшалась при переходе от центра к краю (рис. 50). Для того чтобы получить такую ямку, есть несколько способов.

1. Найдем квадратик на полировальнике, центр которого лежит примерно на зоне 0,7. Соскобим его на толщину 0,5 мм. Каждые 10 минут контролируем зеркало на теневом приборе (рис. 51, а).

2. Расширим канавки на краю, но оставим их нетронутыми в центре до зоны 0,3, как показано на рис. 51, б. Каждые 10 минут контролируем зеркало.

3. Соскобим тонкий слой (0,5 мм) смолы небольшими участками в среднем по 1—2 см² с таким расчетом, чтобы полировальник более всего оказался ослабленным на зоне 0,7. В центральной зоне и на самой крайней зоне оставляем полировальник нетронутым (рис. 51, в). Полируем на подрезанном полировальнике и контролируем зеркало теневым прибором каждые 15 минут.

4. В бумажном круге, наружный диаметр которого на 15—20 мм больше диаметра полировальника, вырежем звезду, как показано на рис. 51, г. Смочим круг водой и наложим на подогретый в воде полировальник. После этого формуют полировальник зеркалом, положив зеркало на смолу, а на зеркало груз. После 3—5 минут такой формовки снимаем груз и в течение 5—10 минут «полируем» без полирита, не снимая круга. После этого на поверхности полировальника остается выдавленная звезда. Она и сделает плавное углубление в центре зеркала.

С помощью полировальников «а» и «в» (рис. 51) одновременно опускаются центр и края. Это более экономичный способ. К сожалению, так можно параболизировать только

зеркала с небольшим относительным отверстием ($1/6—1/7$). Более короткофокусные зеркала придется параболизировать на полировальниках «б» или «г».

При полировке на подрезанном или отформованном полировальнике возможны мелкие зональные ошибки. Если

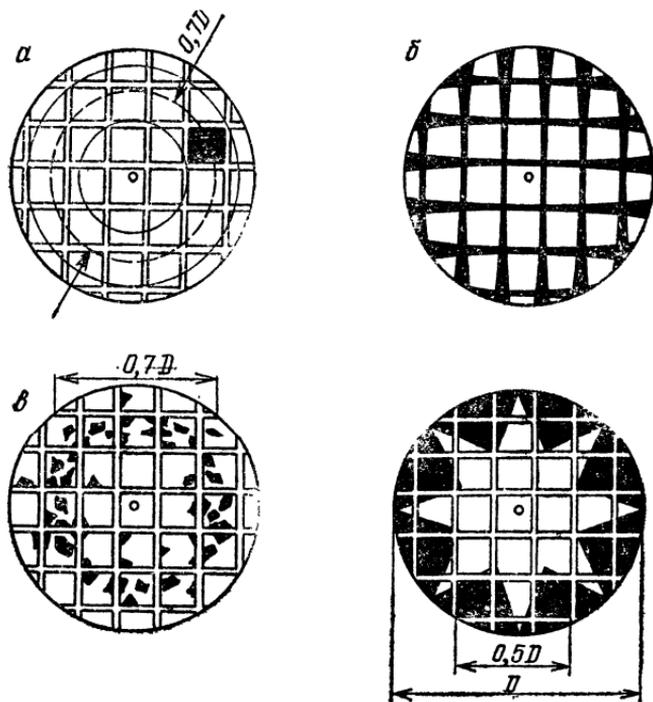


Рис. 51. Способы подготовки полировальника для параболизации: а — подрезка одного квадратика на зоне 70 % диаметра, б — расширение канавок к краю, в — подрезка 70 %-й зоны, г — формовка звезды

это «валик», сполируем его местной ретушью, а потом на полном смоляном уберем случайные местные ошибки. Если зона представляет собой «канавку», увеличим подрезку этой зоны на полировальнике.

Исследуя зеркало с помощью теневого прибора, надо тщательно следить за краем, так как сейчас легко просмотреть непредусмотренный завал края, который выглядит узкой полоской, где резко увеличен радиус кривизны. Для того, чтобы его предупредить, расширим канавки на крайней зоне до ширины 3—5 мм, как указывалось раньше.

Трудность фигуризации параболидаального зеркала пропорциональна его асферичности, которая в свою очередь

пропорциональна диаметру зеркала и кубу относительного отверстия. Зеркало диаметром 300 мм с относительным отверстием 1/6 имеет вдвое большую асферичность, чем 150-миллиметровое зеркало того же относительного отверстия. Любое зеркало с относительным отверстием, например, 1/3 будет иметь асферичность в 8 раз больше, чем при относительном отверстии 1/6.

Но кроме самой величины асферичности важно еще и то, как она распределена на единице радиуса зеркала. Если асферичность двух зеркал одинакова, то труднее получить ее на зеркале меньшего диаметра. Дело в том, что смола за время одного штриха не успевает принять форму зеркала и стремится сгладить его до сферы. При фигуризации 250-миллиметрового гиперболического зеркала с относительным отверстием 1/2 автор ретушировал малыми полировальщиками, но при попытке перейти на полировальник полного размера (даже сильно подрезанного) зеркало немедленно теряло приобретенную асферичность. Во время машинной обработки приходится изменить соотношение числа штрихов к скорости вращения шпинделя: размахи поводка сделать медленными, а вращение шпинделя быстрым. Иногда при особенно большой асферичности полезно закрепить полировальник шнурком так, чтобы он не вращался, а совершал только качательные движения (см. § 6 главы четвертой).

§ 27. КОНТРОЛЬ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ПО ЗОНАМ

Если в центре кривизны центральной зоны параболического зеркала поместить «звезду» или щель и с помощью ножа получить теньевую картину всего зеркала, она уже не будет «плоским рельефом». Для небольших зеркал с малым относительным отверстием достаточно испытать его из центра кривизны центральной зоны и центра кривизны края зеркала и, установив нож точно посередине между этими центрами, убедиться в том, что «вершина» «бублика» лежит на зоне 70 % радиуса заготовки зеркала (см. рис. 50а, в, д).

Вычислив aberrацию параболического зеркала при испытаниях из центра кривизны по формуле $\Delta S = \frac{D^2}{4R} = \frac{y^2}{R}$ для теневого прибора с неподвижным источником света (рис. 44) или по формуле $\Delta S = \frac{D^2}{8R} = \frac{y^2}{2R}$ для подвижного источника (рис. 52) и разделив эту aberrацию пополам,

Таблица 10

Замеры продольных aberrаций для зеркала $D=250$, $f'=1000$ мм

Зона	Вычисленное значение	Реальные aberrации			Средне-арифметическое	Разница вычисленных и средних aberrаций
0	0	0	0	0	0	
51	0,65	0,62	0,64	0,66	0,64	0,01
72	1,30	1,10	1,27	1,23	1,20	0,10
88	1,95	1,72	1,76	1,74	1,74	0,21
102	2,60	2,16	2,21	2,23	2,20	0,40
114	3,25	2,90	2,72	2,82	2,82	0,43
125	3,90	3,23	3,18	3,19	3,20	0,70

мы можем начинать испытания. С большими зеркалами процедура измерений усложняется, так как недостаточно промера aberrаций только по трем зонам.

Рассмотрим конкретный пример. Испытывается зеркало диаметром 250 мм с относительным отверстием $1/4$. Его фокусное расстояние равно 1000 мм, а радиус кривизны 2000 мм. Продольная aberrация $\Delta S = 250^2/16 \cdot 1000 = 3,9$ мм. Разметим зеркало на зоны с таким расчетом, чтобы продольные aberrации каждой зоны отличались на одну и ту же величину. Можно разбить продольную aberrацию на шесть равных отрезков: 0,65, 1,30, 1,95, 2,60, 3,25, 3,90 мм. Чтобы найти радиусы зон, которым соответствуют эти aberrации, воспользуемся формулой $y = \sqrt{2Rx}$, где x — отрезок продольной aberrации. Получим $y_1 = 51$ мм, $y_2 = 72$ мм, $y_3 = 88$ мм, $y_4 = 102$ мм, $y_5 = 114$ мм, $y_6 = 125$ мм. Проволочную маску для зеркала рис. 50,е сделаем с учетом этих радиусов зон.

Теперь установим нож с таким расчетом, чтобы центральная часть зеркала покрылась полутенью. К сожалению, невозможно точно определить границы полутени в центре зеркала. Поэтому сразу установим нож так, чтобы полутень расположилась на зоне с радиусом 51 мм. Теперь осторожно отодвинем нож до тех пор, пока полутень не расположится на зоне с радиусом 72 мм и запишем показание индикатора. Скорее всего оно не будет равно вычисленному. Так, проходя полутенью по всем зонам, запишем в табличку реальные значения продольных aberrаций.

Рассмотрим конкретный пример промера aberrаций 250-миллиметрового параболоида (табл. 10).

После окончания первого ряда промеров чуть сместим теневой прибор вдоль оси зеркала и снова промерим аберрации. Ясно, что показания индикатора сами по себе еще не равны аберрациям, и мы должны брать разность двух замеров. После проведения трех-пяти проходов ножа вдоль оси вычислим среднеарифметическое для каждого значения аберрации двух соседних зон, чтобы повысить точность промеров.

Подобным образом испытывается любое вогнутое зеркало любого диаметра и относительного отверстия.

Во время промеров постоянно надо помнить, что нож стоит в центре кривизны зоны, на которой видна полутень. Получив значения аберраций, проанализируем разницу между вычисленными и реальными значениями (см. последнюю колонку таблицы). Ясно, что если аберрация меньше вычисленных на этой зоне, нужно углубить зеркало и тем самым увеличить кривизну. Если аберрации больше вычисленных, кривизну нужно уменьшить или «приподнять» зону. Однако в действительности приподнять зону во время полировки нельзя, поэтому придется опустить остальную поверхность кроме этой зоны. Именно поэтому «ямы» и «канавы» на зеркале неприятнее «бугров» и «валиков».

С какой точностью нужно делать замеры продольных аберраций? Это зависит от нескольких причин и в первую очередь от той точности, с которой мы сможем измерять перемещение ножа вдоль оси, радиусы зон на зеркале с помощью маски. Посмотрим, как будет зависеть предельно малое относительное фокусное расстояние зеркала от этих величин. Для этого воспользуемся готовыми формулами,

заимствованными из статьи А. С. Мажуга [32]: $V_1 = \sqrt{\frac{\Delta x}{64\delta}}$

и $V_2 = \sqrt[3]{\frac{\Delta y}{256\delta}}$, где δ — погрешность поверхности зеркала, равная $\lambda/8$ или 0,00007 мм. Тогда погрешность в измерении перемещения ножа $\Delta x = 0,01$ мм еще допустима при исследовании зеркал с относительным фокусным расстоянием $V_1 = 2,23$, но не меньше. А погрешность в измерении радиуса зон с помощью маски в 1 мм позволит исследовать зеркала с относительным фокусным расстоянием $V_2 = 3,8$.

Здесь важно заметить, что многократные промеры одной и той же аберрации и нахождение среднего арифметического позволит повысить точность измерений Δx и Δy по крайней мере вдвое, а это значит, что можно исследо-

вать зеркала с относительными отверстиями $1/1,6$ и $1/3,0$. Таким образом все зеркала с относительными фокусными расстояниями больше указанных могут исследоваться обычными любительскими средствами. Но нужно добавить и то, что со временем любитель, приобретая опыт, может по нюансам теневой картины, по тому, насколько плавно перемещается полутень по зеркалу, судить о форме поверхности еще глубже, чем механическое суждение на основании промеров. Это еще несколько повысит точность измерений. Интуиция опытного мастера в самых сложных случаях может сыграть решающую роль.

Отступление параболоида от сферы на $1/8$ длины волны света еще не сказывается заметно на качестве изображения. Это значит, что в предыдущем примере мы можем центральную часть до определенной зоны вообще не фигурировать. Эта зона имеет радиус $y = \sqrt[4]{0,018 f^3}$, если $\lambda = 0,00056$ мм. Тогда у 250-миллиметрового зеркала центральная часть до зоны $y = 65$ мм (диаметр этой части зеркала 130 мм) может не параболизироваться. Оставшиеся 60 мм по радиусу заготовки нужно параболизировать, но на величину $\Delta S - \Delta S'$, где $\Delta S'$ — значение вычисленной заранее аберрации. В нашем примере разница в продольной аберрации между зоной 65 мм и краем зеркала составляет $3,9 - 1,06 = 2,84$.

§ 28. КАК УСОВЕРШЕНСТВОВАТЬ ТЕНЕВОЙ ПРИБОР?

Для того, чтобы максимально повысить чувствительность теневого прибора, нужно его отверстие уменьшить до размеров дифракционной точки. Ее диаметр, как мы помним, равен $2,44\lambda f$. Так как испытания ведутся из центра кривизны зеркала, то относительное фокусное расстояние нужно удвоить, тогда $d = 4,88\lambda f$. Для волны длиной 0,00056 мм диаметр отверстия должен быть не больше чем $0,003f$. Так, для зеркала с относительным отверстием $1/4$ диаметр отверстия должен быть порядка 0,01 мм, для относительного отверстия $1/8$ диаметр «звезды» можно увеличить до 0,025 мм. Все это очень малые отверстия, и яркость теневой картины мала. В 1918 г. Г. Ричи, а позже независимо от него Д. Д. Максудов предложили точку заменить щелью, ширина которой та же, что и у точки, а длина 2—4 мм. Яркость теневой картины возрастает в несколько десятков раз, а точность измерений остается той же и даже повышается благодаря удобным условиям наблюдений. Край ножа в этом случае должен

быть строго параллельным щели в двух плоскостях: перпендикулярной оптической оси и параллельной этой оси. Так как это сделать непросто, щель и нож обычно устанавливают на одном движущемся основании и фиксируют друг относительно друга.

Если источник света (точка или щель) смещен с оптической оси при испытаниях, то его изображение отягчено комой, и это скажется на теневой картине. Роберт Мейджи рассчитал [29] максимальные расстояния между щелью и ножом, при которых влияние комы еще не сказывается (см. табл. 16). Из таблицы видно, что чем больше относительное отверстие зеркала, тем меньше должно быть расстояние между источником и ножом. Для испытаний светосильных зеркал щель и нож нужно обязательно устанавливать на едином основании. В этом случае при мере продольных аберраций нож движется навстречу изображению щели, и поэтому в формуле продольной аберрации знаменатель приходится удвоить, $\Delta S = \frac{D^2}{8R} = \frac{y^2}{2R}$.

В идеале расстояние между ножом и щелью должно быть равно нулю. В новосибирском клубе им. Д. Д. Максудова построен такой прибор (рис. 52). Здесь свет 6-вольтовой лампы фокусируется с помощью простого конденсора на край лезвия ножа (лезвие бритвы), установленное под углом 45° к оси. Этот край одновременно служит одной из щечек щели. Вторая щечка — также лезвие бритвы. Оба лезвия прижимаются двумя металлическими пластинками с помощью винтов. После регулирования ширины щели винты фиксируют лезвия (рис. 53).

В ряде случаев, о которых будет рассказано дальше, нужно еще больше повысить яркость теневой картины. Тогда можно резко увеличить ширину до 1—2 мм, и яркость картины возрастет во много раз. Возникающие полутона теневой картины в этом случае в точности соответствуют истинному профилю фигуры зеркала со всеми нюансами. Если теневую картину спроецировать на экран, установленный в 50—100 мм позади ножа, то можно с помощью небольшого фоторезистора с гальванометром профотометрировать теневую картину вдоль диаметра, перпендикулярного краю ножа, и график освещенности будет в точности повторять рельеф зеркала.

Как упадет чувствительность теневого метода при замене дифракционной щели на широкую? Д. Д. Максудов по этому поводу писал [3]: «Прежде [до 1939—1940 г.] я считал, что чувствительность теневого метода, если не

пропорциональна, то во всяком случае в значительной мере зависит от ширины щели или диаметра точки. Теперь . . . от этого взгляда следует отказаться как от принципиально неверного . . . при переходе от бесконечно широкой щели к бесконечно узкой мы обнаружим выигрыш в предельной чувствительности всего лишь в ~ 3 раза».

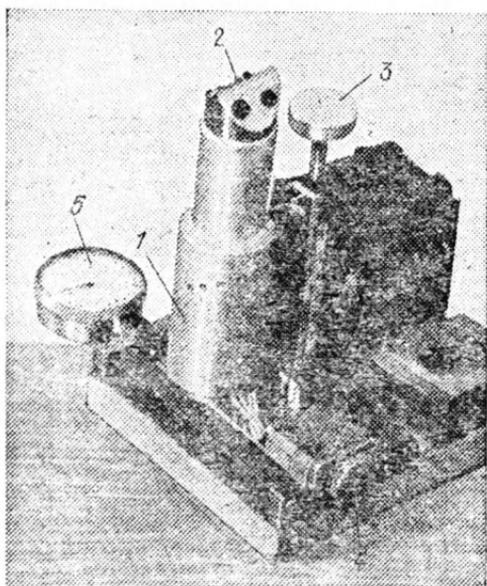


Рис. 52. Совершенный теневой прибор клуба им. Д. Д. Максудова с горизонтальным расположением ножа: 1 — осветитель с конденсором, 2 — щель и нож, 3 — винт вертикального движения, 4 — винт продольного движения, 5 — часовой (дисковый) индикатор

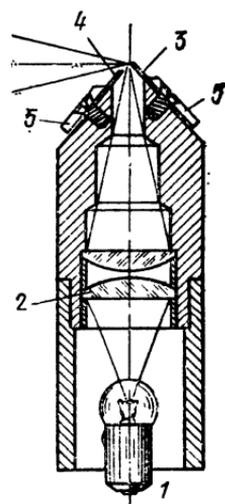


Рис. 53. Осветительная система хорошо оборудованного теневого прибора: 1 — лампа, 2 — конденсор, 3 — нож, 4 — вторая щель, 5 — прижимная пластина

Вместо ножа можно использовать и другие приспособления для исследования дифракционной картины точки или щели. Прежде всего это нить. Метод нити, предложенный в 1918 г. Г. Ричи и подробно исследованный Д. Д. Максудовым и другими оптиками, чаще все-таки играет вспомогательную роль. Нить представляет собой как бы нож с двумя лезвиями. От того, что эти «лезвия» направлены в разные стороны и практически совмещены, картина при испытании нитью не имеет теней, а только полутени (рис.

54, в). При этом полутень на зеркале выглядит тонкой линией, и чем больше относительное отверстие зеркала, тем уже тень. Это и понятно: при испытании ножом мы также сталкиваемся с тем, что на светосильных зеркалах полутень уже, чем на длиннофокусных зеркалах. Очень важно, что тень нити видна только на тех зонах, в центре кривизны которых установлена нить. Это очень удобно для точного определения центра кривизны той или иной зоны. При работе с нитью важно, чтобы ширина щели была близкой к дифракционной.

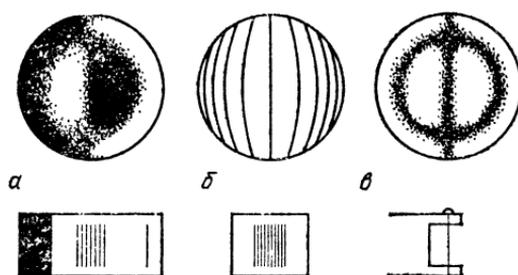


Рис. 54. Теневая картина при испытании параболоида: а — ножом, б — решеткой Ронки, в — нитью. Слева внизу — сложный тест, содержащий «нож», решетку и «нить». Тест наносится на кусочек стекла или фотографируется на позитивную пленку

Обычно для исследования поверхности в целом применяют нож и с его помощью делают предварительные и точные замеры aberrаций, но для окончательного суждения о величине aberrаций можно применить и нить. Нить имеет тот недостаток, что не позволяет уверенно оценить качество поверхности в целом, но зато позволяет точнее определить положение полутени на зонах зеркала.

В 1925 г. Васко Ронки предложил решетку из нескольких нитей, нанесенных на стекло параллельно самим себе на расстоянии около 0,1—0,2 мм. Эта решетка смещается с фокуса фронта волны на 2—5 мм к зеркалу или от него, и мастер по искривлению теней линий на зеркале судит о форме поверхности (рис. 54, б и 49, б). Чем ближе к фокусу фронта волны расположена решетка, тем чувствительнее метод.

Можно обойтись и одной нитью, если ее также сместить ближе к зеркалу (или дальше от него) на 2—5 мм от фокуса фронта волны. Это так называемый *второй метод щели и нити*, исследованный Д. Д. Максуповым. Недо-

статок метода состоит в том, что для качественной оценки всей поверхности нить нужно плавно перемещать поперек пучка лучей, постепенно «проходя» всю поверхность зеркала. Решетка Ронки в подобном случае позволяет без перемещения поперек луча сразу оценивать всю поверхность.

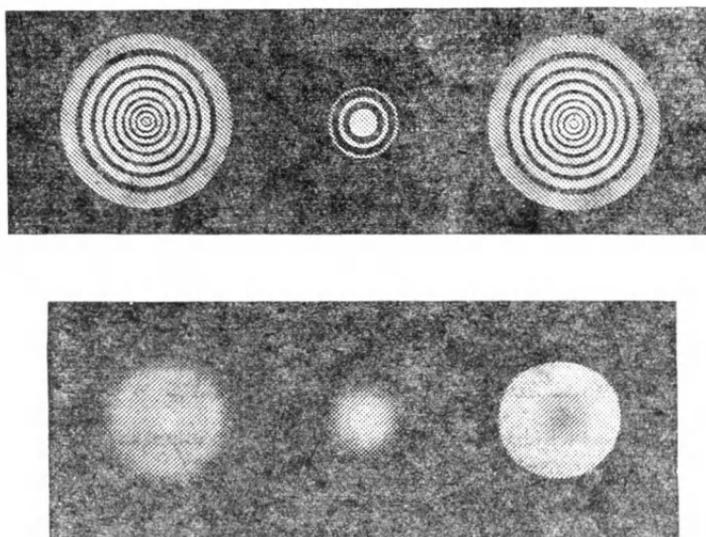


Рис. 55. Вид изображения светящейся точки в сильный окуляр при наилучшей наводке на фокус (в середине), при предфокальном (слева) и зафокальном (справа) положениях окуляра:верху — при безупречном сферическом зеркале, внизу — если радиус кривизны центральной части зеркала короче, чем радиус кривизны периферических частей (заимствовано у М. С. Навашина)

Для количественной оценки поверхности необходимо вычислить заранее форму тени нити на зеркале при различных положениях нити при ее смещениях вдоль и поперек оси. Для точного замера аберраций нужно выполнить несколько десятков установок нити и соответствующее количество вычисленных положений тени на зеркале. В усовершенствованном виде этот способ получил название *метода Гавиолы*, и здесь мы его не рассматриваем, так как он представляется слишком громоздким и обязательно требующим хорошего теневого прибора с плавным перемещением нити поперек и вдоль оси и с возможностью точного замера любого положения нити.

Практически в результате полуторавекового «естественного отбора» нож вышел победителем и у любителей и у профессионалов при оперативном исследовании зеркал.

Если мы исследуем сферический фронт волны (в случае испытаний сферического зеркала из центра кривизны или при испытаниях асферических поверхностей в компенсационной схеме, см. ниже), то очень наглядным является испытание с помощью окуляра — так называемая *окулярная проба*. Ее суть в том, что с помощью сильного окуляра мастер рассматривает дифракционное изображение точки, и по виду колец, а также по виду предфокальных и зафокальных изображений судит о качестве поверхности зеркала. К сожалению, этот метод не слишком чувствителен. Но он очень нагляден, так как позволяет сразу видеть, дает ли зеркало достаточно качественное изображение светящейся точки. Рис. 55 показывает различный вид точки или внефокального пятна при различных дефектах зеркала. Окулярная проба — один из важных вспомогательных способов контроля зеркал. Как подчеркивал М. С. Навашин [4], он позволяет начинающему мастеру получить важные навыки при изучении тонких дифракционных эффектов. Этот опыт чрезвычайно важен при астрономических наблюдениях для понимания многих важных вопросов.

§ 29. ТОЧНОСТЬ ПАРАБОЛИЗАЦИИ ЗЕРКАЛА

Если оптически точная поверхность отступает от заданной формы не более чем на $1/8$ длины волны света, то она может считаться совершенной. $1/8$ длины волны света — это $0,00056$ мм: $8=0,00007$ мм= $0,07$ мкм.

Отступление параболоида от ближайшей сферы сравнения составляет

$$\delta = \frac{D}{4096\gamma^3},$$

где D — диаметр, а γ — относительное фокусное расстояние зеркала. Например, зеркало диаметром 250 мм с фокусным расстоянием 1500 мм имеет относительное фокусное расстояние 6 и после параболизации отступает от ближайшей сферы сравнения на $0,00028$ мм, или на $0,28$ мкм. Допустимое же отступление составляет $0,07$ мкм, или 25% от величины параболизации. Значит, выполняя параболизацию, мы можем немного не допараболизировать или перепараболизировать зеркало, если продольная абер-

Допуски при параболизации

V	D					
	80	110	160	200	250	300
3	9,8	7	4,9	3,9	3,1	2,6
4	23	16,7	11,5	9,1	7,3	6,1
5	61,9	32,4	22,4	17,9	14,3	12,0
6	128,6	56,0	38,7	30,8	24,8	20,7
7	—	88,6	61,4	49,0	39,3	32,9
8	—	132,1	92,1	72,9	58,8	49,0
9	—	—	132,1	104,5	83,3	70,0
10	—	—	—	—	114,8	96,0
12	—	—	—	—	—	166,7

рация зеркала не будет отличаться более чем на 25 % от вычисленной величины. Иначе говоря, в нашем примере с 250-миллиметровым зеркалом, продольная aberrация которого равна 5,2 мм *), зеркало может иметь aberrацию в пределах от 6,5 до 3,9 мм. Если при параболизации продольная aberrация не будет выходить за эти пределы, то зеркало будет работать безупречно.

В табл. 11 приведены пределы погрешностей продольной aberrации при параболизации для зеркал с различным диаметром и фокусным расстоянием. Погрешности выражены в процентах от вычисленной продольной aberrации.

В тех случаях, когда погрешность продольной aberrации в таблице составляет 100 % и более, зеркало может иметь продольную aberrацию равной нулю (быть сферой) или быть гиперболоидом с aberrацией в два раза больше вычисленной. Отсюда становится понятным, почему, говоря о допустимых погрешностях 150-миллиметрового сферического зеркала, мы назвали допустимой продольную aberrацию 2—2,5 мм. Еще раз напомним: в этом конкретном случае для сферы погрешность может быть допустимой только в сторону плавного парабоида — «бублика». Погрешности такого рода в сторону подвергнутого края для сферы недопустимы.

Для описанного способа оценки точности фигуры зеркала важно, чтобы фигура была плавной и aberrации для

*) Продольная aberrация в этом примере вычислена из расчета, что источник света неподвижен.

каждой зоны были, если не равны, то пропорциональны вычисленным. По сути дела этот способ показывает нам отступление зеркала в сторону эллипсоида или гипербоида или, иначе говоря, мы оцениваем точность выполнения квадрата эксцентриситета получившейся у нас фигуры.

§ 30. ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕТОДА ФУКО

Когда зеркало достаточно приблизилось к расчетной фигуре и отличается от нее не более чем на $\lambda/8$, полировку можно остановить. Многие любители, не зная об этом, полируют и полируют зеркало, не только попусту тратя время, но сплошь и рядом «уродуют» его. Даже опытный мастер значительную часть времени тратит на «порчу» зеркала, ибо не ведает, что творит.

Таблица 12

Данные для построения графика Миллье-Лакруа

y	$y^2/2R$	$2Rp/y$	ΔS_{\max}	ΔS_{\min}
10	0,02	$\pm 0,98$	+1,00	-0,96
20	0,08	0,49	0,57	0,41
30	0,19	0,33	0,52	0,14
40	0,33	0,25	0,58	+0,08
50	0,52	0,20	0,72	0,32
60	0,75	0,16	0,91	0,59
70	1,02	0,14	1,16	0,88
80	1,33	0,12	1,45	1,21
90	1,69	0,11	1,80	1,58
100	2,08	0,10	2,18	1,98

В этом параграфе мы опишем простой и наглядный способ понять, достаточно ли точно сделано зеркало. Способ предложил Адриен Миллье-Лакруа (Франция) [31]. Рассмотрим это на примере фигуризации 200-миллиметрового зеркала с фокусным расстоянием 1200 мм, что соответствует относительному отверстию 1/6. Перед началом работы сделаем несложные вычисления и вычертим заготовку графика, на которую будем наносить измеренные aberrации. Она будет служить до конца испытаний, и ее лучше сделать тушью.

Составим таблицу (табл. 12). В первой колонке запишем радиусы зон зеркала через 10 мм. Во вторую колонку

впишем значения продольной аберрации для каждой зоны идеального зеркала, воспользовавшись формулой $\Delta S = \frac{y^2}{2R} e^2$. Если фигурируется параболоид, квадрат эксцентриситета которого равен единице, то формула становится проще, $\Delta S = \frac{y^2}{2R}$. Здесь и дальше будем считать, что

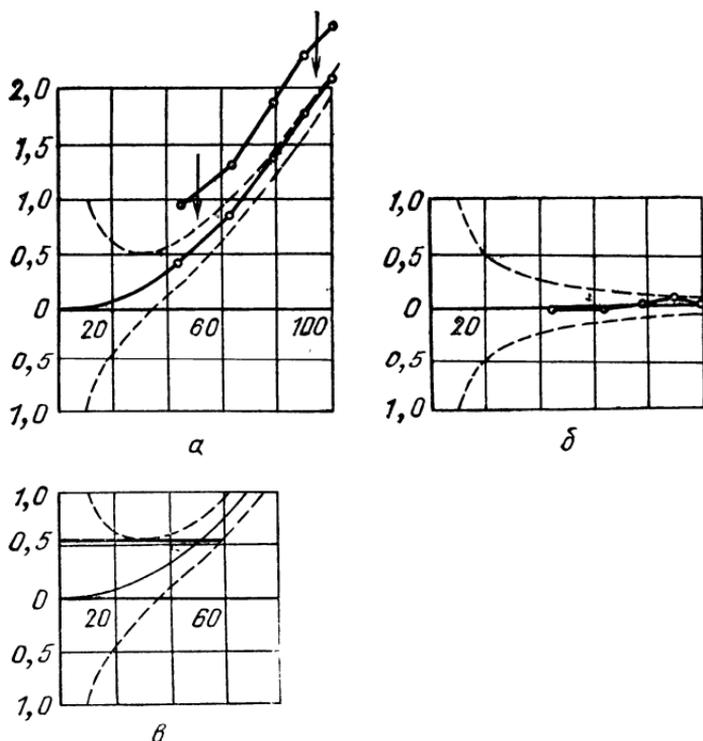


Рис. 56. График допусков и реальных аберраций зеркала: *a* — смещение графика параллельно самому себе, *б* — см. объяснение в тексте, *в* — график идеального сферического зеркала, укладывающегося в допуск Рэлея

источник света движется вместе с ножом. Если он неподвижен, то

$$\Delta S = \frac{y^2}{R} e^2.$$

Нанесем на горизонтальную ось графика радиусы зон зеркала (рис. 56, *a*). Так как обычно теневая картина сим-

метрична, используем только половину графика от центра до края зеркала. Нанося числа второй колонки, построим график продольной аберрации. Он имеет форму параболы. Реальное же зеркало имеет аберрации, которые отличаются от вычисленных. Поэтому вычислим допустимые погрешности в ту и в другую сторону. Если источник (щель, «звезда») жестко связан с ножом и движется, то допустимые погрешности вычисляются по формуле $\frac{Rp}{y}$. Здесь ρ — линейный радиус кружка Эри, равный $\rho = 1,22\lambda y$. Для нашего зеркала и для волны 0,00056 мм он равен $\rho = 0,0041$. Полученные числа со знаком «плюс»-«минус» внесем в третью колонку. Четвертая и пятая колонки — это суммы и разности 2-й и 3-й колонок. Нанеся числа 4-й и 5-й колонок на график, мы получим две кривые, которые определяют допустимые погрешности аберраций реального зеркала. Эти погрешности для случая неподвижного источника вычисляются по формуле $2Rp/y$.

Обратим внимание на то, что допуски в центре зеркала много больше, чем на краю. Это потому, что лучи от центральных зон идут под малыми углами к оптической оси и значительная продольная аберрация лишь слегка влияет на диаметр кружка рассеяния.

Задача мастера так отретушировать зеркало, чтобы реальные аберрации уместились на графике между этими кривыми.

После очередного промера нанесем значения реальных аберраций на график и соединим их кривой или ломаной линией. Скорее всего, что она вообще полностью окажется за пределами кривых. Это произойдет потому, что промеры обычно начинают не с нуля, а со случайного показания индикатора или линейной шкалы теневого прибора. Попробуем сместить график реальных аберраций вверх или вниз строго параллельно самому себе до тех пор, пока он не уместится полностью в пределах между крайними кривыми. Если нам удастся расположить кривую аберраций полностью внутри пространства, ограниченного кривыми допусков, то зеркало идеально, и полировку можно заканчивать. Если этого не удастся, то всегда хорошо видно, какую именно зону нужно ретушировать. Удобно график вычерчивать на карандашной кальке, а потом накладывать этот лист на основной график и легко перемещать его, если нужно. При переносе графика реальных аберраций ни в коем случае его нельзя наклонять

или поворачивать. Если нам хочется сделать зеркало с точностью не $\lambda/8$, а $\lambda/16$, то значения в третьей колонке нужно уменьшить вдвое, считая кружок рассеяния ρ вдвое меньше.

Когда параболизуется большое зеркало с большим относительным отверстием, кривые допусков аберраций круто поднимаются вверх и располагаются так тесно, что работать неудобно. Тогда их можно нанести над и под горизонтальной осью графика, не строя кривую аберраций идеального параболоида (рис. 56,б). Теперь нанося на график реальные аберрации, мы должны прежде вычесть из них величину $\Delta S = \frac{y^2}{2R} e^2$ (для подвижного источника света).

На рис. 56,в показан график идеального сферического зеркала. У него $\Delta S=0$, а линия графика горизонтальна.

Метод Миллье-Лакруа применяется в клубе им. Д. Д. Максудова с 1976 г. и зарекомендовал себя с самой хорошей стороны. Самое удивительное в том, что каждый может убедиться, насколько далеки от совершенства теневые картины очень хороших зеркал с погрешностью около $\lambda/8$. Это говорит о чрезвычайно высокой чувствительности метода Фуко. В клубе имеются зеркала, аберрации которых едва «врезаются» в допуск, но зеркала дают превосходные изображения звезд.

§ 31. ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЗЕРКАЛА

Рассмотрим конкретный пример фигуризации 200-миллиметрового зеркала с радиусом кривизны при вершине 2400 мм. Результаты промеров аберраций приведен в табл. 13.

В конце фигуризации, когда метод Лакруа показывает, что зеркало достаточно точное, интересно построить не график аберраций, а реальный профиль зеркала, на котором можно воочию увидеть отклонения от идеальной поверхности. Здесь мы изложим один из таких способов, предложенный Д. Д. Максудовым [3].

Отклонение участка поверхности от расчетной приводит к уклонению отраженного луча на угол η , значение которого в радианах равно

$$\eta = -\frac{y\Delta R_y}{R_0^2}.$$

Таблица 13

Измерение продольных aberrаций параболического зеркала

y (радиус зоны)	ΔS вычисл.	ΔS 1-е измерение	ΔS 2-е измерение
0	0,0	0,0	0,0
45	0,42	0,11	0,40
64	0,85	0,51	0,83
78	1,27	1,13	1,31
90	1,69	1,30	1,80
98	2,00	2,64	2,02

Здесь ΔR_y — разница между точным значением продольной aberrации параболоида и ее реальной величиной. Вычисления проведем с помощью табл. 14. В первой ко-

Таблица 14

Вычисление профиля зеркала

После первого измерения aberrаций						
y	ΔR_y	η	$\eta_{ср}$	Δy	$\Delta y \cdot \eta_{ср}$	δ
0	0	0	0	0	0	0
45	+0,31	-2,42	-1,21	45	-54,5	-54,5
64	+0,34	-3,78	-3,10	19	-58,9	-113,4
78	+0,14	-1,90	-2,84	14	-39,8	-153,2
90	+0,39	-6,09	-4,00	12	-48,0	-201,2
98	-0,64	+10,87	+2,40	8	+19,2	-182,0
После окончания фигуризации						
y	ΔR_y	η	$\eta_{ср}$	Δy	$\Delta y \cdot \eta_{ср}$	δ
0	0	0	0	0	0	0
45	+0,02	-0,156	-0,078	45	-3,51	-3,51
64	+0,02	-0,222	-0,189	19	-3,59	-7,10
78	-0,04	+0,542	+0,160	14	+2,24	-4,86
90	-0,11	+1,719	+1,131	12	+13,57	+8,71
98	-0,02	+0,310	+1,030	8	+8,24	+16,95

лонке запишем радиусы зон зеркала, во второй — разницу между вычисленной заранее абберацией и реальной. По приведенной формуле вычислим угол уклонения луча и полученный результат запишем в третью колонку. Значения очень малы, и чтобы в дальнейшем облегчить работу, можно числа этой колонки умножить на миллион (10^6). Тогда результат получится не в миллиметрах, а в

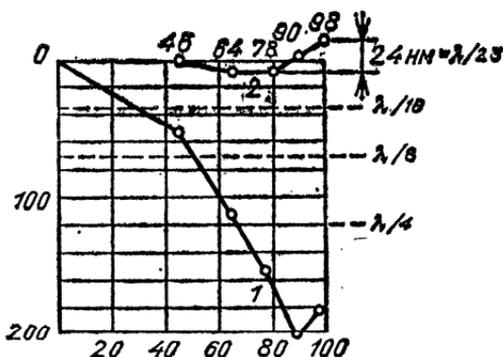


Рис. 57. Профиль зеркала в соответствии с табл. 14: 1 — до исправления, 2 — после исправления

нанометрах (миллимикронах). В четвертой колонке запишем усредненные значения углов. Для этого алгебраическую (с учетом знака) сумму углов данной строки и предыдущей разделим пополам. Пятая колонка содержит разность между радиусами данной и предыдущей зон. В шестой колонке помещены произведения чисел из четвертой и пятой колонок. В последней, седьмой колонке даны суммы чисел из шестой колонки для каждой данной зоны и всех ей предшествующих зон. Например для зоны радиусом 78 мм нужно сложить числа 0,0, +55,4, +58,9 и +64,4. В результате получим 178,7. Эту величину и записываем в седьмую колонку для зоны 78 мм.

В первой половине табл. 13 приведен результат вычислений для случая, когда зеркало фигурировано не окончательно. Нанеся числа седьмой колонки на график (рис. 57), видим, что максимальная погрешность составляет примерно 200 нм, или 0,36 λ . Так как идеальный параболоид изображается на графике горизонтальной линией, то для данного зеркала нужно «опустить» весь центр внутри зоны радиусом 90 мм.

После нескольких сеансов фигуризации были получены значения аббераций, записанные в четвертой колонке

табл. 13. На основании этих значений был снова вычислен профиль, который внесен в седьмую колонку второй половины табл. 14. Теперь на графике кривая 2 отклоняется от горизонтали всего на 24 нм. Погрешность поверхности не более $\lambda/23$. Это очень хорошее зеркало, и не страшно, что его край немного подвернут.

Продольная аберрация идеальной сферы при испытании из центра кривизны равна нулю. Поэтому значения реальных аберраций сразу вносятся во вторую колонку таблицы. В этом случае сфера на графике изображается горизонтальной прямой.

§ 32. НУЛЬ-ТЕСТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Метод Меллье-Лакруа и способы построения профиля зеркала, предложенные в разные годы А. Данжоном и А. Куде, Д. Д. Максutowым, Ж. Тексеро и др. очень полезны. Но все-таки соблазнительно собрать схему испытаний так, чтобы на параболоиде видеть плоский рельеф или прямолинейные штрихи решетки Ронки.

Рассматривая вопрос о точности параболизации (§ 27 главы второй), мы заметили, что зеркало может оставаться первоклассным будучи недопараболизированным, т. е. эллипсоидом. Если отступления этого эллипсоида не превышают $\lambda/8$, то он работает так же хорошо, как и параболоид.

Вспомним, что если зеркало сферическое ($e^2=0$), то для получения плоского рельефа, источник должен быть установлен точно в центре кривизны. Если зеркало параболоид ($e^2=1$), то источник нужно установить в бесконечности. Так как для эллипсоида квадрат эксцентриситета имеет значения между нулем и единицей ($0 < e^2 < 1$), то для получения плоского рельефа на нем нужно источник установить где-то дальше центра кривизны, но не в бесконечности (рис. 58,а).

Расстояние от вершины зеркала до этой точки равно $s_{\min} = 14,0 \frac{D^2}{V^2}$. На таком расстоянии от вершины устанавливается источник («звезда» или щель). Его изображение будет построено на расстоянии, которое можно определить по формуле Гаусса $\frac{1}{s_{\min}} + \frac{1}{s_0} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ $s_0 = -\frac{fs_{\min}}{f-s_{\min}}$.

Рассмотрим пример. Параболическое зеркало диаметром 200 мм с фокусным расстоянием 1400 мм ($1/7$) решено испытывать как эллипсоид, отступление которого от пара-

болоида не более $\lambda/8$. Минимальное расстояние до дальнего фокуса будет равно

$$s_{\min} = 14,0 \times 40\,000 : 49 = 11\,429 \text{ мм} = 11,4 \text{ м.}$$

Второй фокус расположен от вершины эллипсоида на расстоянии $s_0 = -1400 \times 11\,429 : (1400 - 11\,429) = 1595,4 \text{ мм}$. Обычно в ближнем фокусе устанавливают источник, а в

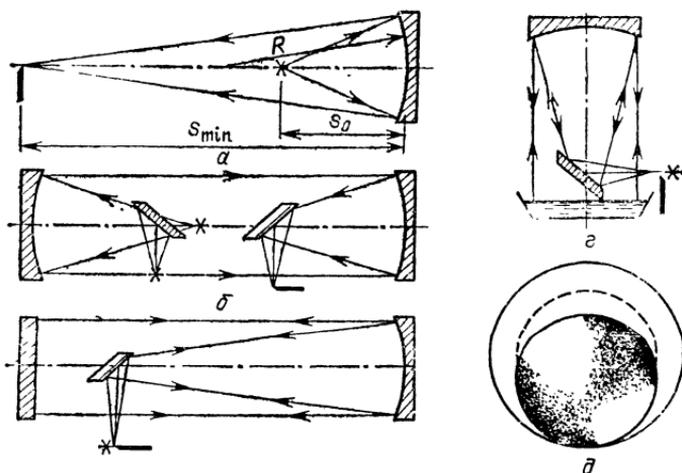


Рис. 58. Некоторые нуль-тесты (подробности в тексте)

дальнем нож или решетку Ронки. Теневую картину с такого расстояния удобно рассматривать с помощью монокуляра или самодельной зрительной трубы с увеличением 6—8 \times . В 1977 г. школьник А. Белкин фигуризовал таким образом 165-миллиметровое зеркало для телескопа Нэсмита клуба им. Д. Д. Максудова. Зеркало давало превосходные изображения в схеме Долла — Керкэма (см. § 5 главы четвертой). К сожалению, зеркало было сделано из некачественного стекла и неожиданно в 1982 г. резко покоровилось настолько, что его пришлось заменить новым.

Проще всего можно было бы исследовать параболическое зеркало с помощью источника, удаленного в бесконечность. Это могли бы быть Полярная, яркий уличный фонарь на горизонте... К сожалению, атмосферная турбулентность так искажает фронт волны и теневая картина так волнуется, что рассмотреть практически ничего нельзя.

Но у нас есть возможность удалить источник в бесконечность искусственно, оптически. Для этого используем

коллиматор — готовый параболический рефлектор с хорошим главным зеркалом, изготовленным с точностью $\lambda/16$ — $\lambda/20$ или выше. В его фокусе устанавливается источник — светящаяся точка или щель (рис. 58,б). Параболоид дает параллельный анаберрационный (неискаженный абберрациями) пучок, который, падая на второе зеркало, собирается в его фокусе, и если с помощью ножа мы видим неплоский рельеф, то все погрешности отнесем на счет этого испытываемого зеркала.

Изготовление зеркала для коллиматора — задача довольно сложная, так как нет простого способа получить этот «первородный» парабоид. Но если сфера не отступает от парабоида больше чем на $\lambda/16$, то ее можно использовать для коллиматора. Сферическое зеркало в этом случае должно иметь относительное фокусное расстояние не менее $\nu = 1,9 \sqrt[3]{D}$. Так, 250-миллиметровая эталонная сфера для коллиматора не может иметь относительное фокусное расстояние меньше $\nu = 12$, а фокусное расстояние короче 3000 мм. Можно сделать зеркало коллиматора более светосильным, если его фигурировать как эллипсоид. С одним и тем же коллиматором испытываются зеркала и телескопы различных фокусных расстояний и оптических схем. Поэтому кружку телескопостроения есть смысл построить коллиматор.

С помощью коллиматора можно испытывать не только парабоиды. В 1977 г. автор применил коллиматор для испытаний 250-миллиметрового гипербоида для телескопа Ричи — Кретьена с относительным отверстием $1/2$ (см. § 5 главы четвертой).

Существует еще один метод — автоколлимационный, в котором испытываемое зеркало одновременно служит и коллиматором. Это метод Ричи. Его можно применить, если имеется плоское эталонное зеркало с точностью не ниже $\lambda/16$ — $\lambda/20$ и диаметром не менее диаметра главного зеркала. В фокусе испытываемого зеркала устанавливаются щель и нож (рис. 58,в). После первого отражения на парабоиде свет распространяется параллельным анаберрационным пучком. Отразившись второй раз от парабоида, он собирается в анаберрационную точку, и на зеркале виден плоский рельеф. Свет отражается от испытываемой поверхности дважды, и чувствительность метода удваивается. Правда, если испытываемое зеркало неалюминировано, то глаза достигает только $1/400$ часть первоначального светового потока, и поэтому важно позаботиться о высокой яркости источника света.

Если плоский эталон сделать сложно, его можно заменить жидким зеркалом, установленным горизонтально (рис. 58,з). В таз подходящего размера наливаем вязкую жидкость, например минеральное масло. Это и есть эталонное зеркало. Над ним вертикально устанавливается собранный телескоп. Важно, чтобы «зеркало» не подвергалось тряске. Нельзя применять ртуть. Она токсична, к тому же от малейших вибраций ее поверхность покрывается рябью.

В этой схеме свет трижды отражается от неалюминированных поверхностей. Поэтому нужно позаботиться об очень ярком источнике. Проще всего расширить щель до прямоугольника размером 3×3 мм. Прибор должен быть снабжен достаточно яркой (например, автомобильной) лампой и конденсором.

В двух описанных способах можно использовать и эталонные зеркала меньшего, чем главное, диаметра. Будет видна только часть теневой картины, рис. 58,д. Чем меньше диаметр эталонного зеркала, тем менее уверенно исследуется параболическое. Особенно трудно обнаружить астигматизм. Так или иначе, 5-метровое зеркало Маунт-Паломарского рефлектора испытывалось с помощью 3-метрового плоского эталона, из которого позже было отшлифовано параболическое зеркало для 3-метрового Ликского телескопа.

Перечисленные методы контроля, когда на испытываемой поверхности получается плоский рельеф, называются «нуль-тестами». Один из нуль-тестов с решеткой Ронки, предложенный Э. Мобси, описан в предыдущем издании этой книги. Этот метод всколыхнул у нас в стране творческую мысль, и автор получил большое количество писем с методами, развивающими идею Мобси. Наиболее интересна мысль использовать обычную решетку с прямолинейными штрихами, но на зеркало накладывать маску из искривленных толстых проволок.

Есть и другие нуль-тесты, которые содержат в схеме оптический элемент, так искажающий фронт волны перед падением на испытываемое зеркало, что после отражения он становится строго сферическим, а рельеф плоским. Это так называемые *компенсационные методы*. Один из них был предложен английским любителем Г. Доллом [17]. После источника света устанавливается плоско-выпуклая линза со сферической поверхностью, изготовленной с точностью $\lambda/16$. Меняя расстояние между щелью и линзой, можно менять величину продольной сферической аберрации и подогнать ее к продольной аберрации пара-

его центральной зоны, в точке O_y — центр кривизны крайней зоны y . Расстояние между точками O_0 и O_y — продольная сферическая аберрация асферического испытуемого зеркала, abc — вспомогательное зеркало-компенсатор, O_1 — центр кривизны этого зеркала, M — точка, где расположены щель и нож. После отражения на компенсаторе лучи идут к испытуемому зеркалу: aA , bB , cC . В точке O_0 пересекаются продолжения расходящихся лучей от центральной зоны компенсатора, а в точке O_y — продолженные назад крайние лучи от компенсатора. Расстояние между этими точками представляет собой сферическую аберрацию компенсатора. Меняя расстояние между щелью и компенсатором, можно изменять величину продольной аберрации компенсатора. Значит, с помощью одного и того же зеркала можно испытывать различные асферические зеркала.

Радиус кривизны зеркала-компенсатора равен

$$r = -kR e^2, \quad (1)$$

где e^2 — квадрат эксцентриситета испытуемого зеркала (для параболоида $e^2=1$), R — радиус кривизны при вершине испытуемого зеркала. Коэффициент k равен

$$k = \frac{\left(2 - \frac{r}{s}\right)^4}{2\left(1 - \frac{r}{s}\right)^2}, \quad (2)$$

где r — радиус кривизны зеркала-компенсатора, s — расстояние от щели и ножа до вершины компенсатора.

Предположим, что мы используем в качестве компенсатора уже готовое высококачественное сферическое зеркало с известным радиусом кривизны. Рассмотрим вычисление расстояния от щели до компенсатора на конкретном примере. Испытывается гиперболическое вогнутое зеркало $R=2000$ мм, $D=250$ мм, $r=1500$ мм, $e^2=1,07$

Решая задачу, сначала определим коэффициент k по формуле (1)

$$k = -\frac{1500}{2000 \cdot 1,07} = -0,7009.$$

Теперь попытаемся определить расстояние от светящейся щели до зеркала-компенсатора s по формуле (2). Способ решения уравнения не совсем обычный. Начнем подставлять различные значения отношения r/s с таким расчетом, чтобы постепенно подобрать значение k , равное $-0,7009$.

Значения k в зависимости от r/s

r/s	k	r/s	k
2	0,0	3,80	0,6695
2,05	0,0000028	3,85	0,7211
2,10	0,0000413	3,90	0,7748
2,15	0,0001913	3,95	0,8303
2,20	0,0005556	4,00	0,8889
2,25	0,001250	4,05	0,9493
2,30	0,002396	4,10	1,0119
2,35	0,004117	4,15	1,0767
2,40	0,006531	4,20	1,1438
2,45	0,009752	4,25	1,2132
2,50	0,01389	4,30	1,2849
2,55	0,01904	4,35	1,3588
2,60	0,02531	4,40	1,4350
2,65	0,03278	4,45	1,5135
2,70	0,03154	4,50	1,5944
2,75	0,05166	4,55	1,6775
2,80	0,06321	4,60	1,7630
2,85	0,07626	4,65	1,8508
2,90	0,09087	4,70	1,9410
2,95	0,1071	4,75	2,0335
3,00	0,1250	4,80	2,1283
3,05	0,1446	4,85	2,2255
3,10	0,1660	4,90	2,3251
3,15	0,1892	4,95	2,4270
3,20	0,2142	5,00	2,5313
3,25	0,2411	5,05	2,6379
3,30	0,2700	5,10	2,7469
3,35	0,3007	5,15	2,8584
3,40	0,3335	5,20	2,9722
3,45	0,3682	5,25	3,1623
3,50	0,4050	5,30	3,2069
3,55	0,4438	5,35	3,3279
3,60	0,4847	5,40	3,4513
3,65	0,5277	5,45	3,5771
3,70	0,5728	5,50	3,7052
3,75	0,6201		

Мы уподобимся ученику, который не знает решения задачи, но знает ответ, взятый в конце задачника. Подставляя случайные числа, он подгоняет свой ответ к ответам в задачнике. Возьмем любое число, например, $r/s=2,5$; подставив его в уравнение (2), вычислим k :

$$k = \frac{(2-2,5)^2}{2(1-2,5)^2} = \frac{0,0625}{2 \cdot 2,25} = 0,01389.$$

Как видим, это значение k слишком далеко от нужного нам. Подставим другое значение $r/s=4$, тогда $k=0,8889$. Это значение k ближе, но r/s нужно взять поменьше. Чтобы облегчить поиски, составим табл. 15 зависимости величины k от r/s . Числа этой таблицы справедливы для любого испытываемого зеркала и компенсатора. Ближайшее значение k в таблице равно 0,7211. Ему соответствует $r/s=3,85$. Примем $r/s=3,83$. Тогда $k=0,7002$. Это совсем близко. Берем еще одно значение $r/s=3,831$, $R=0,7012$. Наконец, при $r/s=3,8307$ $k=0,7009$. Определив отношение r/s и зная радиус кривизны компенсатора $r=1500$ мм, найдем и расстояние между светящейся щелью и компенсатором

$$s = \frac{1500}{3,830} \approx 392 \text{ мм.}$$

Установив светящуюся точку или щель на расстоянии 392 мм от вершины (центра) зеркала-компенсатора, мы получим в расходящемся пучке продольную сферическую aberrацию, равную по величине продольной сферической aberrации испытываемого зеркала при испытании его из центра кривизны. Заметим, что вычисление собственного значения этой aberrации нам не потребовалось.

На каком расстоянии от испытываемого зеркала нужно установить компенсатор (эталонное сферическое зеркало)? Определим значение s_0 — расстояние вершины компенсатора от точки O_0 — центра кривизны параксиальной зоны испытываемого зеркала. Оно равно

$$s_0 = \frac{r}{2 - \frac{r}{s}} = \frac{1500}{2 - 3,8307} \approx 819 \text{ мм.}$$

Следовательно, расстояние между вершинами зеркал будет равно $\Delta = 2000 - 819 = 1181$ мм.

Наконец определим диаметр компенсатора

$$D_2 = \frac{s_0}{R} D_1.$$

В нашем случае он равен $250 \cdot \frac{819}{2000} = 102,4$ мм. Выберем этот диаметр равным 105—110 мм или больше.

В 1973 г., фигурируя 315-миллиметровое параболическое зеркало (1/7), я был удивлен тем, что вся параболизация была проведена в один сеанс продолжительностью всего 15 мин. Продолжительные испытания из центра кривизны не показывали никаких ошибок зеркала. Метода Миллье-Лакура тогда еще не существовало, и меня мучали

сомнения. Тогда, взяв старое 100-миллиметровое сферическое зеркало (1/7), я в течение вечера его фигурировал до полного отсутствия теневого рельефа и еще через пару дней собрал установку компенсационной схемы Максутава, изображенную на рис. 59,б. Основание ее представляло собой лист 10-миллиметровой фанеры, укрепленный на суппорте — основании теневого прибора 5. Сам осветитель со щелью и ножом 1 был установлен неподвижно на основании. Сферическое эталонное зеркало 2 было установлено в простой регулируемой оправе 6. С помощью винтов 4 и 5 вся установка могла перемещаться вдоль и поперек оси испытываемого зеркала.

Суппорт был установлен на легком и очень жестком штативе кинокамеры «Пентафлекс-16». Это позволило легко его переносить во время настройки. Вспомогательная призма 3 мало влияла на теневую картину, так как была расположена в непосредственной близости от фокуса.

Расстояние между зеркалами измерялось рулеткой и составляло около 2 м. В полной темноте, поворачивая основание установки, я направлял пятно света на стену, где крепилось 315-миллиметровое зеркало. Пятно устанавливалось концентрично зеркалу. После этого, наклоняя основное зеркало, я направлял отраженный пучок точно на вспомогательное зеркало с таким расчетом, чтобы его пятно тоже было концентричным 100-миллиметровому зеркалу. Сама установка юстировалась как обычный телескоп Ньютона (см. § 1 главы третьей и рис. 57). Для того, чтобы привести изображение щели на нож, я двигал всю установку, тогда как расстояние между щелью и вспомогательным зеркалом оставалось постоянным.

Испытания показали практически точно плоский рельеф. По многочисленным оценкам параболическое зеркало имеет точность не ниже $\lambda/100$ — $\lambda/200$.

§ 33. АСТИГМАТИЗМ

Астигматизм может быть вызван слишком большим расстоянием между ножом и щелью, но если это расстояние не превышает значений табл. 16, то астигматизм вызван деформацией поверхности зеркала. В этом случае кривизна зеркала по двум различным диаметрам несколько отличается. Диаметры, вдоль которых кривизна минимальна и максимальна, называются осями астигматического зеркала (рис. 60). Астигматизм сферического зеркала легко обнаружить, если с помощью окуляра рас-

Допустимые расстояния между ножом и щелью

2f	D				2f	D			
	110	150	200	250		110	150	200	250
3000	53	37	27	22	2100	30	21	16	13
2700	45	32	23	18	1800	24	17	13	10
2400	38	26	20	16	1500	18	12	10	8

смотреть пред- и зафокальные изображения источника света с помощью окуляра. В двух положениях точка будет видна в виде двух взаимноперпендикулярных штрихов *).

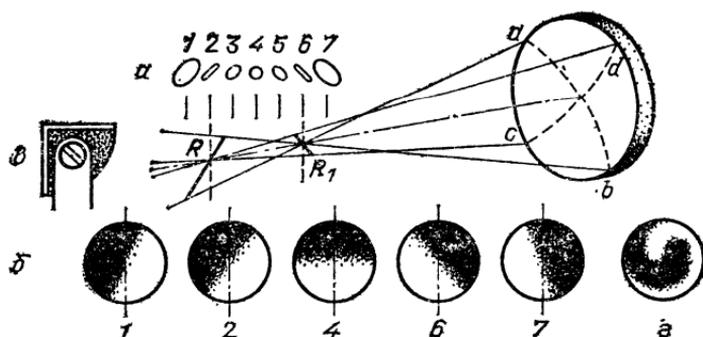


Рис. 60. Схема астигматизма зеркала: а — вид пятна при различных положениях окуляра, б — вид теневой картины при перемещении ножа (лезвие ножа везде вертикально), в — конструкция ножа для испытания на астигматизм, г — покоробленное зеркало

Расстояния между этими положениями (фокалями) называется *астигматической разностью*, так как это — разность радиусов кривизны для двух осей зеркала.

Посмотрим, как образуется тень на зеркале, когда нож установлен в точке R_1 (б). Астигматический штрих непараллелен краю ножа. Так как нож установлен в центре кривизны оси ab , полутень ножа займет узкий участок зеркала только вдоль диаметра ab . Для другого диаметра нож находится в предфокальном положении,

*) Астигматизм может возникнуть и от наклона оптической оси окуляра к оси зеркала. Поэтому, обнаружив астигматизм, нужно слегка наклонить окуляр в разных направлениях,

и тень займет половину этого диаметра с той стороны, откуда надвигается нож (в нашем случае справа). Рассмотрев не только диаметры, но и хорды, мы увидим, что несмотря на то, что нож установлен вертикально, его тень на зеркале наклонена и что ее край проходит вдоль одной из осей или параллельно ей.

Можно рассмотреть образование тени на зеркале и в других точках между R_1 и R_2 . Теперь предположим, что одна из астигматических осей параллельна кромке ножа, тогда никаких признаков астигматизма мы не обнаружим. Значит, во время испытаний зеркало нужно осматривать дважды, поворачивая на 45° вокруг оптической оси.

На хорошей сфере при переходе ножа Фуко из предфокального положения в зафокальное тень внезапно меняет свое положение — переходит с одной половины на другую и только на короткое время она разливается полутенью равномерно по всему зеркалу. В случае астигматического зеркала при движении ножа вдоль оси тень начинает вращаться так, что в положении между астигматическими фокалями устанавливается перпендикулярно кромке ножа! Ни в одном положении ножа тень не бывает строго параллельна ножу.

Если астигматизм не слишком большой, полутень в положении 4 на рис. 60 становится очень нерезкой и тем расплывчатее, чем меньше астигматизм. Это удобно для определения середины отрезка астигматической разности. Чтобы уловить положения ножа в фокалях, надо в момент наиболее быстрого поворота поймать два взаимноперпендикулярных направления границы тени на зеркале (2 и б).

Если этот способ кажется не слишком надежным, а так оно и есть, можно на теневом приборе рядом с источником установить на расстоянии не больше, чем в табл. 16, окуляр или одиночную сильную линзу. Двигая ее вместе с прибором вдоль оси, мы измеряем разность в положении, когда видны два взаимноперпендикулярных штриха. Направления штрихов покажут нам направления осей. Вдоль этих осей полезно построить профили зеркала, и нанести их на один и тот же график для сравнения.

Если астигматизм обнаружен, нужно проверить заготовку в поляризованном свете на внутренние напряжения. Кроме того, нужно проследить за тем, хорошо ли было разгружено зеркало во время шлифовки и полировки. Во время штриха с большим давлением и в положении зеркала под шлифовальником оно увлекается им и может упираться торцом всегда в одном и том же положении. Это

тоже может привести к астигматизму. По этой же причине нежелательно приклеивать к зеркалу ручку. Это может слегка деформировать зеркало, а после отклеивания ручки оно, «расслабившись», покоробится. Еще одна причина астигматизма (так называемого нерегулярного, рис. 60,з) — внутренние напряжения в стекле в результате того, что заготовка плохо отожжена. Р. Портер с присущим ему юмором советует в этом случае найти мощный пожарный кран, отойти от него на несколько шагов и с силой запустить в него зеркалом. Автору приходилось сталкиваться с подобными дефектами, и действительно более разумного выхода нет.

§ 34. ОБ АЛЮМИНИРОВАНИИ И СЕРЕБРЕНИИ ЗЕРКАЛ

Проще всего алюминировать зеркала в мастерских бытовых зеркал, которые есть на многих мебельных комбинатах. Существуют зеркальные мастерские, где восстанавливаются старые бытовые зеркала. Они есть в каждом более или менее крупном городе.

Прежде всего отмоём зеркало от прилипших кусочков смолы. Крупные частицы сколем деревянной палочкой с острым концом. После этого протрем зеркало ватой, смоченной керосином или бензином. Правда, большая часть смолы размажется по стеклу. Поэтому промывать нужно несколько раз.

После этого зеркало промываем под краном мыльной губкой. Мыть лучше хозяйственным мылом. Нужно быть осторожным, чтобы не выронить зеркало, лучше все это делать у самого дна раковины. После этого устанавливаем зеркало на ребро и промокательной бумагой снимаем капли. Перед алюминированием промоем зеркало медицинским спиртом и пока он не высох, сполоснем дистиллированной водой.

Ни в коем случае нельзя давать полировать зеркало перед алюминированием, как это делают с бытовыми зеркалами. Грубое полирование, неопасное для бытового зеркала, может дорого обойтись в случае с оптически точным зеркалом. При любой возможности надо покрыть зеркало алюминиевым слоем с защитным покрытием, как это делают в оптических мастерских для повышения прочности покрытия в десятки раз.

После выхода первого издания этой книги автор получил большое количество писем с просьбой описать про-

цессы серебрения и алюминирования. Опишем их здесь кратко только для того, чтобы читатель сориентировался в вопросе, а дальше мог бы подыскать соответствующую литературу с подробностями. К сожалению, оба процесса, особенно алюминирование, довольно сложны, и часто совершенно недоступны любителю.

Серебрение имеет главный недостаток — химическую неустойчивость слоя серебра, который через полгода, а нередко и чаще окисляется на воздухе и темнеет. Серебрение приходится повторять регулярно. Алюминиевый слой в этом отношении очень стоек и сохраняет свои свойства годы, но он требует довольно сложного оборудования.

Мы опишем один из трех процессов серебрения разработанных Бреширом. Эти способы описаны во многих работах хотя и с некоторыми изменениями [4, 28].

Этот процесс применялся во второй половине прошлого и в начале нашего века для серебрения астрономических зеркал и в том числе самых крупных.

Прежде всего заметим, что главное условие успеха — абсолютная чистота во всем. Реактивы должны быть химически чистыми и иметь знак «ХЧ». Вода обязательно дистиллированная.

Перед началом серебрения предварительно чистят поверхность зеркала спиртом, а позже самым скрупулезным образом протирают азотной кислотой. Для этого конец стеклянной палочки обматывают гигроскопической ватой достаточной толщины для того, чтобы не поцарапать поверхность зеркала. Каждый участок зеркала должен быть тщательно очищен. Важно, чтобы ни одна часть зеркала не подсыхала. Если это случилось, то нужно обязательно снова чистить всю поверхность. Протирать нужно с большим терпением.

От азотной кислоты зеркало промывают сначала простой, а потом дистиллированной водой. После этого зеркало погружают в эмалированную или стеклянную миску, наполненную водой. В этой посудине зеркало остается до самого серебрения. Все это время ни один участок зеркала не должен высыхать.

Сколько нужно реактивов для серебрения? Основной из них — азотнокислое серебро (ляпис), который можно попытаться купить в аптеке. Количество ляписа численно равно площади поверхности зеркала, выраженной в см² и деленной на 30. Например для серебрения 150-миллиметрового зеркала понадобится 6—7 г азотнокислого серебра.

За две—три недели до серебрения нужно приготовить восстанавливающий раствор следующего состава:

Сахар-рафинад	90 г
Азотная кислота (плотность 1,22)	4 мл
Чистый винный спирт . . .	175 г
Дистиллированная вода . .	до 1 л

Если нет возможности приготовить этот раствор заранее, можно ускорить его созревание и в стеклянной или эмалированной посуде прокипятить раствор сахара и азотной кислоты в воде, а после его остывания долить небольшими частями винный спирт.

Серебрящий раствор (приготавливается перед самым серебрением)

А. Дистиллированная вода .	300 мл
Азотнокислое серебро . .	20 г
Крепкий нашатырный спирт	.
Б. Дистиллированная вода .	100 мл
Едкое кали	10 г
В. Дистиллированная вода .	30 мл
Азотнокислое серебро . .	2 г

Раствор А После полного растворения азотнокислого серебра по частям пипеткой добавляется нашатырный спирт. Раствор становится темнокоричневым и даже черным. Медленно добавляют нашатырный спирт, пока раствор не станет прозрачным. После этого в раствор А вливают раствор Б. Смесь снова становится темнокоричневой. Опять по частям добавляют нашатырный спирт, постоянно помешивая стеклянной палочкой до тех пор, пока раствор снова не станет прозрачным. Его цвет светлоромановый или соломенножелтый.

Далее, постоянно помешивая, пока есть раствор В, добавляют его в готовящуюся смесь до тех пор, пока она не перестанет темнеть. В конце раствор помутнеет. После этого его фильтруют через гигроскопическую вату.

Когда серебрящий раствор готов, в него вливают с постоянным помешиванием восстанавливающий раствор около 6 мл на каждый грамм растворенного азотнокислого серебра. Сразу же все это выливают на зеркало, находящееся до сих пор под слоем воды толщиной примерно 10 мм, которую не нужно сливать до окончания серебрения.

Через три-восемь минут серебрение закончится. Скорость зависит от температуры, которая не должна превы-

шать 18 °С. Хорошо предварительно провести весь процесс серебрения на небольшом зеркале, чтобы определить и время и чистоту реактивов.

После того, как раствор вылит на зеркало, сильно перемешивают его, чтобы образующийся плотный осадок не выпадал на поверхность зеркала. Крайне осторожно протирают всю поверхность гигроскопической ватой. Чтобы до высыхания серебряного слоя избежать действия на него воздуха, зеркало для осмотра вынимают всего на 1—2 секунды *). После окончания процесса раствор сливают и сразу ополаскивают свежий слой серебра сначала простой, а потом дистиллированной водой. Если на слое образовались пятна, во время ополаскивания осторожно протирают слой ватой.

После этого ставят зеркало вертикально для сушки. Тремя-четырьмя слоями промокательной бумаги промокают слой серебра и убирают сбегаящие вниз капли краем промокашки. Через несколько часов, а лучше на следующий день, возможно, придется слой серебра полировать, если на нем есть чуть матовый налет. Полируют без всякого нажима круговыми движениями с помощью сухого крокуса или полирита, нанесенного на тампон из самой нежной замши, накрученной на вату. Полировку прекращают, как только зеркало равномерно по всей поверхности заблестит ровным зеркальным блеском.

После окончания серебрения нужно убедиться в том, что толщина слоя серебра достаточна. Глядя через слой на яркую электрическую лампу, мы должны едва видеть синий или фиолетовый волосок. Слишком светлый волосок говорит о сравнительно тонком слое и возможных больших потерях света в телескопе, а невидимый волосок указывает на слишком толстый слой и возможные неровности в его толщине, портящие точную фигуру зеркала.

В ходе серебрения образуются взрывоопасные соединения серебра (гремучее серебро), которые выделяются на поверхности в виде плавающих черных чешуек. Поэтому все работы ведут при температуре не выше 15—18°. Серебрящий раствор готовится только перед самым использованием, а после окончания серебрения немедленно выливается, даже если в нем еще сохранилось какое-то количество азотнокислого серебра. Работать лучше в очках. В жаркую погоду сосуды с растворами лучше обложить льдом.

*) Еще лучше параллельно с главным зеркалом в том же сосуде держать один-два куска стекла и контроль за серебрением вести по ним.

Способ алюминирования зеркал был разработан в 30-е годы нашего столетия Джоном Стронгом [28]. Он основан на испарении алюминия в вакууме. Вольфрамовая спираль обматывается алюминиевой фольгой толщиной 0,1 мм. При нагревании до 600 °С алюминий расплавляется, но не стекает, а смачивая вольфрам, остается на нем. Когда температура спирали достигает 1200 °С, энергия атомов алюминия в расплаве достигает такой величины, что они покидают расплав и срываются с поверхности, двигаясь в различных направлениях.

Рассмотрим схему установки для алюминирования небольших зеркал. Вольфрамовая спираль для равномерности покрытия изгибается по окружности чуть меньшего диаметра, чем зеркало и устанавливается от него на расстоянии около одного радиуса зеркала.

Толщина проволоки примерно 0,7—0,8 мм и рассчитана на напряжение 10—20 В при силе тока 30—40 А. В этом случае слой алюминия на зеркале толщиной 0,1 мкм образуется за 10—20 с. Основная часть времени процесса уходит на откачивание воздуха и медленную разгерметизацию установки.

Процесс протекает при высоком вакууме около 10^{-4} — 10^{-5} мм ртутного столба или около 10^{-7} — 10^{-8} технической атмосферы. При таком давлении молекул газов воздуха так мало, что срывающиеся с испарителя атомы алюминия пересекают объем без столкновений с молекулами газов воздуха, осаждаясь на поверхности стекла.

Для получения высокого вакуума придется пользоваться двумя насосами: для предварительного откачивания — обычным роторным, а высокий вакуум получается с помощью ртутного, молекулярного или масляного диффузионного насосов. Особое внимание нужно уделить герметизации всей установки. Для этого все соединения и щели должны быть промазаны эластичной замазкой «герметик». Утечка тем неприятнее, чем выше вакуум. Например, откачивание одного кубического миллиметра воздуха при давлении 10^{-4} мм рт. столба требует такой же работы, как и при откачивании нескольких литров воздуха при обычном давлении.

Перед алюминированием поверхность зеркала моется так же, как и при серебрении. Но даже в этом случае на поверхности стекла могут скапливаться адсорбированные газы. Чтобы устранить этот мешающий алюминированию слой, зеркало предварительно нагревают до температуры 60—80 °С.

Рассмотрим причины брака при алюминировании. Одна из них состоит в том, что недостаточно чистое зеркало перед алюминированием имеет сначала хороший слой, который через одни—два суток темнеет и может даже «посесть».

Поверхность алюминия быстро темнеет сразу после того, как зеркало вынуто из-под колпака. Это результат недостаточного вакуума. Другая причина — недостаточно чистый алюминий. Потери света даже на слегка потемневшем зеркале значительны. Единственный выход во всех этих случаях — только повторное алюминирование. Слой алюминия смывается раствором едкой щелочи (NaOH или КОН *), которым смачивается ватный тампон, накрученный на конец стеклянной палочки. Обильно смочив алюминиевый слой раствором щелочи, с умеренным давлением протирают поверхность до полного растворения алюминия. После этого зеркало моется водопроводной водой и заново чистится.

*) Работать с растворами едких щелочей надо осторожно, лучше всего в резиновых перчатках и защитных очках.

ПЕРВЫЙ ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР

§ 1. ТЕЛЕСКОП НЬЮТОНА

Своей простотой телескоп Ньютона завоевал любовь любителей всего мира. Сегодня любительские «ньютоны» имеют диаметры от 80—120 мм до 600—800 мм и даже до 1 м. Конечно, в основном их зеркала не превышают в диаметре 250—300 мм. Если такое зеркало сферическое, его фокусное расстояние примерно 2,5—3 м. Это много и требует стационарной установки и очень жесткой монтировки. Поэтому лучше сферическое зеркало делать не слишком большого диаметра — 100—200 мм *). Но даже если читатель решится сделать первое зеркало парабоидальным с относительным отверстием $1/6$ — $1/7$, то и тогда не следует брать его диаметр больше 250 мм.

Часто, когда главное зеркало закончено, терпение любителя на исходе, и он спешит испытать оптику еще до постройки трубы. Главное и диагональное зеркала (или призма) крепятся на простейшей оптической скамье — простой доске, которую у нас в стране называют «чикинской доской» (рис. 61) [см. также 6, рис. 3].



На одном из концов «чикинской доски» с помощью укосин или косынок крепится квадратная доска, на которой устанавливается главное зеркало. На противоположном конце устанавливается стойка для призмы или

*) Даже первые зеркала не стоит делать слишком длиннофокусными, так как усложняется контроль методом Фуко и монтировка становится чрезмерно громоздкой и непрактичной. Лучше выбрать относительные отверстия по табл. 3.

«диагонали». Диагональное зеркало отражает световой пучок в сторону, и он, проходя через отверстие в доске, фокусируется на расстоянии 80—120 мм. Этот вынос нужен для размещения фокусирующей трубки, которая в простейшем случае состоит из двух гладких трубок. Одна крепится к доске, а вторая с трением входит в первую. В эту вторую трубку вставляется окуляр



Рис. 61. «Чикинская доска»: а — 110-миллиметровый телескоп, построенный школьниками А. Баком (слева) и А. Голенковым, б — деталь монтировки. См. также рис. 3 первого издания

Расстояние между зеркалом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний. Зная, на сколько выносится фокус от центра диагонального зеркала, можно вычислить и расстояние между обоими зеркалами.

Все оптические детали должны быть отъюстированы — оптические оси каждой детали должны совпадать с общей осью. Делают это в три приема (рис. 62):

1. Вынимают окуляр из трубки и глядя в нее, так размещают глаз, чтобы оба ее конца были видны концентрично (рис. 62,а). Не меняя положения глаза, устанавливают призму так, чтобы ее центр был виден в центре трубки (рис. 62,б).

2. Не нарушая концентричности концов трубки, наклоняют призму или «диагональ» так, чтобы отражение главного зеркала в ней было концентричным (рис. 62,в).

3. Наклоняя главное зеркало с помощью юстировочных винтов, добиваются, чтобы отражение призмы в главном зеркале стало концентричным (рис. 62,г). На этом юстировка кончается. Обратим внимание на то, что кроме

отражения призмы в главном зеркале видны еще отражение трубки и глаза наблюдателя.

Телескоп — центрированная система, и вершины всех его зеркал расположены на одной прямой — оптической

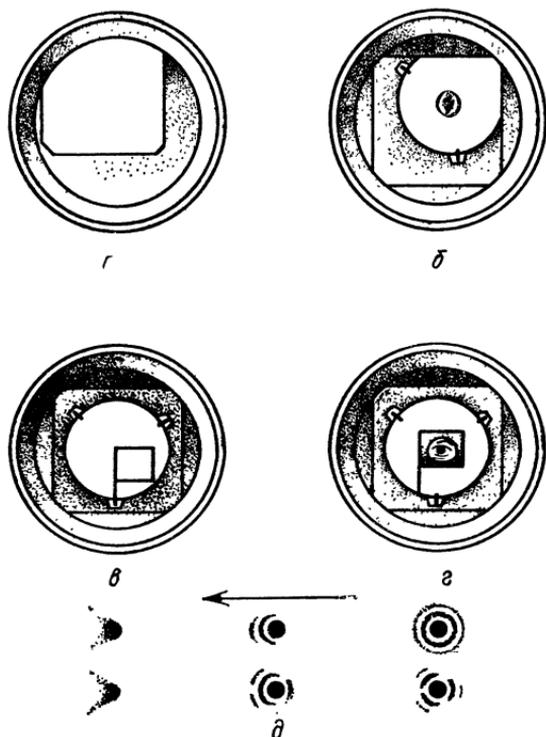


Рис. 62. Юстировка телескопа Ньютона: *a — г* — последовательность юстировки, *д* — вид дифракционной картины изображений звезд и направление перемещения изображения в поле зрения телескопа для устранения комы; внизу — картина для зеркала, пережатого в оправе

оси. Переломы оси на плоских зеркалах в расчет не принимаются. Исходя из этого, натянем перед зеркалами перекрестия из нитей с центром точно в вершине или отметим центры зеркал точками в центре. Во время юстировки нужно добиться того, чтобы перекрестия (или точки) и его отражения в зеркалах оказались совмещенными. В этот момент система будет отъюстирована. Конечно, сначала нужно добиться концентричности окулярной трубки и диагонального зеркала.

Даже самый простой телескоп требует надежной монтировки, так как дрожание трубы (или «чикинской доски»)

приводит к очень сильному дрожанию изображения. Оно тем больше, чем больше увеличение. Если увеличение телескопа всего $50\times$, а амплитуда дрожаний примерно 5 минут дуги, то изображение в поле зрения будет трястись с амплитудой примерно 4° — это восемь лунных диаметров для невооруженного глаза!

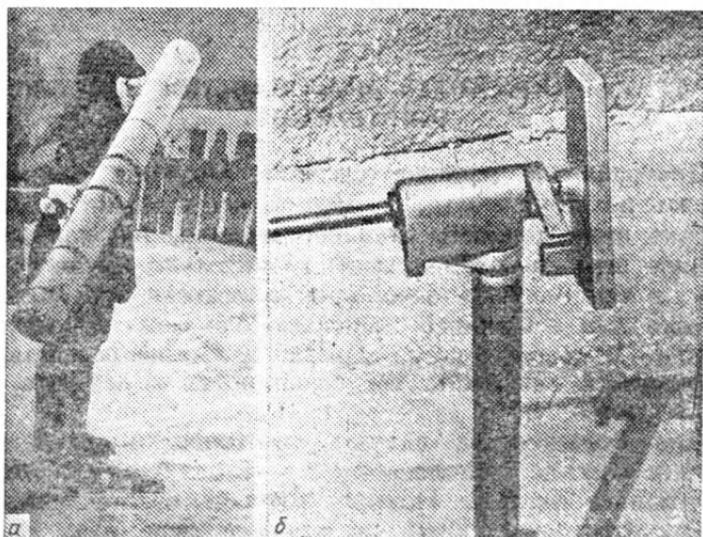


Рис. 63. 110-миллиметровый телескоп, построенный семиклассником А. Белкиным: а — общий вид, б — литые детали до установки винтов и пружин

На первых порах нижний конец доски устанавливают на земле, а верхний опирают на поручень крыльца, забор и т. д.

Вообще же трудности изготовления простой монтировки не так велики, как иной раз утверждают, и имеет смысл сразу делать что-нибудь вроде изображенного на рис. 63. Да и «чикинская доска» ненамного проще бумажной трубы, склеенной эпоксидным клеем.

Каждый решает сам, как ему поступить: строить ли простейшую механику, а потом ее постепенно совершенствовать или сразу начинать со сложной. Во втором случае дело может растянуться на многие месяцы, и волнующий момент испытаний оптики может отложиться на неопределенный срок.

С другой стороны, воодушевленный первым успехом, любитель обычно стремится сразу начать строительство более крупного телескопа. Тогда первый будет служить своему хозяину только до тех пор, пока не будет готов новый. Значит, нет особого смысла стремиться к законченности и совершенству его механической части.

О более совершенных и удобных конструкциях мы расскажем в гл. 5.

§ 2. КАК ПОДОБРАТЬ ДИАГОНАЛЬНОЕ ЗЕРКАЛО ИЛИ ПРИЗМУ?

Диагональное зеркало телескопа Ньютона можно подобрать из старых деталей. Его точность может быть несколько ниже точности главного зеркала, так как диагональное зеркало расположено значительно ближе к фокусу, а чем ближе к фокальной плоскости диагональное зеркало, тем с меньшей точностью оно может быть изготовлено. В пределе, когда зеркало лежит непосредственно в фокальной плоскости, его поверхность может быть как угодно неточной.

Для большинства случаев ньютоновского телескопа плоское зеркало располагается в 4—5 раз ближе к фокусу, чем главное зеркало. Поэтому точность изготовления его поверхности может быть по крайней мере раза в 2—3 меньше, чем точность поверхности главного зеркала. Таким образом, поверхность этого зеркала не должна уклоняться от плоскости больше чем на $1/3$ длины волны света. Но это все равно достаточно большая точность, и обычные бытовые зеркала для наших целей не годятся.

Контур идеального зеркала должен быть эллиптическим. Какие размеры оно должно иметь?

Поле зрения телескопа обычно составляет $1-1,5^\circ$. При фокусном расстоянии 1200 мм линейный поперечник поля зрения будет равен 20—30 мм. Для того чтобы пучок света, идущий от звезды, лежащей на краю поля зрения, не срезался краем диагонального зеркала, надо иметь зеркало соответствующих размеров.

Для их определения вычертим на миллиметровке в натуральную величину (или в масштабе $1/2$) оптическую схему телескопа, на которую нанесем главное зеркало, поперечник поля зрения l , выраженный в миллиметрах, и отметим положение точки перелома оптической оси (рис. 64). Через эту точку под углом 45° проведем прямую — это сечение плоскости зеркала. После этого сое-

диним края главного зеркала с краями поля зрения прямыми линиями. Пересечение этих крайних лучей с вспомогательным зеркалом даст крайние точки оси вспомогательного зеркала. Большую ось определим прямым замером с помощью линейки. Малая ось равна большой оси,

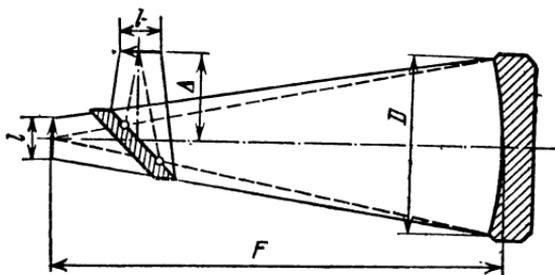


Рис. 64. Графическое определение размеров диагонального зеркала. Обратите внимание на то, что центр эллиптического зеркала не совпадает с оптической осью главного зеркала. Для больших и светосильных зеркал ось оправы диагонального зеркала приходится немного смещать с оси (на данном рисунке вниз)

деленной на 1,4. Величины осей можно получить и расчетом. При этом размер малой оси определяется по формуле

$$b = \frac{D\Delta + l(f' - \Delta)}{f'}$$

где D — диаметр главного зеркала, f' — его фокусное расстояние, l — линейный поперечник поля зрения, Δ — расстояние точки пересечения оптической оси с диагональным зеркалом от фокальной поверхности.

Определив величину малой оси зеркала, умножим ее на 1,4 и получим величину большой оси зеркала.

Если мы используем призму, то размеры ее гипотенузы (длинная грань, срезанная под углом 45°) должны быть не меньше большой оси эллиптического зеркала.

Впрочем, если размеры зеркала несколько меньше, чем следует из наших рассуждений, большой беды не будет. Срезание крайних лучей приведет на краю к небольшому искажению дифракционной картины, которое практически не будет заметно глазу, и незначительному падению яркости, которое также практически будет незаметно.

Не вдаваясь в подробности, приведем табл. 17, взятую из статьи Уильяма Петерса и Роберта Пайка из Канады [35], где даны размеры малой оси диагонального зеркала при условии, что виньетирование на краю поля не превышает 0,5 звездной величины. При этом условии диаго-

Таблица 17

Размер малой оси диагонального зеркала для поля диаметром 45 мм с выносом фокальной поверхности за край пучка на 150 мм и световыми потерями на краю поля не более 0,5%

v	Диаметр главного зеркала D, мм							
	75	110	150	200	250	320	360	400
3	—	—	—	85	93	103	110	119
4	—	52	57	63	70	78	83	89
5	—	44	49	53	57	62	66	71
6	38	43	47	51	53	57	59	62
7	38	42	46	49	51	54	56	58
8	38	42	45	48	50	52	53	56
9	—	42	45	47	49	51	52	54
10	—	42	44	46	48	50	51	52
12	—	42	44	46	47	49	49	50
15	—	42	44	46	46	47	48	49

нальное зеркало становится заметно меньше, чем вычисленное по формуле. Такое зеркало обычно легче достать и оно меньше экранирует главное зеркало. Однако если диагональное зеркало меньше отрезка, отмеченного на рис. 63 маленькими кружками, то это равносильно тому, что уменьшился диаметр главного зеркала.

Можно несколько увеличить размеры и призмы и зеркала, если эти размеры не будут превышать 1/4—1/3 диаметра главного зеркала. Так, например, можно вместо эллиптического зеркала взять прямоугольное или круглое. Диаметр круглого зеркала должен быть равен большой оси эллипса. Тогда часть этого круглого зеркала вообще не будет работать, но это не страшно, так как количество света, экранируемого нерабочими частями, невелико.

Для наших целей пригодны только зеркала с наружным алюминированием, тогда как в быту применяются зеркала с внутренним алюминированием. Чтобы разобраться, где алюминирование наружное, а где внутреннее, осторожно коснемся кончиком карандаша поверхности зеркала. Если в момент соприкосновения кончик карандаша и кончик его отражения соприкасаются, то это значит, что алюминирование наружное. Если между кончиками есть некоторое расстояние, то алюминирование внутреннее.

§ 3. КАК СДЕЛАТЬ ДИАГОНАЛЬНОЕ ЗЕРКАЛО?

Для того чтобы не усложнять себе работу, на первых порах откажемся от эллиптического зеркала и сделаем круглое. Будучи установленным под углом 45° к оси главного зеркала, оно будет проецироваться на него в виде эллипса.

Шлифовка плоскости мало чем отличается от шлифовки сферы. Начинаем сразу с абразива М40—М28. Если шлифуем на плоском пластмассовом или стеклянном шлифовальнике, надо время от времени менять местами зеркало и шлифовальник. Это предотвратит возникновение у зеркала кривизны. Для испытаний на этой стадии достаточно сравнительно грубых методов. Рассматривая зеркало под острым углом, кладем на его дальний край небольшой шарик от шарикоподшипника (рис. 65). Если отражение шарика вытянуто вертикально, то зеркало вогнутое, и его некоторое время (5—15 мин) нужно шлифовать шлифовальником, расположенным сверху. Если изображение сплюснуто, то зеркало выпуклое, и его нужно разместить поверх шлифовальника. Так, чередуя положение зеркала и шлифовальника и постоянно следя за качеством матовой поверхности, переходим к абразивам М20, М14 и М10. Шлифовка занимает совсем немного времени — один-два часа.

Полировка ведется на плоском полировальнике. Смола формуется так же, как и прежде. Возникающая кривизна зеркала исправляется изменением положений полировальника и зеркала, как и при шлифовке. Зональные ошибки устраняются подрезкой, или формовкой полировальника, или местной ретушью, как при полировке главного зеркала.

Исследование формы поверхности нашей «плоскости» ведем по схеме, предложенной в 1888 г. крупнейшим английским любителем телескопостроения, инженером А. Коммоном. Для этого нам понадобится вогнутое зеркало высокого качества, например главное сферическое зеркало телескопа. Если мы его параболизovali, можно использовать его центральную часть, которая с достаточной степенью точности является сферической.

Свет от «искусственной звезды» (она на рисунке не показана) падает на диагональное зеркало и отражается на сферическое. После отражения от сферического зеркала свет последовательно попадает вновь на диагональное зеркало и затем в окуляр. На рис. 65, в показаны изобра-

жения светящейся точки при рассматривании ее в окуляр. Условимся для определенности, что мы всегда будем начинать эту окулярную пробу с рассматривания предфокального изображения «звезды» и, постепенно удаляясь,

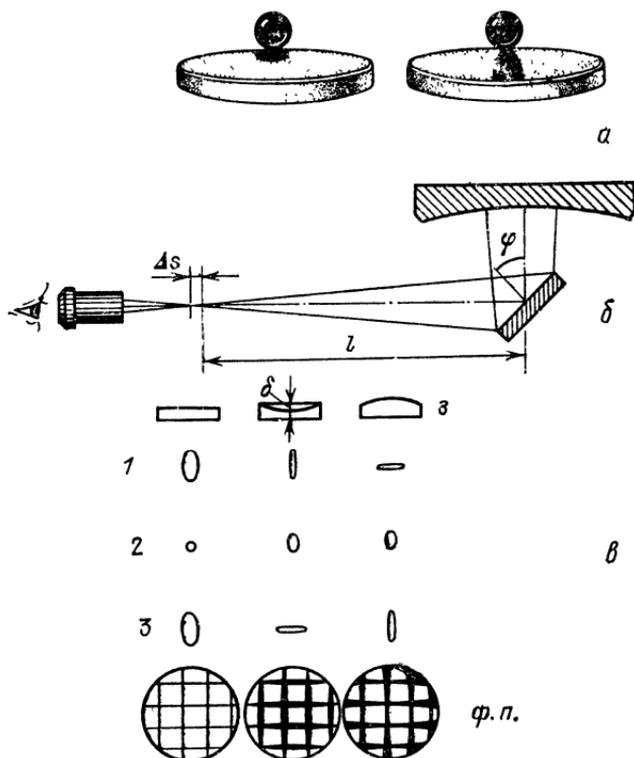


Рис. 65. Контроль плоского зеркала в процессе шлифовки и полировки: *a* — контроль матовой поверхности на кривизну; *б* — схема окулярных испытаний (вид сверху); *в* — вид светящейся точки в предфокальном (1), фокальном (2) и зафокальном (3) положении окуляра; *г* — зеркало; *ф. п.* — форма полировальника для исправления дефекта. Радиус кривизны диагонального зеркала равен $R = 283l^2/\Delta S$; величина отступления от плоскости $\delta = lD^2/22,6l^2$

переходить к зафокальному. Тогда, если предфокальное изображение «звезды» выглядит вертикальным штрихом, а зафокальное — горизонтальным, мы имеем дело с вогнутой поверхностью вместо плоскости. Зеркало необходимо положить вниз и полировать полировальником сверху. Если предфокальное изображение «звезды» — горизонтальный штрих, а зафокальное — вертикальный, зер-

кало имеет выпуклость, и его надо полировать при зеркале сверху. В случае, когда испытывается круглое совершенно плоское зеркало, установленное под углом 45° к оси вогнутого зеркала, зафокальные и предфокальные изображения светящейся точки выглядят эллипсами, а фокальное изображение — точкой.

Если кривизна зеркала достаточно велика и не устраняется этим способом, надо подрезать полировальник, как показано на рис. 65,в (*ф. п.*).

Исследования формы плоского ньютоновского зеркала с окуляром наглядны, а точность обычно достаточна. Но для больших эталонных плоских зеркал точность поверхности должна быть доведена по крайней мере до $\lambda/16$. В этих случаях окончательно судить о поверхности можно только теневым методом. Окуляр заменяем на щель и нож.

Эталонное сферическое зеркало должно быть сделано с точностью $\lambda/20$ — $\lambda/30$ или лучше. Теневая картина остается в принципе той же, что и при испытании сферы, но так как зеркало установлено обычно под углом 45° , то зоны выглядят не окружностями, а эллипсами. Но есть и принципиальное отличие. При испытании сферы незначительное изменение радиуса кривизны не влечет за собой изменения теневого рельефа. При изменении же радиуса кривизны плоскости она сразу перестает быть плоскостью и становится или вогнутой или выпуклой сферой. Так как она установлена под углом 45° , то сразу возникает астигматизм. Он легко обнаруживается теневым методом. Обычно при изготовлении плоскости пользуются поочередно окуляром и теневым прибором.

Замерив положение окуляра между двумя фокалями, когда точка изображается взаимно перпендикулярными штрихами, мы можем вычислить радиус кривизны и стрелку прогиба диагонального зеркала и если стрелка не превышает $\lambda/4$, то фигуризацию можно прекратить. Для зеркала, установленного под углом 45° , «звезда» неподвижна

$$R = \frac{2,83l^2}{\Delta S}, \quad \delta = \frac{\Delta S D^2}{22,6l^2},$$

где l — расстояние между центром диагонального зеркала и окуляром, ΔS — астигматическая разность (расстояние между крайними положениями окуляра), D — эффективный диаметр диагонального зеркала.

Метод изготовления эллиптического диагонального зеркала показан на рис. 66.

Предварительно из круглой заготовки с помощью трубчатого сверла вырезается эллиптическая. Для этого круглая заготовка должна иметь диаметр приблизительно в полтора раза больше большой оси эллипса. Эта заготовка устанавливается в металлическом стакане, который

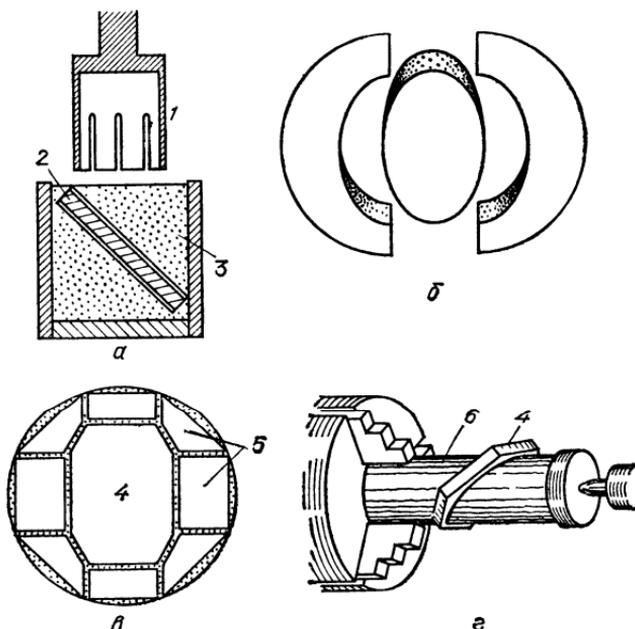


Рис. 66. Вырезание и обработка диагонального зеркала: *а* — вырезание зеркала на сверлильном станке, *б* — блок для шлифовки и полировки, *в* — блок для обработки восьмиугольного зеркала, *г* — кругление многоугольного зеркала на гокарном станке; *1* — трубчатое сверло, *2* — плоская заготовка с приклеенными смолой на обе поверхности тонкими стеклянными пластинками, *3* — гипс, *4* — восьмиугольное зеркало, *5* — куски стекла, дополняющие зеркало приблизительно до круга, *6* — деревянный цилиндр, распиленный под углом 45°

заполняется гипсом. Когда гипс затвердевает, можно начинать сверление (рис. 66, *а*). Сверлится стекло как обычно — с помощью грубого абразива.

Эллиптическую заготовку можно получить, вырезав предварительно восьмиугольную. Затем она вклеивается в деревянный цилиндр, разрезанный под углом 45° . Вклеивается заготовка с помощью смолы. После этого цилиндр зажимается в передней бабке токарного станка (рис. 66, *д*). С другого конца он поджимается конусом задней бабки.

На малой скорости запускается станок и с помощью грубого наждачного камня начинается шлифовывание выступающих углов.

В конце концов диагональное зеркало может быть восьмиугольным. И восьмиугольное и эллиптическое зеркало для шлифовки и полировки наклеиваются на металлическую пластину и одновременно по их краю наклеиваются куски стекла, имеющие ту же толщину с таким расчетом, чтобы они дополнили контуры зеркала до округлости или равностороннего многоугольника (рис. 66, в). После этого весь блок шлифуется, полируется и фигурируется, как одно целое зеркало. Самые неприятные зональные ошибки вроде завала края появляются на краю и не затрагивают собственно зеркала. После завершения фигуризации весь блок расклеивается. Для этого нагревают его на плитке и стягивают стекло с металлического основания.

§ 4. КАК ПОДОВАТЬ ОКУЛЯР?

Прежде всего нужно стремиться достать окуляры от подзорных труб, биноклей, теодолитов, нивелиров и т. д. Несколько хуже работают с короткофокусным зеркальным телескопом окуляры от микроскопов. Впрочем, и здесь попадаются окуляры, которые хороши и в комбинации с зеркалом. Если не удастся найти готовые окуляры, можно на первых порах воспользоваться короткофокусным фотообъективом или объективами от 16- и 8-миллиметровых кинокамер. Для того, чтобы читатель имел возможность ориентироваться в окулярах заводского изготовления, приведем краткую характеристику профессиональных окуляров.

Окуляр Гюйгенса (рис. 67, а). Этот окуляр состоит из двух плоско-выпуклых линз, обращенных плоскими сторонами к глазу. Вспомним формулу сложения фокусных расстояний из § 1 главы первой,

$$f_c = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

где f_1 и f_2 — фокусные расстояния первой и второй линз, а d — расстояние между ближайшими главными плоскостями линз. С этой формулой можно вычислить эквивалентное фокусное расстояние любого окуляра, если известны фокусные расстояния его линз. У первой линзы окуляра вторая главная плоскость лежит на расстоянии

1/3 ее толщины ближе к вершине выпуклой поверхности, первая главная плоскость второй линзы совпадает с ее вершиной.

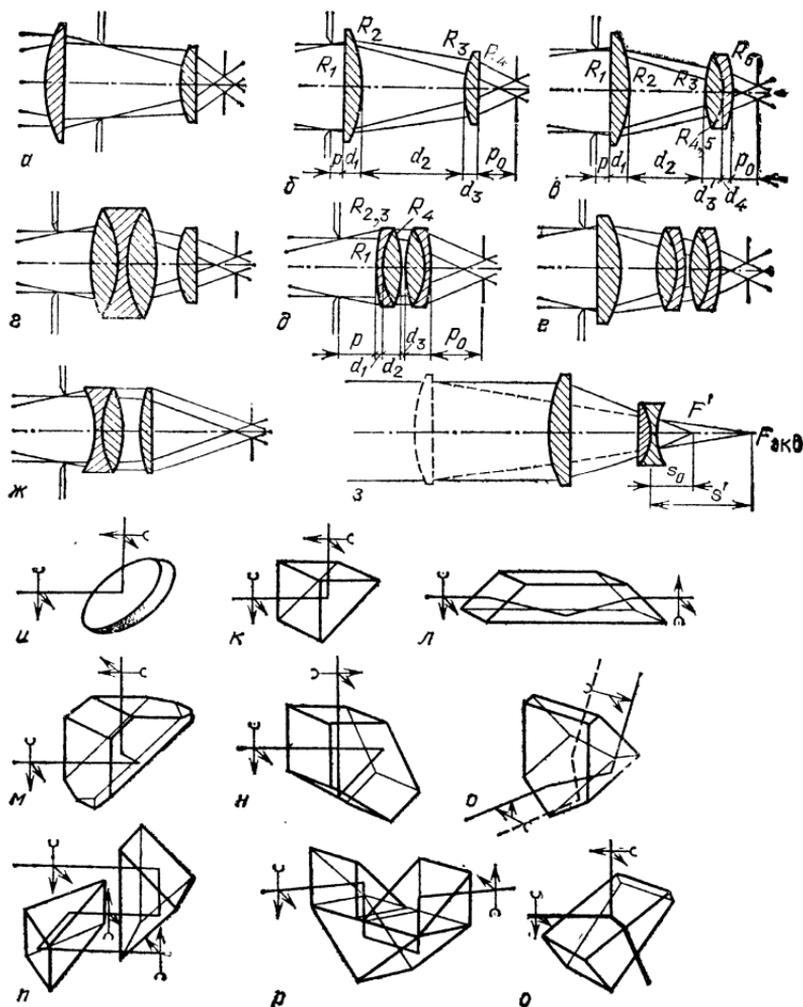


Рис. 67. Окуляры и призмы. Окуляры: *а* — Гюйгенса, *б* — Рамсдена, *в* — Кельнера, *г* — ортоскопический, *д* — симметричный, *е* — Эрфле, *ж* — с вынесенным вращком, *з* — действие линзы Барлоу; зеркало и призмы: *и* — эллиптическое зеркало, *к* — призма $AP=90^\circ$, *л* — призма Довё $AP=0^\circ$, *м* — призма Амичи (призма с крышей) $AKP=90^\circ$, *н* — пентапризма $BP=90^\circ$, *о* — призма Шмидта (с крышей) $BKP=45^\circ$, *п* — призма Порро 1-го рода (две призмы $BP=180^\circ$), *р* — призма Порро 2-го рода (две призмы $AP=90^\circ$ и одна $BP=180^\circ$), *с* — призма Гершеля

Отношения фокусных расстояний первой и второй линз и расстояния между ними для окуляра Гюйгенса равно $f_1 : d : f_2 = 4 : 3 : 2$. Для окуляра Доллонда, имеющего ту же оптическую схему, это отношение выбрано равным $3 : 2 : 1$. Эквивалентное фокусное расстояние окуляра выбирается равным $f_c = \frac{3}{2} f_2$. При таких отношениях хроматизм увеличения равен нулю, но сферическая aberrация на оси окуляра (в центре поля) велика, особенно при относительных отверстиях $1/6—1/8$. Это как раз наиболее ходовые относительные отверстия, которые любители применяют в своих телескопах Ньютона. Наилучший результат получается при выходных зрачках 1 мм и больше, т. е. при больших увеличениях. В наше время окуляр Гюйгенса используется в микроскопах. Диафрагма поля зрения расположена внутри окуляра в переднем фокусе второй (глазной) линзы. Поле зрения окуляра до 45° .

Окуляр Рамсдена (рис. 67, б). Две плоско-выпуклые линзы этого окуляра обращены друг к другу выпуклыми сторонами. Отношение $f_1 : d : f_2 = 1 : 1 : 1$. Фокусные расстояния обеих линз одинаковые, а расстояние между ними (расстояние между соседними главными плоскостями или, иначе говоря, расстояние между вершинами линз) равно фокусному расстоянию линзы. В этом случае окуляр обладает минимальными aberrациями, но выходной зрачок совпадает с глазной линзой. Поэтому расстояние d выбирается меньше, обычно $0,7f$, тогда отношение $f_1 : d : f_2$ принимает вид $1 : 0,7 : 1$, а эквивалентное фокусное расстояние окуляра в этом случае равно $f_c = 0,77f_1$.

Хроматизм увеличения окуляра велик, но сферическая aberrация примерно в 8 раз меньше, чем у окуляра Гюйгенса. Поэтому окуляр хорош со сравнительно светосильными объективами и зеркалами $A = 1/6 \div 1/8$. Но при еще большей светосиле и выходных зрачках больше 2 мм он работает значительно хуже.

Диафрагма поля расположена перед первой линзой в переднем фокусе окуляра. Угловой диаметр поля 40° . Окуляр Рамсдена принадлежит к числу недорогих, у которых aberrации (как и у окуляра Гюйгенса) исправлены неполностью. Но все-таки он достаточно хорош, чтобы его использовали и любители и профессионалы.

Окуляр Кельнера (рис. 67, в). Это усовершенствованный окуляр Рамсдена. Его глазная линза ахроматизирована. При относительном отверстии объектива телескопа $1/6$ и выходных зрачках не более 3 мм сферическая aberrация и хроматизм на оси окуляра равны нулю. Окуляр приме-

няется в биноклях, зрительных трубах, микроскопах. Это один из самых распространенных окуляров. Его поле $40-45^\circ$.

Ортоскопический окуляр (рис. 67, *з*). Для астрономических целей это наиболее подходящий окуляр. При $A=1/20 \div 1/6$ и зрачках не более 4 мм окуляр свободен на оси от сферической и хроматической аберраций. Он свободен, кроме того, и от дисторсии. Его выходной зрачок вынесен, и окуляр удобен при наблюдениях с большими увеличениями. Астигматизм и кривизна поля ограничивают поле зрения до $45-50^\circ$.

Симметричный окуляр или окуляр Плессла (рис. 67, *д*). Это также один из наиболее совершенных окуляров и, что особенно важно, он хорошо работает при $A=1/6$ и больших со зрачками от 1 до 4 мм. Этот окуляр один из самых распространенных, так как его серийное производство просто. Обе его склеенные компоненты совершенно одинаковы. Он часто используется в оборачивающих системах зрительных труб и для окулярной проекции. Выходной зрачок вынесен далеко, поле 50° .

Окуляры Эрфле. Это целое семейство высококачественных широкоугольных окуляров. Один из них изображен на рис. 6, *е*. Как видим, это дальнейшее усовершенствование окуляра Кельнера. Поле зрения окуляров Эрфле $62-65^\circ$.

Окуляр с вынесенным зрачком (рис. 67, *ж*) интересен тем, что благодаря отрицательной первой компоненте его выходной зрачок вынесен значительно дальше, чем у других окуляров того же фокусного расстояния. Этот окуляр особенно удобен как короткофокусный для больших увеличений, когда у других окуляров выходной зрачок расположен слишком близко к последней линзе. Диаметр поля окуляра $45-50^\circ$.

Вопрос о вынесении выходного зрачка как можно дальше для короткофокусных окуляров — один из наиболее трудных для конструктора. Наблюдателю крайне неприятно наблюдать с окуляром, к которому глаз приходится придвигать так близко, что роговица касается линзы. С другой стороны, если глаз отодвинуть немного дальше, резко сокращается поле зрения.

В 1828 г. Питер Барлоу предложил перед окуляром разместить отрицательную линзу примерно того же диаметра, что и линзы окуляра. Эта линза уменьшает сходимость пучка, благодаря чему увеличивается эквивалентное фокусное расстояние системы «объектив — линза Барлоу»

(рис. 67, е). Как видно из рисунка, увеличение линзы Барлоу равно $M = s_1/s_0$. Нередко спрашивают, почему мы говорим об увеличении отрицательной линзы. Не нужно забывать, что в данном случае имеется в виду не увеличение линзы, а увеличение эквивалентного фокусного расстояния телескопа, благодаря чему возрастает масштаб изображения в эквивалентном фокусе.

Линза Барлоу в нашей стране серийно применяется в телескопах «Алькор» и «Мицар», а также в некоторых геодезических инструментах (теодолитах, нивелирах и т. п.) в механизме внутренней фокусировки. Очень важно то, что изменяя расстояние между линзой Барлоу и объективом, мы можем изменять эквивалентное фокусное расстояние, а вместе с ним и увеличение телескопа с одним и тем же окуляром.

Линза Барлоу — отрицательная линза, и нам нужно знать, как определить ее фокусное расстояние. Простой и достаточно точный способ заключается в том, что мы направляем линзу на Солнце и наблюдаем позади нее на экране круг рассеянных лучей. Он тем больше, чем дальше линза от экрана. В тот момент, когда диаметр светового круга в точности равен удвоенному световому диаметру линзы, она находится от экрана точно на своем фокусном расстоянии.

Рассмотрим конкретный пример расчета увеличений с линзой Барлоу. Предположим, что фокусное расстояние линзы равно $f_b = -30$ мм. Знак минус, как мы помним, означает, что линза отрицательная. Предположим также, что мы хотим, чтобы увеличение телескопа возросло в два раза. Это значит, что зеркало с фокусным расстоянием, например, 1200 мм будет иметь эквивалентное фокусное расстояние вместе с линзой Барлоу 2400 мм. Тогда с теми же окулярами мы получим увеличения вдвое больше. Так, окуляр с фокусным расстоянием 10 мм дает увеличение с нашим зеркалом $120\times$, а с линзой Барлоу — $240\times$.

Решая формулу фокусного расстояния системы, приведенную в начале параграфа, относительно d , получим

$$d = \frac{-f_1(-f_2) - f_c(f_1 - f_2)}{f_c} = \frac{-1200 \cdot (-30) + 2400 \cdot (1200 - 30)}{2400} = 1185 \text{ мм.}$$

Мы получили расстояние между зеркалом и линзой Барлоу. Расстояние же линзы от фокуса зеркала будет равно $1200 - 1185 = 15$ мм.

Приближим линзу Барлоу к фокусу зеркала, соответственно отодвинув ее от самого зеркала, например, на 2,5 мм. Тогда расстояние между зеркалом и линзой станет 1187,5 мм. Снова решим предыдущее уравнение и определим эквивалентное фокусное расстояние. Оно будет равно 2057 мм, а увеличение линзы Барлоу станет приблизительно 1,7 раза. Отодвинув линзу от фокуса (сблизив ее с зеркалом) на 2,5 мм в сравнении с первым случаем, мы получим фокусное расстояние системы равным 2880 мм, а увеличение линзы 2,4^x.

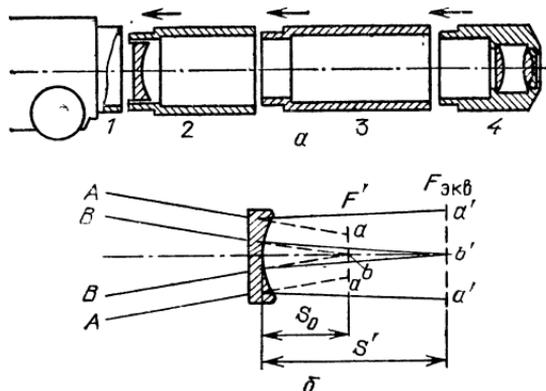


Рис. 68. Оправа линзы Барлоу (а) и определение ее диаметра (б): 1 — фокусирующая трубка, 2 — трубка с линзой Барлоу, 3 — трубка-вкладыш, 4 — окуляр

Это хорошая идея для легкого получения переменного увеличения с линзой Барлоу и одним окуляром. Установив линзу в трубке для какого-то одного увеличения, мы можем сделать дополнительную трубку-вкладыш или даже несколько таких трубок. Вставляя их между трубкой линзы Барлоу и окуляром (рис. 68, а), мы сможем изменять расстояние между линзой и окуляром. Чтобы вычислить эти расстояния, воспользуемся простыми формулами (см. рис. 67, з и 68, б)

$$s_0 = \frac{f(M-1)}{M} \quad \text{и} \quad s' = f(M-1),$$

где s_0 — расстояние линзы Барлоу от фокуса зеркала (или объектива), s_1 — расстояние линзы Барлоу от эквивалентного фокусного расстояния, M — масштаб увеличения, который нам хотелось бы получить.

Как определить диаметр линзы Барлоу? Сначала надо определить линейный диаметр поля зрения самого слабого

окуляра, который еще будет использоваться с линзой Барлоу. Обычно это средний по увеличению окуляр. Предположим, что его поле (диаметр полевой диафрагмы) равно 20 мм, а линза Барлоу дает двукратное увеличение. Это значит, что когда мы расположим окуляр в эквивалентном фокусе, диаметр соответствующего поля в главном будет вдвое меньше, т. е. 10 мм. Построим в масштабе положение линзы Барлоу, окуляра, главного и эквивалентного фокусов и диаметры соответствующих полей. Тогда, начертив крайние лучи, еще приходящие на край эквивалентного поля, мы определим и необходимый диаметр линзы (рис. 68, б). Это делается так же, как и при определении диаметров вторичных зеркал кассегреновских телескопов (§ 1 главы четвертой).

Нужно заметить, что многие окуляры сконструированы для использования с ахроматическими объективами с относительным отверстием около $1/15$. Это значит, что, используя линзу Барлоу, мы тем самым ставим окуляр в более выгодное положение, снижая не только хроматизм, но и другие aberrации.

Владельцы «Алькоров» и «Мицаров» могут проделать поучительный опыт. Нужно спроецировать солнечное изображение на белый экран сначала с помощью окуляра, а затем с помощью линзы Барлоу. Даже хорошо скоррегированные окуляры «Мицара» дают голубую кайму по краю солнечного диска (хроматизм увеличения). Изображение, построенное линзой Барлоу, по тем же причинам даст розовую кайму. Хроматизм окуляра и линзы Барлоу противоположен по знаку и примерно равен по абсолютной величине. Теперь спроецируем изображение Солнца совместно с помощью окуляра и линзы Барлоу, и мы увидим четкий, практически без окраски, край солнечного диска.

Линза Барлоу компенсирует aberrации окуляра, и изображение становится лучше *).

Со сложными хорошо исправленными окулярами нужно использовать ахроматическую линзу Барлоу. Ее положительная линза делается из стекла «флинт», а отрицательная из «крона». Расчет ахроматов можно найти в § 5 главы первой. Если удалось достать или изготовить простую линзу Барлоу (лучше из «крона»), то использовать ее нужно с простым окуляром, например, с окуляром Рамдена. Тогда aberrации линзы и окуляра будут в значительной степени компенсированы.

*) Вопреки распространенному мнению, будто она портит изображение, Нет ничего проще, чем проверить это на практике.

Вообще при увеличении M меньше $2\times$ можно в любом случае пользоваться одиночной линзой из «крона». Только при больших увеличениях линзы Барлоу нужен ахромат.

§ 5. КАК СДЕЛАТЬ ЛИНЗЫ ДЛЯ ОКУЛЯРА ИЛИ ЛИНЗУ БАРЛОУ?

Приводимая здесь табл. 18 содержит конструктивные элементы трех окуляров. Чтобы получить окуляр с другим фокусным расстоянием, нужно все размеры пропорционально изменить. Например, для окуляра с $\phi=20$ мм все размеры нужно удвоить.

Т а б л и ц а 18

Конструктивные элементы окуляров (см. рис. 67, б, в, д)

Окуляр Рамсдена	Окуляр Кёльнера
$R_1 = \infty$ $R_2 = -6,97$ $R_3 = +6,97$ $R_4 = \infty$ $\phi_{\text{ок}} = 10,0$ $d_1 = 1,42$ (К8) $d_2 = 8,79$ $d_3 = 0,93$ (К8) $p = 2,55,$ $p_0 = 2,87$ $f_1 = f_2 = 13,5$	$R_1 = \infty$ $R_2 = -9,772$ $R_3 = +9,296$ $R_4 = -5,284$ $R_5 = -23,904$ $\phi = 10,0$ $d_1 = 2,12$ (К8) $d_2 = 6,75$ (воздух) $d_3 = 2,64$ (К8) $d_4 = 0,68$ (Ф2) $p = 3,02,$ $p_0 = 4,51$

Симметричный окуляр	
$R_1 = +30,028$	$d_1 = 0,664$ (Ф2)
$R_2 = +9,196$	$d_2 = 2,664$ (К8)
$R_3 = -12036$	$d_3 = 0,168$ (воздух)
$R_4 = +12,036$	$d_4 = 2,644$ (К8)
$R_5 = -9,196$	$d_5 = 0,644$ (Ф2)
$R_6 = -30,028$	$p = 7,68, p_0 = 7,68$
$\phi = 10,0$	

Заготовка для линз вырезается трубчатым сверлом вручную или на сверлильном станке с минимальной скоростью вращения. Если нет специальных марок стекла, можно положительные линзы окуляров Гюйгенса, Рамдена, Кёльнера и др., а также линзу Барлоу вырезать из обычного оконного стекла. Все подробности вырезания остаются теми же, что и при вырезании заготовки главного зеркала: грубый абразив, пластилиновый бортик, подклеивание предохранительного листа стекла на выходе сверла и т. п.

При сверлении центробежные силы могут отломить сверло от его хвостовика, если они не соосны. Масса сверла должна быть минимальной — минимальная толщина стенок (1—2 мм), минимальная высота (на 2—3 мм больше толщины стекла), толщина основания (дна) 3—4 мм, но максимальный диаметр хвостовика для данного патрона станка.

Из латуни, бронзы или другого металла выточим ступенчатый шлифовальник (рис. 69, б). Для протачивания вогнутых шлифовальников предварительно в его центре просверливается углубление диаметром 1—3 мм и глубиной немного больше стрелки кривизны. Чтобы шлифовальник не соскакивал с поводка, сделаем специальную шайбу с отверстием, которая будет удерживать шлифовальник на поводке (рис. 69, б).

Мелкие линзы можно шлифовать и на простейшем поворотном столе (см. рис. 32), но лучше сделать простой вертикальный шпиндель (рис. 69, а) с двигателем 25—50 Вт и с ремённой передачей. Впрочем, для небольшого станка достаточно резинового пассика. Все это установлено в ящике, снабженном цилиндрическим бортиком, защищающим станок от грязи и на котором крепится шарнир рычага с поводком.

Выточим оправку для крепления заготовки линзы (рис. 69, в). Она имеет бортик высотой примерно 2 мм с тремя или четырьмя радиальными прорезями. При наклеивании заготовки кладем кусочек смолы на торец и нагреваем. Когда смола расплавится, прижимаем к бортику заготовку. Излишки смолы вытекают через прорези. Таким образом, заготовка оказывается строго фиксированной на оправке.

Если обрабатывается выпуклая поверхность линзы, то заготовка устанавливается на шпиндель, а если вогнутая — на поводок. Чтобы не срезать шлифовальник при обдирке, выпуклую линзу предварительно обдерем на

наждачном круге заточного станка. Шлифовку начинаем микропорошком М40. Убедившись в том, что неровности после обдирки сглажены, переходим к М20, а через 10—20 мин к М10.

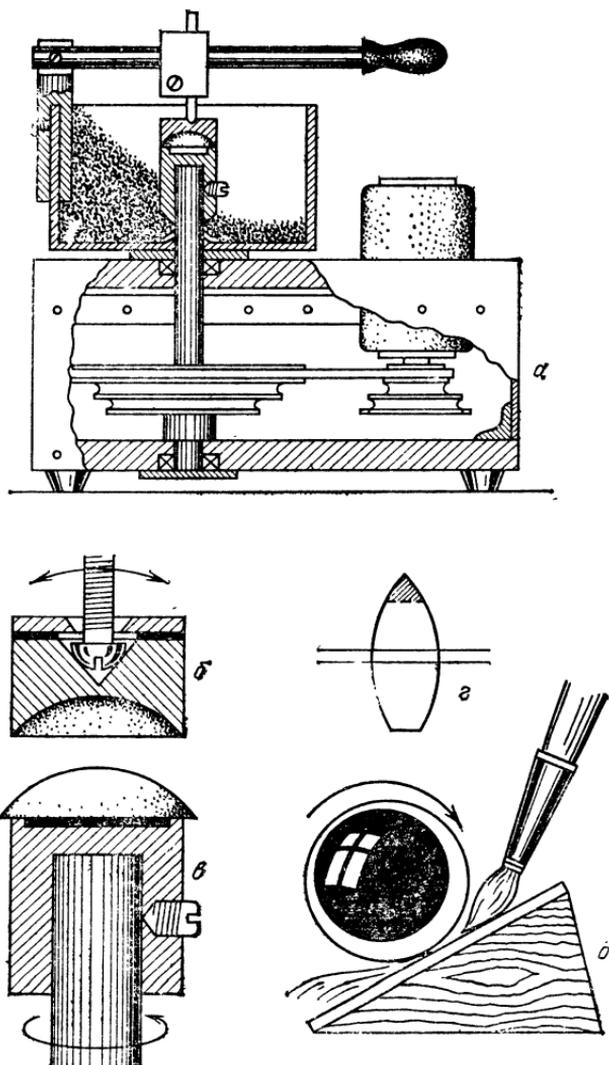


Рис. 69. Шлифовка линз для окуляров: *a* — вертикальный шпindelъ, *б* — шлифовальник на поводке, *в* — оправка для крепления линзы, *г* — несовпадение геометрической и оптической осей линзы, *д* — приспособление для кругления линз

Закончив шлифовку, обычным образом формуем полировальник из смолы. Из-за больших скоростей и давления смолу нужно взять самую твердую. Если ее нет, добавим в расплав канифоли, чтобы ее стало 80—90 % по весу. Можно смолу просто прокипятить. Во время полировки каждые 2—3 минуты даем смоле остыть и одновременно формуем полировальник на линзе. Подобным образом шлифуется и полируется плоская сторона линзы.

Не вдаваясь в подробности, отметим, что точность поверхностей линз для окуляра может быть очень низкой, и поэтому полировку ведем без контроля формы. Это ни в коей мере не относится к линзе Барлоу, поверхности которой должны быть сделаны с точностью не ниже $(3-5)\lambda$, ни тем более к линзам проекционных систем, например окулярной камеры, где точность поверхностей линз должна быть около $\lambda/2$.

После завершения шлифовки и полировки оптическая и геометрическая оси линзы могут не совпадать (рис. 69, *з*), поэтому придется сделать кругление линзы. Наклеим смолу линзу на оправку, установленную на вертикальном шпинделе, и сразу, не давая смоле затвердеть, повернем от руки шпиндель, наблюдая за двумя отражениями лампы на обеих поверхностях линзы. Если оптическая ось не совпадает с осью шпинделя, то блики будут при повороте смещаться относительно друг друга. Сместим линзу несколько раз поперек оси в разных направлениях, одновременно наблюдая за бликами. Как только они станут неподвижными относительно друг друга, линза центрирована.

Теперь нужно сошлифовать ее асимметричный выступ. Наклоним станок и, включив его, подведем к линзе латунную пластинку на треугольном основании (рис. 69, *д*). Смочив пластинку и подсыпав абразива № 6, осторожно подведем ее к линзе. Линза начнет стучать и одновременно будет сошлифовываться ее выступающий край. Будем медленно продвигать пластинку в направлении к центру линзы. Через некоторое время линза перестанет стучать, но ее диаметр может оказаться несколько больше расчетного. Тогда, измеряя время от времени штангенциркулем диаметр, продолжим кругление.

В свое время автор, отшлифовавший немало зеркал, был потрясен тем, что линзу для окуляра можно сделать всего за вечер, а если все подготовлено и есть минимальный навык, то можно сделать и пару линз. Если у вас есть заготовки из флинта, можно попытаться сделать и ахро-

матические линзы для более сложных окуляров. Ничего особенно сложного в этом нет.

Ахроматически линзы обычно склеиваются, так как цельную «склейку» легче монтировать и кроме того, потери на отражение значительно снижаются. Склеивают линзы бальзамом, который лучше канадского бальзама, но его сравнительно трудно достать, или канадским бальзамом, который можно купить в магазинах «Химреактив».

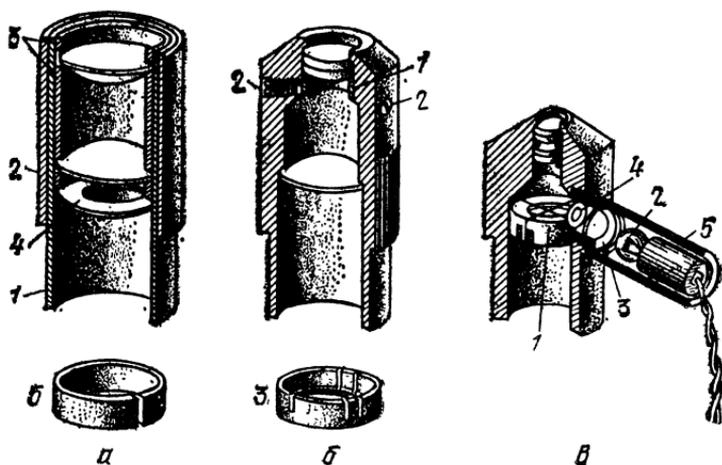


Рис. 70. Конструкция оправ окуляров: *а* — окуляр в картонной трубке, 1 — картонная трубка, 2 — слой бумаги, 3 — трубки-вкладыши, 4 — полевая диафрагма, 5 — пружинящее кольцо; *б* — окуляр в точеной металлической оправе, 1 — колечко, 2 — винт, 3 — кольцо; *в* — окуляр с освещенным крестом нитей, 1 — сетка (перекрестие), 2 — лампочка, 3 — светофильтр, 4 — диафрагма, 5 — трубка

Несколько кусочков бальзама кладут в небольшую пробирку и ставят ее в металлическую кружку, наполненную водой. Нагревают на плите воду до кипения. В этот момент бальзам готов к употреблению. Одновременно на конфорку, включенную на малую мощность, кладут кусочек дощечки толщиной в несколько миллиметров. На эту прокладку укладывают линзы. После того как они нагрелись до 60—70 °С, капают небольшую каплю на вогнутую поверхность одной из линз. Уложив на нее вторую линзу, сильно сжимают их обе, не опасаясь того, что поверхности окажутся запачканными бальзамом. Внимательно следят за тем, чтобы бальзам на склеиваемых поверхностях быстро и равномерно без пузырьков воздуха

заполнял всю поверхность. Сразу, как только бальзам растечется и его излишки будут выдавлены, кладут склейку остывать. Затвердевшие излишки бальзама на торце линз скалывают ножом, а всю линзу тщательно протирают скипидаром. Когда не останется следов бальзама, линзу моют с мылом и протирают спиртом. Окончательно, еще до высыхания спирта, линзу споласкивают водой.

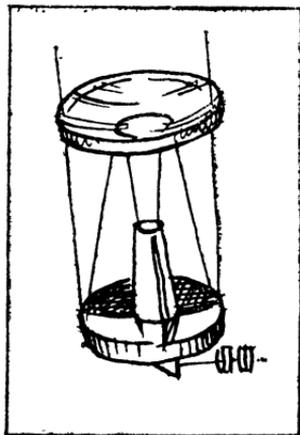
Сделанные самостоятельно или приобретенные линзы нужно установить в оправе. Рис. 70 показывает несколько вариантов оправ для окуляров. На худой конец оправка может быть сделана из бумаги, склеенной эпоксидной смолой. Но лучше ее выточить из твердого алюминия на токарном станке. Перед установкой линз на место оправку нужно внутри выкрасить черной матовой краской и дать ей в течение суток высохнуть, иначе линзы будут запотевать изнутри.

СЛОЖНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

§ 1. РЕФЛЕКТОРЫ ГРЕГОРИ И КАССЕГРЕНА

В строительстве грегорианского или кассегреновского телескопов (рис. 71) есть странное и удивительное очарование, которое делает осуществление этого проекта мечтой каждого любителя телескопостроения. Нельзя сказать, что эти телескопы имеют явно выраженные преимущества перед «ньютоном». Говорят, кассегреновский телескоп компактнее ньютоновского. Да, если главные зеркала обоих телескопов одинаковые, то «кассегрена» на 20—25 % короче «ньютона». Но эта компактность дается ценой многократно усложненной технологии. В то же время лишь немногим усложнив себе задачу, мы сможем сделать ньютоновский телескоп короткофокусным на те же 20—25 %.

Говорят, что меньшее относительное отверстие позволяет обойтись без короткофокусных окуляров, но в-первых, линза Барлоу решает ту же задачу значительно проще и изящнее, а во-вторых, имея кассегреновский или грегорианский телескоп с относительным отверстием $1/15$ — $1/20$, вы никогда не сможете сделать приличный снимок туманности или кометы.



У телескопа Грегори есть два преимущества перед телескопом Кассегрена. Его вторичное зеркало — вогнутый эллипсоид, изготовление которого значительно проще изготовления кассегреновского вторичного зеркала. С методикой испытаний вогнутых эллипсоидов мы уже знакомы. Во-вторых, «грегори» дает неперевернутое изображение и удобен не только для наблюдений неба, но и земных объектов.

В то же время при одинаковых главных зеркалах телескоп Кассегрена примерно в полтора раза короче. Кроме того, при одинаковых главных зеркалах относительное отверстие грегорианского телескопа в полтора раза меньше.

Вторичные зеркала обоих телескопов увеличивают фокусное расстояние главного зеркала в несколько раз.

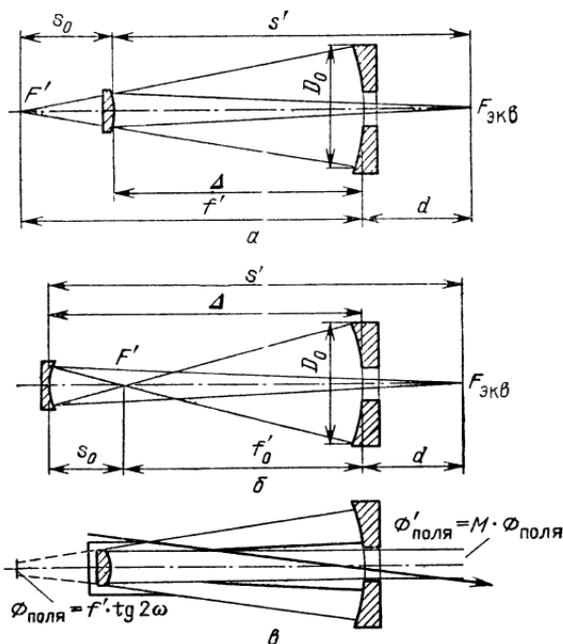


Рис. 71. Схемы телескопов Кассегрена и Грегори: а — «кассегрен», б — «грегори», в — расчет бленд

Кассегреновское вторичное зеркало отрицательное и действует подобно линзе Барлоу, а грегорианское — положительное и действует наподобие окулярной камеры.

Увеличение фокусного расстояния (фактор увеличения) на вторичном зеркале равно

$$M = \frac{s_1}{s_0}.$$

Часто пользуются обратной величиной

$$\beta = \frac{1}{M} = \frac{s_0}{s_1}$$

(обозначения см. на рис. 71). Отношение $\alpha = f'_0/s_0$ характеризует положение вершины вторичного зеркала на оптической оси и называется *фактором положения*. Обычно α выбирается в пределах 3—5. Чем меньше расстояние между вершинами обоих зеркал, тем меньше (при прочих равных условиях) фактор увеличения на вторичном зеркале и меньше эквивалентное фокусное расстояние. Одновременно растет диаметр вторичного зеркала.

Радиус кривизны вторичного зеркала «касрегена» и «грегори» можно определить по формуле Гаусса

$$R_2 = 2f_2 = \frac{2s_0s_1}{s_0 + s_1} \quad (\text{для «грегори»})$$

и

$$R_2 = \frac{2s_0s_1}{s_1 - s_0} \quad (\text{для «касрегена»})$$

или по формуле

$$R_2 = \frac{R_1}{\alpha(1 - 1/M)}.$$

Рассмотрим конкретный пример расчета телескопа Касрегена, помня, что расчет рефлектора Грегори проводится аналогичным образом.

Предположим, что нам нужно рассчитать касрегеновский телескоп с главным зеркалом диаметром 250 мм. С целью уменьшить габариты телескопа выберем относительное отверстие главного зеркала 1/4. Тогда фокусное расстояние главного зеркала равно $f'_0 = 250 \times 4 = 1000$ мм, а радиус кривизны при вершине $R = 2 \times 1000 = 2000$ мм. Выберем $\alpha = 4$. Тогда расстояние вершины вторичного зеркала от фокуса главного равно $s_0 = 250$ мм, а расстояние между зеркалами $d = 750$ мм. Допустим, что нам удобно вынести по конструктивным соображениям фокус всей системы на $\Delta = 260$ мм за вершину главного зеркала. Тогда $s_1 = 750 + 260 = 1010$ мм, а $M = 4,04$. Эквивалентное фокусное расстояние всей системы $f_{\text{ЭКВ}} = 4,04 \times 1000 = 4040$ мм. Относительное отверстие системы равно $A_{\text{ЭКВ}} = 1/(4,04 \times 4) = 1/16,16$.

Определим радиус кривизны вторичного зеркала по формуле Гаусса. Он равен $R_2 = \frac{2 \times 250 \times 1010}{250 - 1010} = 664,5$ мм.

Погрешность в вычислении радиуса кривизны вторичного зеркала может привести к неприятностям. Поэтому проверим эту величину по другой формуле:

$R_2 = \frac{2000}{4(1-1/4,04)} = 664,5$ мм. Очевидно, что $f_2 = -R_2/2 = -332,3$ мм. Для шлифовки вторичного кассегреновского зеркала потребуется вогнутый шлифовальный, а для шлифовки вогнутого грегорианского зеркала — выпуклый.

Диаметр вторичного зеркала определяется его положением на оптической оси. Он равен $D_2 = D : \alpha$. Подобно тому, как это было при выборе размеров ньютоновой «диагонали», здесь также нужно помнить о виньетировании. Проще всего определить диаметр вторичного зеркала без виньетирования графически на чертеже. Для этого нанесем в фокусе главного зеркала размер диаметра поля зрения главного зеркала телескопа (рис. 71, в). В угловой мере он обычно составляет примерно $2\omega = 45'$. Умножив фокусное расстояние главного зеркала на тангенс угла поля зрения 2ω , получим $\varnothing_{\text{поля}} = f_0 \text{tg } 2\omega$. В нашем случае это будет равно $\varnothing_{\text{поля}} = 1000 \times 0,026 = 26$ мм. Отложим на чертеже по 13 мм вверх и вниз от оси и соединим точки с краями зеркала. Точки пересечения этих отрезков со вторичным зеркалом покажут его размеры. Падение освещенности в результате виньетирования так мало, что практически диаметр вторичного зеркала в нашем случае можно брать от 65 до 71 мм, но не меньше $D_2 = 250 : 4 = 62,5$ мм.

Очевидно, что оба телескопа совершенно свободны от хроматической и сферической aberrаций. Кома рефлекторов Кассегрена и Грегори в точности равна коме параболического зеркала, имеющего тот же диаметр и то же фокусное расстояние, что и эквивалентное фокусное расстояние системы Кассегрена или Грегори.

Астигматизм «грегори» и «кассегрена» больше астигматизма ньютоновского параболоида и тем больше, чем больше фактор увеличения на вторичном зеркале. С ростом фактора увеличения на вторичном зеркале растет и кривизна поля обеих систем.

§ 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИКИ КАССЕГРЕНОВСКИХ И ГРЕГОРИАНСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

Строительство телескопов Кассегрена, Грегори и их модификаций — дело слишком сложное для начинающих. Поэтому за эти системы можно браться, имея достаточный опыт. Мы предполагаем, что у читателя четвертой главы этот опыт есть и не описываем многие подробности, известные читателю из его практики.

Обработка главных параболических зеркал обеих систем ничем не отличается от обработки параболического зеркала для ньютоновского телескопа, кроме того, что эти зеркала имеют центральное отверстие, через которое отраженный вторичным зеркалом свет попадает в окуляр. Если бы не эффект Тваймана, который приводит к короблению зеркала после вырезания в нем отверстия, сверлить отверстия можно было бы после завершения фигуризации. В действительности их сверлят до полировки и даже во время грубой обдирки.

Отверстие вырезаем с помощью трубчатого сверла, которое имеет наружный диаметр, равный внутреннему диаметру отверстия. Толщина стенок сверла 1—2 мм. Чтобы во время сверления сверло не сместилось в сторону, к поверхности зеркала смолой приклеиваем выточенное из металла или другого материала кольцо с внутренним диаметром на 1 мм больше наружного диаметра сверла. Чтобы предотвратить сколы при выходе сверла из заготовки, с обратной стороны смолой наклеим кусок стекла размером на 2—3 см больше диаметра отверстия.

Вокруг будущего отверстия сделаем бортик из пластилина высотой примерно 1 см. Нальем немного воды и насыплем несколько граммов крупного абразива. Установим сверло, на него — груз в 4—5 кг. Вращая сверло ручками из стороны в сторону, начинаем сверление. За 1 час ручного сверления сверло проходит 5—8 мм.

Можно ускорить сверление, если сверло установить в сверлильном станке. Во время сверления стекло разогреется, поэтому каждые 5—10 с сверло несколько приподнимаем, не останавливая станка. Вода быстро перемешиваясь, охлаждает стекло и заодно хорошо взбалтывает абразив, так что в канавку все время поступает новый абразив и вымывается отработанный. Не нужно применять больших скоростей при сверлении.

После завершения сверления вынимаем образовавшуюся стеклянную пробку из отверстия и снова вклеиваем ее с помощью гипса или воска на место. Это делается для того, чтобы облегчить фигуризацию зеркала, ведь со вклеенной пробкой зеркало будет обрабатываться как сплошное. Гипс должен иметь консистенцию сметаны. Его нужно быстро залить в щель и дать затвердеть. После завершения обработки зеркала этот гипс удаляется металлическим стержнем, и пробка окончательно вынимается. Гипс после затвердевания несколько расширяется, и это может покоробить зеркало. Поэтому лучше применять воск.

Иногда поступают иначе. Отверстие сверлят с тыльной стороны, но не до конца, не доходя до лицевой стороны 2—3 мм. Пробка на протяжении всей обработки остается на своем месте, а после завершения фигуризации отверстие досверливается с лицевой стороны. Еще лучше надсверлить отверстие с обеих сторон, оставив нетронутым

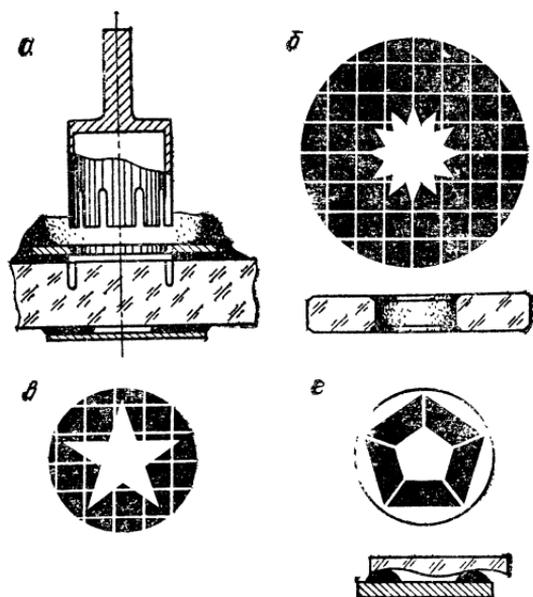


Рис. 72. Изготовление оптики телескопов Кассегрена и Грегори: *а* — вырезание центрального отверстия глазного зеркала; *б* — полировальник для зеркала с центральным отверстием, *в* — полировальник для вторичного кассегреновского зеркала, *г* — кольцевой полировальник для вторичного зеркала большой асферичности

участок в 4—5 мм в середине тела заготовки. Чтобы канавка в стекле не служила сборником грязи, ее нужно залить гипсом или воском.

Можно обрабатывать зеркало и с удаленной пробкой. Шлифовка ведется обычным образом, а во время полировки на полировальнике в его центре удаляется смола кружком, равным диаметру отверстия (рис. 72, б). Полировка в этом случае требует дополнительного искусства.

Фигура зеркала исследуется обычным образом с помощью метода Фуко по зонам или компенсационным методом.

Заготовку для вторичного зеркала вырезаем из витринного стекла. Ее толщина должна примерно составлять для небольших зеркал $1/10$ — $1/5$ диаметра зеркала. Грубая обработка и шлифовка могут вестись на вертикальном шпинделе для обработки линз, но полировку нужно делать на малых скоростях на машине или вручную.

Иногда асферичность вторичного кассегреновского зеркала велика, и нужно быть готовым к тому, что полировальник с выдавленной звездой (рис. 72, в) окажется малоэффективным. Тогда фигуризацию придется сделать с помощью смоляного кольца на зоне примерно 50—85 % радиуса заготовки (рис. 72, г).

§ 3. ИСПЫТАНИЕ ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА ГРЕГОРИ

Вторичное грегорианское зеркало — вогнутый эллипсоид. Оно испытывается из геометрических фокусов эллипсоида, как рассказано в параграфе о нуль-тестах. Предварительно нужно получить хорошую сферическую поверхность, которая исследуется из центра кривизны. После этого собираем установку (рис. 73), устанавливая в ближнем фокусе щель, а в дальнем — нож. Положения этих фокусов определить очень просто. Вспомним, что один из фокусов грегорианского вторичного зеркала совпадает с фокусом главного параболического зеркала, а второй — с эквивалентным фокусом системы. Положение этих фокусов относительно зеркала в телескопе мы вычислили.

Нужно проследить за тем, чтобы источник и нож находились на общей оси. Для этого при наблюдении из точки тень источника должна быть точно в центре зеркала. Щель должна иметь возможность перемещаться вправо и влево и вверх и вниз. Зеркало должно быть установлено в несложной оправе, которая позволяла бы его наклонять.

Осматривая с помощью ножа сферическое зеркало, мы увидим подвернутый край. Для того чтобы получить плоский рельеф, можно углубить центральную зону. Делается это полировальником того же диаметра, что и зеркало. На нем формируется звезда. В остальном фигуризация ведется точно так же, как и фигуризация параболического зеркала. Асферичность эллипсоидов грегорианских телескопов невелика и легко получается. После окончания фигуризации эллиптическое зеркало перенесет изображение из главного фокуса без аберраций.

На первый взгляд это может показаться странным, но грегорианское зеркало в изготовлении легче плоского диагонального для рефлектора Ньютона. С одним и тем

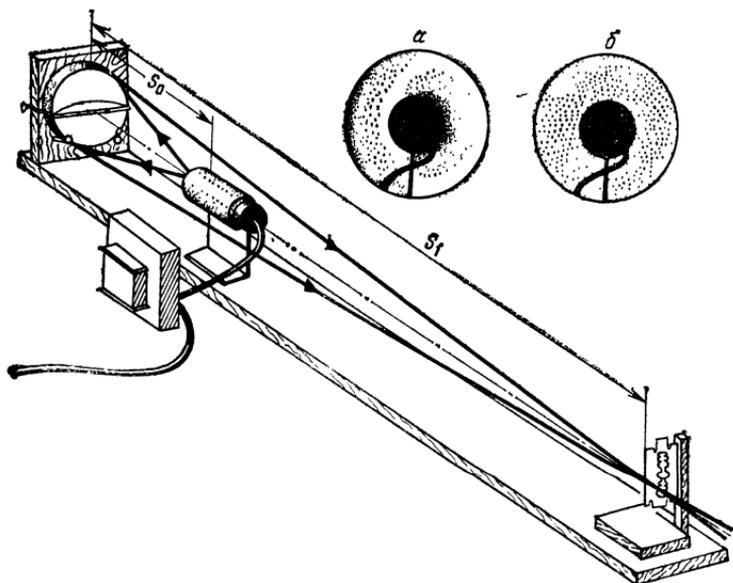


Рис. 73. Испытание вторичного зеркала Грегори из двух его фокусов

же главным зеркалом «грегори» проще «ньютон», если вся оптика и там и здесь изготавливается самостоятельно.

§ 4. ИСПЫТАНИЕ ВТОРИЧНЫХ КАССЕГРЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ

Исследование выпуклых зеркал — довольно сложное дело. Существует по крайней мере два десятка методов, и это говорит о том, что среди них нет ни одного достаточно простого и надежного.

Еще до второй мировой войны А. Керкем испытывал собранный телескоп Кассегрена по яркой планете или удаленному фонарю с помощью решетки Ронки. Но, как он отмечал, этим способом могут быть обнаружены только самые грубые дефекты оптики. Применение же ножа Фуко из-за сильной атмосферной турбулентности вообще бессмысленно.

Познакомимся с некоторыми наиболее практичными методами.

1. **Испытание с коллиматором.** Назначение коллиматора — создать параллельный пучок света. В качестве коллиматора, как и при испытании телескопа Ньютона, используется другой телескоп-рефлектор с достаточно качественной оптикой. Его диаметр должен быть не меньше диаметра испытуемого телескопа. В фокусе коллиматора устанавливается источник света (светящаяся точка или



Рис. 74. Коррекция погрешностей главного зеркала ретушью на вторичном: *а* — теневая картина системы Кассегрена 208-сантиметрового рефлектора до ретуши вторичного зеркала (слева) и после ретуши (испытание по реальной звезде с ножом Фуко, справа); *б* — 208-сантиметровый рефлектор Кассегрена обсерватории Мак-Дональд; *в* — моментальный снимок турбулентного пятна телескопа после ретуши вторичного зеркала. На снимке видны детали картины около $0,04''$. Это соответствует теоретическому пределу разрешения телескопа такого размера; *г* — Жан Тексеро ретуширует 60-сантиметровое вторичное зеркало

щель). Коллиматор оптически переносит изображение источника в бесконечность.

Главное зеркало «кассегрена» должно быть уже алюминировано и установлено на устойчивой оптической скамье вроде чикинской доски. Еще лучше, если к началу испытаний готова труба телескопа с оправами для обоих зеркал. Перед каждым сеансом испытаний зеркала должны юстироваться. В фокусе «кассегрена» устанавливается нож или решетка Ронки. В начале фигуризации на вторичном зеркале виден «бублик», похожий на рельеф параболоида при испытании из центра кривизны. «Опускающая» зону 70 % с помощью кольцевого полировальника»

или с помощью «звезды» добиваемся плоского рельефа на вторичном зеркале.

2. **Испытание в автоколлимации с плоским эталонным зеркалом** (рис. 58, в). Главное зеркало, как и в предыдущем случае, готово и алюминировано. Оно вместе со вторичным устанавливается на оптической скамье или в готовой трубе телескопа. Перед входным отверстием испытуемого телескопа устанавливается плоский эталон. В этой схеме свет дважды отражается от вторичного зеркала, поэтому

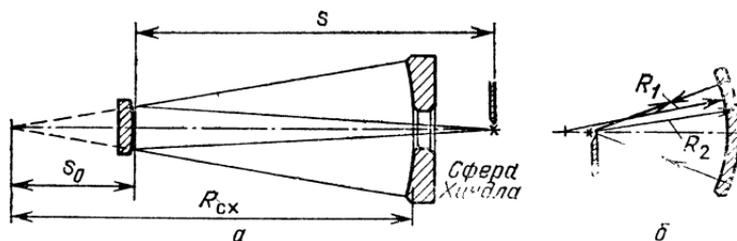


Рис. 75. Испытание вторичных зеркал кассегрена: а — метод Хиндла, б — метод Рихтера

чувствительность метода удваивается. Но вторичное зеркало еще неалюминировано и двойное отражение приводит к большим потерям света. Поэтому источник света должен быть достаточно ярким. Возможно испытание и с жидким эталонным зеркалом со всеми ранее сделанными оговорками.

Оба способа хороши тем, что оптическая схема испытывается вся сразу. Поэтому небольшие погрешности главного зеркала могут быть скомпенсированы ретушью вторичного зеркала (рис. 74).

3. **Испытание сферой Хиндла** (рис. 75, а). Джон Хиндл предложил совместить один из фокусов выпуклого кассегреновского гиперboloида с центром кривизны вспомогательного эталонного сферического зеркала. Это зеркало должно быть примерно того же диаметра, что и главное зеркало телескопа. Это неудобно, но зато вогнутая сфера проста в изготовлении и контроле и может применяться для испытаний многих выпуклых зеркал различных радиусов кривизны и эксцентриситетов.

Для юстировки схемы смотрим через отверстие в эталонном зеркале Хиндла и наклоняем вторичное, пока отражение эталона во вторичном не станет концентричным. Потом наклоняем сферу Хиндла, добиваясь концентричности отражения в ней вторичного зеркала. Фигуризация

ведется до плоского рельефа. Все три перечисленных метода удобны тем, что после завершения фигуризации мы видим во вторичном зеркале плоский рельеф, хотя для этого и требуются вспомогательные оптические детали примерно того же диаметра, что и диаметр главного зеркала «касегрена».

4. Метод Рихтера. Джон Рихтер в 1970 г. описал оригинальный метод испытаний через стекло с обратной стороны зеркала (рис. 75, б). Для этого обратная сторона зеркала должна быть отшлифована и отполирована до сферы. При испытании с тыльной стороны выпуклая поверхность зеркала становится вогнутой по отношению к теневому прибору и испытывается как обычное вогнутое асферическое зеркало [41].

Для сведения к минимуму aberrаций, возникающих при преломлении света на обратной стороне зеркала, радиус кривизны тыльной стороны должен быть чуть меньше, чем радиус рабочей стороны, чтобы их центры кривизны совпали. Иначе говоря, обе поверхности должны быть концентричны. К сожалению, в этом случае рельефы при испытании из общего центра кривизны будут видны одновременно на обеих поверхностях, и в них сложно будет разобраться. Поэтому радиус кривизны тыльной поверхности выбирается примерно на 20 % больше. Для снижения влияния хроматизма между лампой и щелью теневого прибора устанавливается цветной фильтр, лучше красный, так как наши красные фильтры более монохроматичны, чем другие.

Вогнутая поверхность тыльной стороны зеркала должна быть фигурирована до $\lambda/8$. Но полировать ее до большой чистоты необязательно. Свили и другие дефекты внутри стекла при испытании видны на теневой картине, но они мало мешают, так как по характеру резко отличаются от теневого рельефа.

Обе поверхности должны быть строго концентричны, и разница в толщине по краю не должна превышать 0,02—0,03 мм. С этой целью в ходе шлифовки нужно периодически измерять толщину детали по краю с помощью микрометра по всем азимутам.

Так как исследуемая поверхность асферична, то при испытании ее из центра кривизны возникает продольная aberrация, которую нам нужно вычислить заранее. Кроме того, центр кривизны рабочей поверхности не совпадает с центром тыльной, поэтому к продольной aberrации добавится еще некоторая величина. Обе эти величины мы

можем вычислить по формуле, приведенной Рихтером.

Сначала введем следующие обозначения:

ρ_1 — кривизна выпуклой поверхности $= 1/r_1$,

ρ_2 — кривизна обратной стороны $= 1/r_2$,

d — толщина зеркала в центре,

ρ — коэффициент кривизны $= \rho_1 - \rho_2 + \rho_1 \rho_2 d$,

n — показатель преломления стекла для используемого монохроматического света,

$P = \rho(n-1)$,

M — увеличение на вторичном зеркале (см. § 1 главы четвертой),

$Q = (M+1)^2 / (M-1)^2$,

$L = (1 - \rho_1 d) / (\rho_1 + P)$,

y — радиус испытываемой зоны.

Для главных зеркал, имеющих относительное отверстие 1/3,5 и меньше, формула продольной аберрации для определенной зоны y равна

$$\Delta S = \frac{\frac{1}{2} n Q \rho^3 + n \rho P (1 - \rho_1 d) (n \rho + \rho_1)}{(\rho_1 + P)^2} y^2.$$

Чем ближе к щели расположено ее изображение, тем точнее эта формула. В идеале нужно пользоваться теневым прибором, изображенным на рис. 55.

Предположим, что нам нужно сделать вторичное зеркало 318-миллиметрового рефлектора Кассегрена с относительным отверстием главного зеркала 1/4 и фокусным расстоянием 1270 мм. Фактор увеличения на вторичном зеркале выберем равным 4, так что эквивалентное фокусное расстояние равно 5080 мм. Вынос фокуса за вершину главного зеркала выберем равным $\Delta = 320$ мм. Тогда расстояние между вершинами зеркал равно

$$d_1 = \frac{f'_1 (f'_{\text{ЭКВ}} - \Delta)}{f'_1 + f'_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1270 (5080 - 320)}{1270 + 5080} = 952 \text{ мм.}$$

Вершина вторичного зеркала располагается тогда на расстоянии 318 мм от фокуса главного зеркала. Для удобства все размеры выразим в метрах. Тогда радиус кривизны вторичного зеркала при его вершине равен $r_1 = 0,853$ м, радиус обратной стороны $r_2 = 1,024$ м, а кривизны равны $\rho_1 = 1,1723$, $\rho_2 = 0,9766$. Если вторичное зеркало делается из пирекса (у нас ЛК5 или ЛК7), то $n = 1,48$. При толщине зеркала 15 мм (0,015 м) получим $\rho = 0,2129$, $P = 0,1022$, $Q = 2,778$ и $L = 0,771$ м.

Последняя величина представляет собой расстояние от обратной (сферической) поверхности до ножа Фуко. После подстановки всех величин в формулу продольной аберрации она упростится до $\Delta S = (2,0387 + 0,0248)y^2$. Здесь первое слагаемое — аберрация из-за асферичности гиперболической поверхности, а второе вносится сферической (тыльной) поверхностью. Первая величина в 82 раза больше, и это значит, что теневой рельеф определяется главным образом гиперболической поверхностью, а вклад тыльной стороны незначителен и тем меньше, чем меньше разница между радиусами кривизны обеих поверхностей.

В случае нашего 318-миллиметрового рефлектора диаметр вторичного зеркала равен 90 мм, и крайние лучи пересекают поверхность зеркала на расстоянии 45 мм от оптической оси. Подставим величину этой зоны в формулу, получим для первого (гиперболического) члена $0,00413 \text{ м} = 4,13 \text{ мм}$, а для второго $0,00005 \text{ м} = 0,05 \text{ мм}$. Сумма аберраций составит 4,18 мм. Это величина, на которую переместится нож при переходе от крайних зон к центральной. Подставляя другие значения радиусов зон, получим остальные значения продольной аберрации. Например, для зоны 70 % (32 мм) продольная аберрация равна 2,09 мм.

Важной особенностью предыдущих методов является то, что там исследования ведутся только для центрального пучка. Наклонные пучки не исследуются. Поэтому крайние зоны вторичного зеркала, которые работают в наклонных пучках, не исследуются. Метод Рихтера позволяет исследовать все зеркало до самого края.

Метод Рихтера наиболее прост, так как не требует никаких дополнительных оптических деталей, но удобен, если строится только один телескоп Кассегрена. Он доступен даже сравнительно малоопытным любителям.

Методом Рихтера можно испытывать выпуклые поверхности менисков. Эксцентриситет сферы равен нулю, и в формуле продольных аберраций нужно брать только второй член. Продольная аберрация в этом случае сравнительно мала.

§ 5. МОДИФИКАЦИИ ТЕЛЕСКОПОВ КАССЕГРЕНА

Система Долла — Керкэма — МаксUTOва. Трудности ре-туши и исследования вторичных гиперболических зеркал вынудили оптиков искать более простые решения. Почти одновременно американский любитель телескопостроения Алан Керкэм и английский любитель Горидж Долл ве-

зависимо друг от друга предложили модификацию «кас-сегрена» со вторичным сферическим зеркалом. В 1932 г. Британской астрономической ассоциации был продемонстрирован уже построенный телескоп этой системы. Его главное зеркало имело 150 мм в диаметре, эквивалентное фокусное расстояние было равно 1980 мм, относительное отверстие главного зеркала $1/3,2$. В 1922 г. Д. Д. Максудов, исследуя двухзеркальные системы, среди прочих выделил и эту. Опубликовать работу ему удалось только в 1932 г. Сейчас эта система носит название Долла — Керкэма — Максудова.

Для получения стигматического (точечного) изображения звезды на оси главное зеркало должно быть не параболическим, а эллипсоидальным*). Квадрат его эксцентриситета и асферичность примерно в 1,5 раза меньше, чем у эквивалентного параболоида. Эллиптическое зеркало значительно проще в изготовлении, а вторичное сферическое может испытываться интерференционным способом в помощью вогнутой сферы того же радиуса, сделать которую совсем нетрудно. Но и при испытаниях с коллиматором вторичное зеркало проще, так как не требуется ретушь до гиперболоида.

Квадрат эксцентриситета главного эллиптического зеркала равен

$$e_1^2 = 1 + \frac{(\beta - 1)(\beta + 1)^2}{\alpha},$$

где β — величина, обратная фактору увеличения на вторичном зеркале, $\beta = 1/M$, α — фактор положения вторичного зеркала.

К сожалению, у «долла—керкэма—максудова» большая кома — она равна

$$3\rho = -\frac{3}{4} \frac{[1 - 2\beta^2 - \alpha + e_1^2(\alpha - 1)]}{8\beta^2} A^2\omega \text{ (рад)}.$$

Чтобы величину комы перевести в линейную меру, нужно умножить ее на величину эквивалентного фокусного расстояния.

Как видно из формулы, чем меньше значение α и больше значение β (M — меньше), тем меньше и кома системы. Кроме того, кома уменьшается с уменьшением относительного отверстия системы. Рассмотрим конкретный пример. 250-миллиметровый телескоп Долла — Керкэма — Максудова с относительным отверстием главного зеркала $1/8$

*) Об испытаниях вогнутых эллипсоидов см. § 30 главы второй.

с фактором увеличения на вторичном зеркале $M=2,5$ ($\beta=0,4$) и с $\alpha=3$, $f'=2000$, $f'_{\text{экв}}=5000$, $V_{\text{экв}}=20$.

Сначала подсчитаем квадрат эксцентриситета главного зеркала. Он равен $e_1^2 = 1 + \frac{(0,4-1)(0,4+1)^2}{3} = 0,608$. Зная формулу для величины комы, определим предельное угловое поле для качественного изображения размером не более кружка Эри. Как мы помним, он равен в радианной мере

$$\rho = \frac{1,22\lambda V_{\text{экв}}}{f_{\text{экв}}}.$$

Значит, кружок Эри имеет радиус $\rho=2,7 \cdot 10^{-6}$ рад. Его диаметр $d=5,4 \cdot 10^{-6}$ рад. Подставив необходимые величины в формулу комы, вычислим значение половины углового поля зрения: $\omega=0,0033$ рад или примерно 11,5. Полное поле вдвое больше и равно 23. Этого достаточно для того, чтобы без осложнений вести наблюдения Луны и планет.

Таким образом, если относительное отверстие телескопа Долла — Керкэма — Максудова невелико, он работает хорошо, хотя и прост в изготовлении. За рубежом построено очень много любительских телескопов этой системы.

В 1922 г. французский оптик Кретъен предложил модификацию телескопа Кассегрена с главным гиперболическим зеркалом, которое лишь немного отличается от параболического. Его вторичное зеркало также гиперболическое. Французский же оптик-практик профессор Г. Ричи (долгие годы проработавший в США) построил первый телескоп по этой схеме диаметром 0,5 м. Второй его телескоп имел диаметр 1 м.

Теперь эта система — одна из популярных у профессионалов и носит название **Ричи — Кретъена** [1, 2, 34]. Главная особенность этой системы — отсутствие комы. Это первый в истории зеркальный апланат. Его эквивалентное относительное отверстие принимается $1/6—1/8$. Для этого главное зеркало приходится делать с относительным отверстием $1/2,5—1/3,5$. Сейчас построено несколько гигантских телескопов Ричи — Кретъена диаметром от 3,5 до 4,0 м. Изготовление таких светосильных гиперболоидов сопряжено с большими трудностями главным образом из-за большого относительного отверстия. Тем не менее построено много любительских телескопов Ричи — Кретъена.

Квадраты эксцентриситета для обоих зеркал рефлектора Ричи — Кретьена равны [2]

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

Как правило, квадрат эксцентриситета главного гиперболического зеркала отличается от квадрата эксцентриситета параболоида только на 10—20 %, на столько же возрастает асферичность. Это значит, что причина трудности изготовления зеркала лежит не в форме поверхности, а в большой светосиле.

Например, для того, чтобы получить у 250-миллиметрового рефлектора Ричи — Кретьена клуба им. Д. Д. Максудова эквивалентное отверстие 1/6, главное зеркало имеет относительное отверстие 1/2. Его эксцентриситет равен 1,07. Автору лишь с большим трудом в результате зональной ретуши малыми полировальниками удалось получить нужную поверхность *). Асферичность в данном случае была равна $\delta \approx 8$ мкм! Так как телескоп фотографический, точность главного зеркала $\lambda/3,5$ вполне достаточна. Суммарная величина продольной аберрации измерялась теневым прибором из центра кривизны. Но судить о плавности поверхности было совершенно невозможно, так как полутени на зеркале были чрезвычайно резкими. Поэтому пришлось воспользоваться хорошим 250-миллиметровым зеркалом, смонтированным в трубе ньютоновского телескопа.

Если бы исследуемое зеркало было параболическим, то в этой схеме наблюдался бы плоский рельеф. Но в действительности эксцентриситет зеркала 1,07, из которых единица скомпенсирована коллиматором, а «0,07» придавали поверхности вид не плоского рельефа, а слабого «бублика», как если бы это был очень слабо выраженный длиннофокусный параболоид или эллипсоид. Полутени были очень широкими, и судить о наличии «валиков» и «канал» было очень легко и удобно.

Вторичное зеркало имеет квадрат эксцентриситета, равный 7. Поэтому, несмотря на диаметр всего 60 мм и

*) Все работы по изготовлению механики и оптики, кроме ретуши, были выполнены в 1976 г. А. Б. Зайцевым, в то время десятиклассником, а позже молодым рабочим.

радиус кривизны 1000 мм, его асферичность составляет $\delta \approx 0,18$ мкм. Это примерно столько же, сколько у 150-миллиметрового параболоида с относительным отверстием $1/6$. Но в случае с параболическим диаметром 150 мм эта асферичность распределена на радиусе 75 мм, а у нашего выпуклого 60-миллиметрового зеркала — на радиусе 30 мм. Значит, его изготовление значительно сложнее, чем 150-миллиметрового параболоида. Пришлось проделать ретуширование с помощью кольцевого полировальника, укрепив зеркало на вертикальном шпинделе для шлифовки мелких линз. Так как применялись большие скорости и смола быстро разогревалась, пришлось воспользоваться самыми твердыми смолами, которые были армированы тонкими кусочками материи. Вырезанное из материи колечко смачивалось в расплавленной смоле и наклеивалось на основание полировальника. Применялось 4—5 слоев материи.

Желание уменьшить радиус кривизны вторичного зеркала заставило нас не выносить эквивалентный фокус за пределы главного зеркала. Он располагается перед зеркалом. Это так называемый фокус Эппса — Шулте. Это менее удобно, чем при обычном расположении эквивалентного фокуса, но в то время мы не видели другого способа получить эквивалентное относительное отверстие $1/6$.

Позже мы поняли, что при современных достаточно чувствительных астрономических эмульсиях при хорошем незасвеченном и прозрачном небе предельная выдержка около 2 часов может быть получена с относительным отверстием $1/7$ — $1/8$ [34]. Поэтому следующий 360-миллиметровый «ричи — кретьен», который строит студент А. Г. Савельев, имеет главное зеркало с относительным отверстием $1/3,3$, а относительное отверстие главного зеркала коллективной работы клуба — 620-миллиметрового «ричи — кретьена» — $1/3$. В последнем случае асферичность равна $\delta = 5,6$ мкм. Как видим, это в 1,4 раза меньше, чем у предыдущего 250-миллиметрового зеркала. Так как асферичность распределена на зоне 310 мм, то фигуризация этого большого зеркала легче, чем старого 250-миллиметрового! В результате снижения светосилы главного зеркала эквивалентное относительное отверстие 620-миллиметрового рефлектора $1/7,2$.

Вторичные зеркала телескопов Кассегрена и Грегори заслоняют часть пучка и портят дифракционную картину. Из-за наличия бленд-отсекателей экранирование обычно больше, чем у «ньютонa». В 1877 г. И. Форстер и И. Фрич вынесли вторичное зеркало за пределы пучка.

Это брахиты. Зеркала этих телескопов имеют форму внеосевых параблоидов и гиперболоидов. Их ретушь и контроль чрезвычайно сложны. В пятидесятые годы нашего века немецкий любитель Антон Куттер предложил за счет снижения относительного отверстия заменить оба зеркала на сферические (рис. 76). Возникающий при этом астигматизм главного зеркала компенсируется наклоном

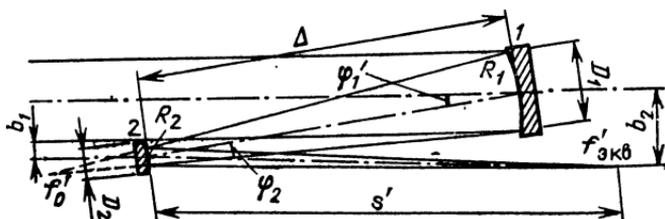


Рис. 76, Брахит А, Куттера

вторичного, а кома укладывается в допуск Рэлея.

Так как в телескопе Куттера пучок не экранируется, система дает чрезвычайно резкие и контрастные изображения. Особенно они пригодны для наблюдений Луны, Солнца, планет, двойных звезд. Многие солнечные телескопы профессионалов имеют схему брахита.

Приведем конструктивные элементы телескопа Куттера. Обозначения взяты с рис. 76: $D_1=108$ мм, $D_2=56$ мм, $R_1=R_2=3239$ мм, $f_1=f_2=1619$ мм, $f'_{экв}=2819$ мм, $\Delta=914$ мм, $s'=1180$ мм, $b_1=89$ мм, $b_2=203$ мм, $\varphi_1=5^\circ 35'$, $\varphi_2=12^\circ 50'$, $\nu=26$ [36].

Изменяя диаметр главного зеркала, нужно пропорционально изменить все размеры, кроме углов наклона. Телескоп интересен тем, что оба его зеркала имеют равные радиусы кривизны. Это значит, что их можно пришлифовать друг на друге. Полируются они порознь каждый своим полировальником, но испытываются наложением друг на друга по интерференционным полосам. Для этого вогнутое зеркало предварительно испытывается методом Фуко, а потом используется как эталонное стекло для испытаний выпуклого.

Телескоп Нэсмита. В середине прошлого века инженер, любитель телескопостроения Джеймс Нэсмит для удобства наблюдений ввел в схему телескопа Кассегрена диагональное зеркало, выведя пучок в горизонтальную полуось своего 500-миллиметрового рефлектора, смонтированного на азимутальной установке (рис. 20, д). Позже для экваториальных телескопов пучок стали вводить в ось склонений.

Удобство заключается в том, что наблюдателю не нужно запрокидывать голову при наблюдении объектов в зените. Кроме того, различные приспособления и в том числе фотокамера надежнее крепятся к телескопу, вибрации от работы затвора сказываются в этом случае меньше. Многие современные профессиональные телескопы и в том числе 6-метровый Зеленчукский телескоп имеют фокус Нэсмита.

Так как в телескопе происходит нечетное количество отражений, он дает неконгруентное (зеркальное) изображение, у которого правое «перепутано» с левым. Это не очень большое неудобство.

Оба зеркала — параболоид и гиперболоид — рассчитываются, шлифуются и исследуются совершенно так же, как и у обычного кассегреновского телескопа. Дополнительное зеркало Нэсмита можно установить на любой модификации телескопа Кассегрена или Грегори. Юстируется телескоп Нэсмита начиная с плоского зеркала, затем выставляется вторичное выпуклое и в конце — главное.

§ 6. КАМЕРА ШМИДТА

На протяжении всей истории телескопа высказывались идеи объединения достоинств линзы и зеркала в одном телескопе. Большая часть из них не прижилась. Здесь мы рассмотрим некоторые типы зеркально-линзовых систем, выдержавших испытание временем.

Увеличение относительного отверстия параболического рефлектора приводит к резкому уменьшению полезного поля зрения, так как при этом быстро растут кома и астигматизм. Кома и астигматизм возникают за счет асимметрии наклонных пучков. Если сохранить симметрию каждого пучка после его отражения относительно его оси, то кома и астигматизм просто не смогут возникнуть *).

Идея Шмидта заключалась в том, что он в центре кривизны сферического зеркала установил диафрагму несколько меньшего, чем зеркало, диаметра (рис. 77, а). Теперь каждый пучок, наклонно проходящий через диафрагму, падал на зеркало вдоль одной из его нормалей, а фокус отраженного пучка так же лежал на этой нормали. Дело выглядело так, как если бы любой участок зеркала был самостоятельным зеркалом, на котором происходит центральное отражение.

*) См. также [1, с. 262; 2, с. 326; 5, с. 197].

Нужно подчеркнуть, что именно удачное расположение диафрагмы и есть главное достоинство камеры Шмидта. Для того, чтобы устранить кому и астигматизм, больше ничего не нужно.

Чтобы не допустить виньетирования, диаметр зеркала должен быть больше диафрагмы на два диаметра поля зрения. Например, диаметр отверстия равен 100 мм, а диаметр

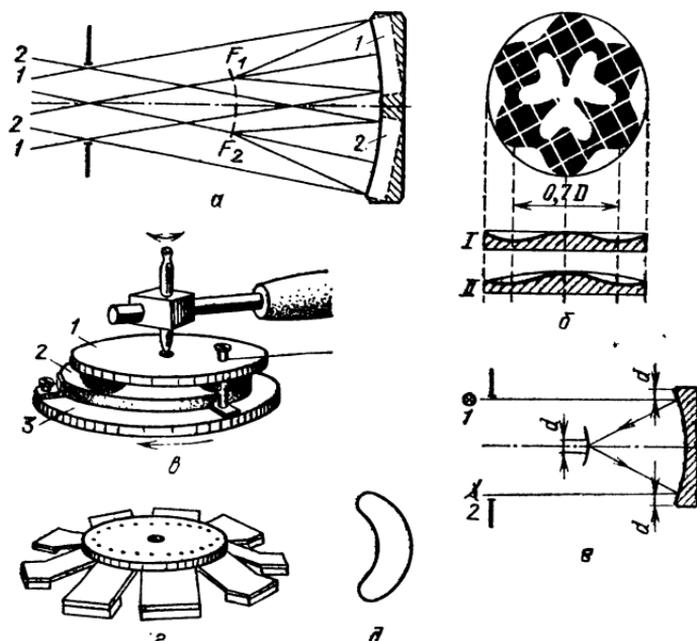


Рис. 77. Камера Шмидта: а — принцип действия, б — форма полировальника для ретуши пластины, в — наполирование рельефа пластины, г — шлифовальники для нанесения более грубого рельефа, д — малый полировальник, е — юстировка кассеты камеры

поля камеры равен 33 мм. Тогда главное зеркало должно иметь диаметр 166 мм. Если негатив не предназначен для фотометрирования, то виньетирование допустимо и диаметр зеркала может быть меньше, вплоть до диаметра, равного диафрагме. Легкое потемнение к краю будет совершенно незаметно на глаз. Кстати, большинство фотографических объективов имеют гораздо большее виньетирование, чем такая камера.

Зеркало камеры сферическое и страдает от сферической аберрации. Снизить ее величину можно, уменьшив относи-

Параметры камеры Шмидта без корректора

Действующее отверстие (диаметр диафрагмы), мм	Предельное фокусное расстояние, мм	Длина камеры, мм	Диаметр сферического зеркала, мм	Диаметр поля зрения		Относительное отверстие
				мм	градусы	
70	165	330	115	23	7,3	1/2,4
80	200	400	130	27	6,9	1/2,5
100	280	560	165	33	6,1	1/2,8
120	370	740	200	40	5,6	1/3,1
150	515	1030	250	50	5,0	1/3,4

тельное отверстие камеры. Если кружок рассеяния фотоэмульсии принять равным 0,05 мм, то предельное относительное отверстие камеры можно вычислить по формуле $V_{\min} = 0,28\sqrt{D}$. Здесь D — диаметр диафрагмы, а \surd — отношение фокусного расстояния камеры к диаметру диафрагмы. Табл. 19 иллюстрирует, как изменяются параметры этой простейшей камеры Шмидта в зависимости от действующего отверстия (диаметра диафрагмы).

Желание получить большое относительное отверстие заставило Шмидта искать другой путь в устранении сферической аберрации. Для этого он в центре кривизны зеркала (в диафрагме) установил корректор, который представляет собой практически плоско-параллельную пластину с едва заметным рельефом. На краях пластина Шмидта слегка отрицательна, а в центре — положительна. Будучи установленной в центре кривизны зеркала, она является корректором для любого наклонного пучка.

Необычная форма корректора Шмидта долгое время отпугивала профессиональных оптиков. Поэтому первыми строителями камер Шмидта после самого Шмидта были любители. Есть два принципиальных способа получить желаемый рельеф. Во-первых с помощью вакуума пластина деформируется и затем шлифуется и полируется до слабой сферы. После снятия вакуума пластина принимает нужную форму. Вакуумный метод использовался самим Шмидтом для первых двух его камер. Хотя этот метод в Новосибирском клубе освоен Л. Р. Миронюком, все-таки для большинства любителей он представляется довольно трудным.

Гораздо проще нанести необходимый рельеф ретушью. Так делают корректор практически все. В 1982 г. автор рету-

шировал таким образом пластину для камеры, построенной в 1976 г. школьниками В. Семиным и Е. Бакшанским. Прежде она работала без пластины, имела 165-миллиметровое зеркало и 100-миллиметровую диафрагму при фокусном расстоянии 384 мм. Сейчас благодаря введению пластины она при том же зеркале имеет отверстие 140 мм. Относительное отверстие возросло с 1/3,8 до 1/2,75. Диаметры звездных изображений остались прежними, 0,03 мм.

Асферичность пластины Шмидта равна

$$\delta_{\max} = \frac{DA^3}{(n-1)2048},$$

где D — диаметр пластины, A — относительное отверстие камеры, n — показатель преломления стекла коррекционной пластины. Для стекла типа К8 пластина имеет асферичность 6,3 мкм. Это в 4 раза больше того, что нужно получить на параболоиде того же диаметра и того же относительного отверстия, что и камера Шмидта. Но точность поверхности в этом случае в 4 раза меньше, а это тоже очень важно. К тому же асферичность можно распределить по обеим поверхностям, тогда асферичность нашей пластины станет по 3,2 мкм. Именно так и поступил автор.

Сначала была отшлифована плоско-параллельная пластина. Измерение по краю проводилось микрометром с точностью до 2—3 мкм. Если один из краев оказывался толще, планшайба для поводка приклеивалась ближе к этому краю. Еще проще приклеить планшайбу большого диаметра с многими отверстиями для поводка; при обнаружении косинь поводок переставляется в отверстие ближе к толстому краю. Толщина пластины не имеет большого значения, и можно не бояться «проскочить» при шлифовке.

После завершения тонкой шлифовки пластина полируется, и только после этого начинается ретушь. Чтобы ее упростить, во время полировки нужно получить достаточно хорошие плоскости с обеих сторон. Нужно бояться зональных ошибок, тогда как общая небольшая кривизна не страшна.

Для ретуши делается полировальник «ромашка» (рис. 77, б). Максимальная площадь полировальника на зоне 70%. Крайне важно, чтобы поверхность полировальника была однородной без ямок от пузырьков воздуха, сколов смолы и т. п., так как в этом случае немедленно наполируются «зоны». Отполированная пластина 2 устанавливается на шпинделе 3 машины (рис. 77, в). Она должна быть хорошо центрирована, чтобы биение было не более

1—1,5 мм. С помощью боковых упоров пластина фиксируется, чтобы во время обработки она не вращалась. Под нижнюю поверхность нужно положить мягкий материал вроде картона.

Полировальный *1* устанавливается сверху. Во время обработки он не вращается. Для этого небольшой винт на его верхней поверхности привязывается к неподвижной части машины с помощью шнура. Чтобы неизбежные в данном случае зональные ошибки растушевывались, поводку придется небольшое качание — на 1—2 см. Пластина вращается, полировальный качается, но не вращается.

Ретушь начинают с небольшим грузом на полировальнике. Через 30 мин испытывают пластину. Если наполирование «рельефа» идет слишком медленно, груз можно увеличить. В случае со 140-миллиметровой пластиной с грузом около 8 кг через 3 часа на одной из поверхностей был наполирован рельеф в 60 % от расчетной асферичности. После этого пластина была перевернута и полировка продолжена.

Испытания проводились с 250-миллиметровым параболическим коллиматором — рефлектором Ньютона (см. рис. 114). В фокусе камеры была установлена лампа карманного фонаря, обернутая фольгой с небольшим (примерно 0,01 мм) отверстием. В ньютоновском фокусе коллиматора устанавливался нож или окуляр. До внесения пластины на ее место в собранной схеме хорошо был виден сильный «подвернутый край», а с окуляром очень большой ореол вокруг точки. Нужно помнить, что если фокусное расстояние коллиматора больше фокусного расстояния камеры Шмидта, то пятно ореола и другие подробности изображения точки (как и любой другой миры) будут увеличены. В нашем случае фокусное расстояние коллиматора было 1500 мм, а фокусное расстояние камеры 384 мм. Поэтому ореол сферической аберрации был примерно в 4 раза больше. Это значит, что и чувствительность окулярной пробы в 4 раза выше.

Через три часа ретуши пластина была внесена в пучок света. Держа ее прямо в руках, автор наблюдал в окуляр, как ореол сразу уменьшился примерно на 60 %, а при наблюдении с ножом Фуко примерно во столько же уменьшилась «холмистость подвернутого края». Еще после двух часов ретуши с обратной стороны пластины рельеф стал практически совершенно плоским, а ореол сферической аберрации исчез.

При относительных отверстиях около $1/2,5$ — $1/3$ наклон пластины к оптической оси на несколько градусов практически не сказываются ни на теневой картине, ни на изо-

бражении точки, так же как и при смещении пластины на несколько миллиметров с оси. В этом легко убедиться во время испытаний.

Если относительное отверстие камеры велико, например $1/2$ и более, то «ромашка» может оказаться неэффективной, так как из-за малой текучести смолы полировальник не будет поспевать за рельефом и станет его споллировывать в сторону плоскости. В этих случаях приходится рельеф шлифовать перед полировкой. Для этого нужен инструмент, изображенный на рис. 80, г. Это три пластины из тонкой латуни или бронзы в виде секторов по 120° , укрепленных на планшайбе винтами. На концах выступов приклеиваются стеклянные прямоугольники, которые и ведут шлифовку. Средний диаметр «венчика» из квадратов составляет $0,707$ диаметра пластины. Концы предварительно изгибаются так, чтобы в рабочем положении центр инструмента не касался пластины. Размах должен быть таким, чтобы край инструмента подходил к краю пластины [28].

В этом случае довольно быстро на зоне $0,7$ образуется плавная «канава». Для того, чтобы контролировать ее величину, воспользуемся коллиматором и решеткой Ронки. Чтобы сделать на время испытаний пластину прозрачной, после сеанса шлифовки грубо полируем ее крокусом или полиритом на фетре, сукне или плотной резине полировальником, немного меньшим полного диаметра. Достаточно того, чтобы пластина стала немного прозрачной, чтобы во время испытаний можно было следить за формой теней решетки Ронки. Нож Фуко в данном случае не годится, так как неравномерная прозрачность пластины будет накладываться на теневой рельеф. Кроме того, на этой стадии обработки пластина слишком груба, а метод Фуко слишком чувствителен.

Полировка ведется тем же инструментом. Вместо стеклянных квадратов приклеиваются смоляные. Иногда приходится пользоваться малыми полировальниками в виде лодочки (рис. 77, д).

Ближе к концу фигуризации пластина обязательно устанавливается в оправу и испытания ведутся более тщательно. После завершения фигуризации зеркало и пластина камеры юстируются. В центре пластины наносят метку. Так как пластина расположена на удвоенном фокусном расстоянии, изображение этой метки расположится в той же плоскости, что и пластина. Задача мастера — совместить метку с ее изображением. Для этого рассматриваем пластину с меткой с расстояния $25—30$ см. Наклонами зеркала

В оправе совмещаем изображение метки с самой меткой.

Добившись этого, смещаем глаз с оси вправо и влево. Если изображение метки смещается в ту же сторону, в которую смещается глаз, то оно расположено позади пластины

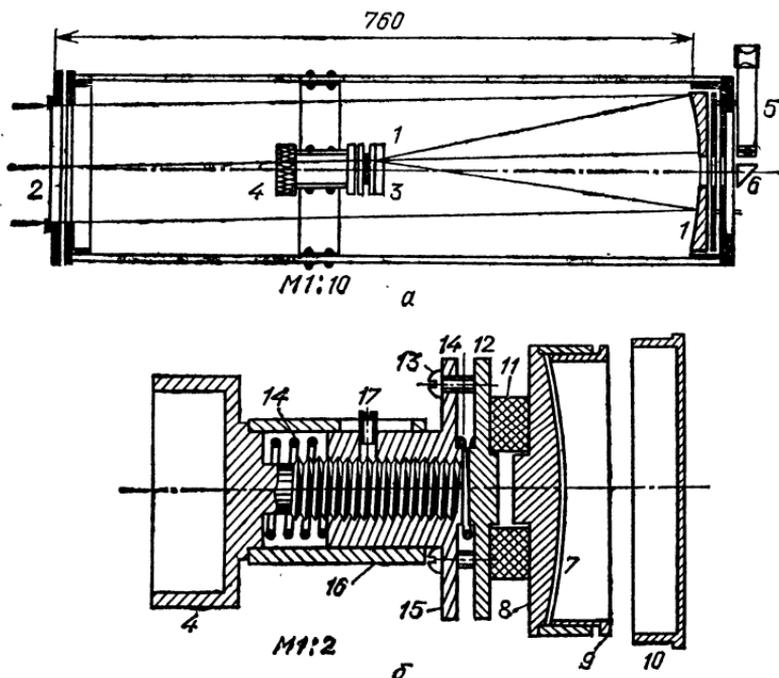


Рис. 78. Конструкция камеры Шмидта (а) и ее касетодержателя (б): 1 — сферическое главное зеркало, 2 — корректор Шмидта в оправе, 3 — кассета, 4 — фокусирующая ручка, 5 — фокусирующая трубка, 6 — призма полного внутреннего отражения, 7 — искривленная пленка на дне кассеты, 8 — кассета, 9 — прижимное кольцо, 10 — крышка кассеты, 11 — магнитное кольцо, 12 — юстируемая пластина, 13 — юстировочные винты, 14 — пружина, 15 — подвижная часть фокусирующего устройства, 16 — касетодержатель, 17 — штифт,двигающийся в пазу цилиндра 16

(дальше от глаза). Если изображение смещается в противоположную сторону от глаза, оно впереди пластины. В обоих случаях меняем расстояние между зеркалом и пластиной, пока метка и изображение не будут оставаться неподвижными относительно друг друга.

Только после этого устанавливаем на место касетодержатель между пластиной и зеркалом (рис. 78, а). Фокаль-

ная плоскость лежит точно посередине, и здесь должна располагаться вершина выпуклого дна кассеты. Рассматривая камеру через пластину с расстояния в одно-два фокусных расстояния, убеждаемся в том, что отражение кассеты в зеркале остается концентричным по отношению к краю зеркала. В противном случае кассета должна быть смещена поперек оси камеры.

Так как фокальная поверхность камеры лежит внутри трубы, ее кассета отличается от обычных кассет. Во-первых, кассета проецируется на зеркало и заслоняет собой часть его поверхности. Дифракционная картина в камере Шмидта «тонет» в грубом эмульсионном слое, и поэтому без вреда для качества изображения точки можно заслонить до 40% диаметра пучка.

Фокальная поверхность камеры искривлена и представляет собой сферу радиуса, равного фокусному расстоянию камеры. Она обращена выпуклой стороной к зеркалу. Поэтому дно кассеты делают выпуклым.

С целью экономии площади кадра кассету приходится делать круглой. Дно кассеты можно выточить подобно ступенчатому шлифовальнику, а потом обработать напильником и шкуркой до сферы. Конструкция кассеты и кассетодержателя видна на рис. 78, б. Кусок фотографической пленки 7 вырубается пуансоном. Рулонная или листовая пленка кладется на кусок мягкой пластмассы, на нее устанавливается пуансон с острыми краями и со сферическим верхом. Радиус этой сферы равен высоте пуансона. Это нужно для того, чтобы при ударе не по центру равнодействующая прошла через центр основания пуансона.

Вырубленный кусок вставляется в кассету и прижимается пружинящим кольцом 9. После этого кассета закрывается круглой крышкой 10.

Кассетодержатель 16 устанавливается в центре трубы камеры на ее оси с помощью четырех растяжек. В центральный цилиндр держателя входит фланец 15 с тремя юстировочными винтами 13. Центральное отверстие фланца имеет резьбу, в которую ввинчивается фокусирующий винт 4. При правостороннем вращении винт втягивает фланец внутрь цилиндра, а при левостороннем вращении возвратная пружина 14 выталкивает фланец. Для того, чтобы предотвратить вращение фланца, он имеет винт-штифт 17, который движется вдоль паза в центральном цилиндре.

Юстировочные винты 13 удерживают пластину 12 с сильным магнитом 11. Между этой пластиной и фланцем сильная возвратная пружина 14. Три юстировочных винга нуж-

ны для установки пластины с магнитом строго перпендикулярно оси камеры.

Кассета камеры алюминиевая, но ее дно стальное. Это нужно для простой и надежной установки кассеты с помощью кольцевого магнита.

Для наблюдений за объектом во время фокусировки в центре зеркала *1* имеется отверстие для небольшой зрительной трубки *5*, сфокусированной на дно кассеты. Для фокусирования в кассету вставляется кусок засвеченной пленки и наблюдатель, глядя в трубку с призмой *6*, с помощью фокусирующего устройства добивается резкости изображения. Для этих целей вполне годятся звезды 0—1^m. Эту зрительную трубу можно установить и на краю трубы под углом к оси. Фокусировка становится менее удобной, но не нужно сверлить зеркало.

Для установки кассеты перпендикулярно оси в нее вставляют кусок немятого алюминированного полиэтилена, применяемого для защиты от солнечных лучей. Этот кусочек вырубается с помощью пуансона. На самом краю коррекционной пластины устанавливается лампочка карманного фонаря, касающаяся поверхности (рис. 77, *е*). Ее свет отражается от края зеркала камеры, от центра алюминированного полиэтилена, снова от края зеркала и попадает на противоположный край пластины. Наблюдая за положением отражения лампы на этом краю зеркала, наклоняем кассету юстировочными винтами *13* до тех пор, пока отражение лампы не будет видно на краю пластины. В этот момент кассета установлена перпендикулярно оси. Окончательная юстировка камеры делается по звездам в результате многократных пробных снимков.

§ 7. КАМЕРА РАЙТА

Исследуя влияние перемещения корректора вдоль оси камеры Шмидта Франклин Райт в 1935 г. нашел вариант камеры, который интересен тем, что длина камеры получается вдвое меньше, т. е. немного больше фокусного расстояния (рис. 79, *а*). Для любителя это очень важное обстоятельство. Кроме того, фокальная поверхность камеры плоская. Правда, астигматизм камеры Райта ограничивает ее поле зрения в случае небольших любительских камер до 3—5°. Но из-за меньшего относительного отверстия (около 1/4) большее поле невозможно еще и потому, что экранирование пучка кассетой становится слишком большим. При одинаковых диаметрах коррекционной пластины камера

Райта имеет больший масштаб изображения (чаще всего в 1,5—3 раза) и для невиньетированного поля требуется зеркало, превышающее пластину по диаметру всего на один поперечник поля.

Зеркало камеры Райта — сплюснутый сфероид с квадратом эксцентриситета —1. Это как бы параболоид наоборот. При испытании из центра кривизны на параболоиде виден

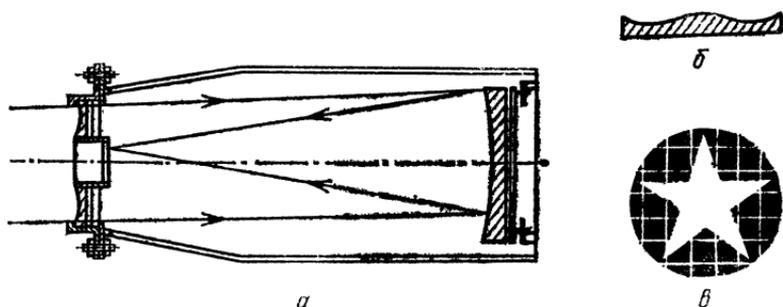


Рис. 79. Камера Райта: *a* — оптическая схема, *б* — форма корректора, *в* — полировальник для фигуризации главного зеркала

«бублик» с завалом на краю, а в случае сплюснутого эллипсоида — подвернутый край. Продольная же аберрация обоих зеркал при одинаковых диаметрах и фокусных расстояниях в точности равны, но у сплюснутого сфероида фокусы центральной зоны расположены дальше фокусов крайних зон. Поэтому если нож движется к зеркалу, тени на зеркалах движутся от центра к краю. Изготовление этого зеркала не сложнее изготовления аналогичного параболоида, и для ретуши звезда на смоле полировальника выдавливается так, чтобы его середина была ослаблена (рис. 79, *в*).

Пластина камеры Райта (рис. 79, *б*) имеет вдвое большую асферичность, если ее относительное отверстие то же, что и у камеры Шмидта. Но обычно относительное отверстие камеры Райта выбирается меньше, и асферичность может оказаться меньше, а изготовление проще пластины Шмидта. Например, у 260-миллиметровой камеры Райта, построенной автором (при участии школьников М. Остроменского и А. Руденко) фокусное расстояние 1140 мм, относительное отверстие 1/4,4. Ее асферичность равна $\delta = \frac{DA^3}{(n-1) \cdot 1024} = 0,006$ мм. Это немного меньше, чем у 140-миллиметровой камеры Шмидта, описанной выше, несмотря на больший диаметр корректора камеры Райта.

Так как асферичности пластин Райта и Шмидта пропорциональны кубу относительного отверстия, то при одинаковой асферичности камера Шмидта имеет относительное отверстие в $\sqrt[3]{2} = 1,26$ раза больше. Например, при одинаковой асферичности пластины камера Райта может иметь относительное отверстие $1/4$, а камера Шмидта $1/3,2$.

Описанная здесь камера Райта имеет полезное невиньетированное поле зрения 55 мм, или $2^{\circ}46'$, так как зеркало камеры имеет диаметр 315 мм, а пластина 260 мм. Фотографирование в главном фокусе ведется на фотопластинки $4,5 \times 6$ см.

Малое относительное отверстие позволяет с помощью диагонального зеркала вынести фокус вбок за пределы трубы и вести наблюдения в ньютоновском фокусе. Для вынесения полного поля зрения диагональное зеркало слишком велико и заслоняет примерно половину светового пучка. Поэтому в ньютоновском фокусе фотографируют на малоформатный кадр 24×36 мм или ведут визуальные наблюдения.

§ 8. МЕНИСКОВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ МАКСУТОВА

Хотя Д. Д. Максудов исследовал и предложил большое количество систем, с его именем обычно связывают менисковые телескопы. Такие телескопы компактны, имеют закрытую трубу, которая делает турбулентность в ней практически малозаметной. Качество изображения телескопов высоко. К сожалению, не слишком искушенные авторы некоторых руководств для любителей полагают, что телескопы Максудова просты в изготовлении, так как все поверхности системы сферические и не требуют асферизации. Это действительно преимущество, но только в серийном производстве, когда асферизация становится нерентабельной. В кустарных условиях выполнить асферизацию значительно проще, чем выдержать с высокой точностью конструктивные элементы оптических деталей. Мениск, в отличие от зеркал, крайне чувствителен к ошибкам его параметров. Радиусы кривизны должны быть выдержаны с точностью $0,2-0,3$ мм, а толщина в центре с точностью $0,02$ мм. Очень важна концентричность или отсутствие «косины» мениска. Разница в толщине мениска по краю нигде не должна быть больше $0,003$ мм. Такую величину не просто измерить и еще сложнее выдержать. К этому нужно добавить, что для получения мениска большой кривизны нужна очень толстая заготовка, и во время шлифовки приходится снимать несколько сотен

Конструктивные параметры некоторых менисковых телескопов:
 1—камера «зеркало-мениск» (рис. 80, а), 2—менисковый «касрегрен»
 (рис. 81), 3—менисковый «максутов—касрегрен—грегори»*),
 4—менисковый телескоп Сиглера (рис. 82, а)

Параметр	1	2	3	4	4	4
D_1	200,0	200,0	140,0	280,0	150,0	130,0
R_1	280,0	280,0	152,0	415,90	226,85	189,05
d_1	20,0	20,0	12,0	28,78	15,70	13,05
R_2	291,69	268,31	159,05	432,31	235,81	196,49
Δ_1	981,0	566,3	279,63	968,90	528,5	444,4
D_2	290,0	210,0	150,0	318,0	175,0	145,0
R_3	1662,9	1337,5	679,2	1832,6	999,6	833,0
Δ_2	—	—	—	577,6	315,1	262,6
D_3	—	42,0	32,3	114,0	63,0	52,0
S_1	—	—	432,0	882,7	481,5	401,2
R_4	—	268,31	159,05	1183,39	645,49	537,90
2ω	5,5°	1,2°	0,7°	2,0°	2,0°	2,0°
$V_{\text{экв}}$	3,54	16,0	14,8	8,0	8,0	8,0
$f_{\text{экв}}$	708,0	3197,8	2078,2	2228,4	1215,5	1012,9

*) Здесь Джон Грегори — американский любитель, однофамилец знаменитого шотландца Джеймса Грегори.

кубических сантиметров стекла на мениске диаметром 150—200 мм. Иногда поступают иначе — сравнительно тонкую заготовку нагревают в специальной печи до температуры 650 °С, а потом прессуют стальными формами. После прессовки (молирования) заготовку отжигают одни-два суток для снятия внутренних напряжений.

К сожалению, вопрос о спекании и молировании заготовок требует слишком подробного изложения, и хотя постройка печи для этих целей, судя по опыту В. С. Будько и А. Н. Болтнева, не так уж сложна, сам процесс молирования довольно сложен и капризен. Насколько известно автору, среди советских любителей молирование заготовки для мениска выполнил только алмаатинец В. М. Барбанакон для своего 250-миллиметрового мениска.

Таким образом, постройка менискового телескопа по силам только достаточно опытному любителю. Так как вопросы шлифовки, полировки, фигуризации и юстировки такому любителю хорошо знакомы на практике, мы приведем только самые необходимые сведения для постройки

релескопов Максутова различных систем. Д. Д. Максутов тазработал менисковые аналоги практически всех систем. Ниже мы приводим не только разработанные Максутовым схемы, но и реально построенные телескопы любителями разных стран.

Первая из них — простейшая система «зеркало-мениск». Это — светосильная система с большим полем зрения более всего подходит для астрономической фотографии (звездные поля, туманности, скопления, кометы, астероиды и т. п.).

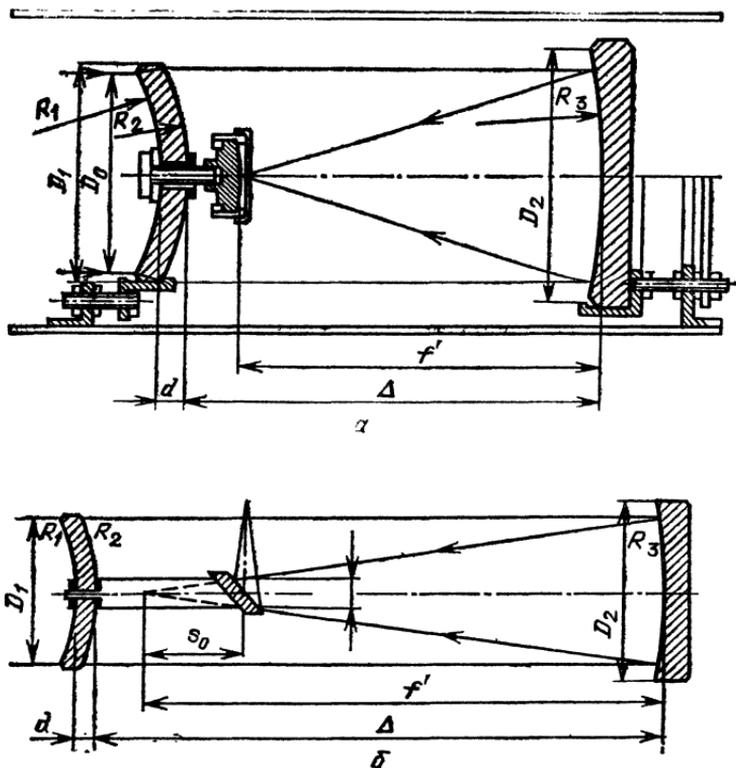


Рис. 80. Менисковые камеры Д. Д. Максутова: *а* — камера, построенная Г. Клаусом, *б* — менисковый «ньютон», построенный Р. Тутиллом

На рис. 80, *а* показано устройство подобной камеры. Радиус кривизны фокальной поверхности R_4 (не путать с радиусом кривизны вторичного зеркала R_4 менисковых кассегренов) равен фокусному расстоянию. Кассета камеры имеет выпуклое дно.

В табл. 20 даны все необходимые конструктивные элементы. Обозначения в первой колонке табл. 20 традиционны, их можно найти на рис. 80—82. Все величины, кроме относительного отверстия, можно пропорционально увеличить или уменьшить по крайней мере до 250—300 мм. Данная таблица составлена на основе обстоятельной статьи Т. С. Белороссовой, Д. Д. МаксUTOва, Н. В. Мерман и М. А. Сосниной [13] и других источников.

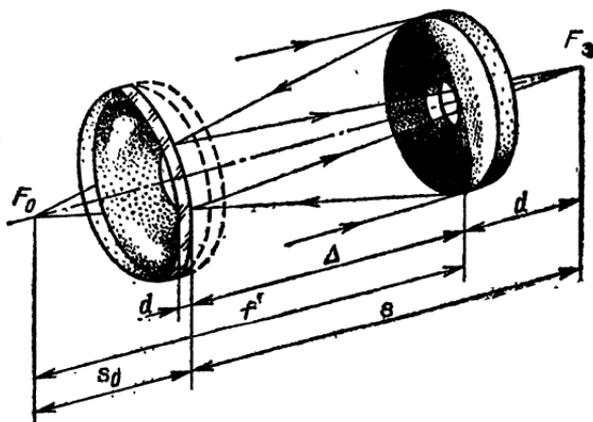


Рис. 81. Менисковый «касегрен»

Приведем конструктивные элементы подобной менисковой камеры, построенной шведским любителем Г. Клаусом по расчетам Ф. Райта (рис. 80, а): $R_1=135,5$ мм, $R_2=143,4$ мм, $R_3=583$ мм, $R_4=280$ мм, $d_1=14,0$ мм, $\Delta=341$ мм, $f=298$ мм, $D_1=150$ мм, $D_2=180$ мм. На поле диаметром 12° камера дает превосходные изображения. До самого края звездные изображения не превышают 0,025 мм. В течение 15-минутной выдержки получаются звезды 14^m . Труба камеры Г. Клауса бумажно-клеевая с алюминиевыми кольцами для жесткости. Так же, как и предыдущие камеры, эта имеет кривое поле зрения радиусом, равным фокусному расстоянию. Ее размеры можно увеличить или уменьшить пропорционально какому-нибудь выбранному коэффициенту.

Роджер Туттилл построил менисковый «ньютон» Д. Д. МаксUTOва (рис. 80, б). Его конструктивные элементы следующие: $D_1=275$ мм, $d=27,31 \pm 0,15$ мм, $D_2=318$ мм, малая ось диагонального зеркала равна 70 мм, $R_1=-415,3 \pm 1,25$ мм, $R_2=431,04$ мм, $\Delta R=R_2-R_1=15,74 \pm 0,074$ мм, $R_3=2237,2 \pm 10,0$, $\Delta=1491,0 \pm 15,0$, $f'=1087,4$, $s_0=200,0$.

Чтобы не устраивать растяжки и не портить изображение дифракционными лучами, Туттилл установил диагональное зеркало на трубке, закрепленной в отверстии, просверленном в мениске. Диаметр трубки немного меньше малой оси диагонального зеркала и поэтому она даже при небольшой толщине стенок очень жесткая.

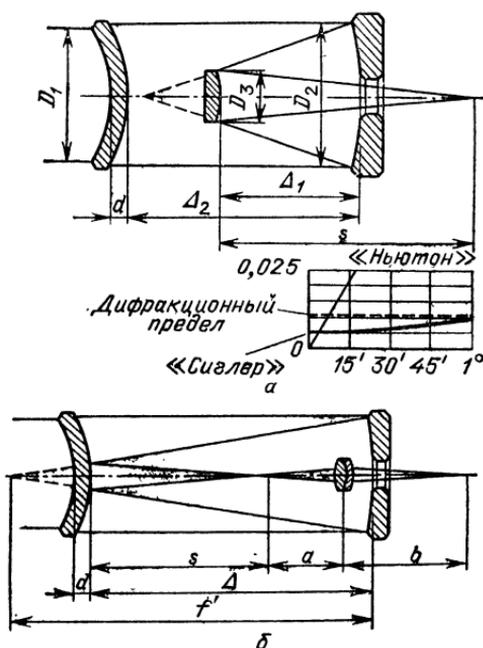


Рис. 82. Телескоп Сиглера (а) и оборачивающий менисковый телескоп Долла (б)

Менисковый «касегрен» (рис. 81 и табл. 20) интересен тем, что его вторичное зеркало имеет ту же кривизну, что и вторая поверхность мениска. Поэтому вторичное зеркало получают простым алюминированием центральной части второй поверхности мениска. Для этого вырезается маска из фольги с соответствующим отверстием в центре и перед алюминированием накладывается на мениск.

Введя дополнительный параметр (кривизну вторичного зеркала), американский любитель Роберт Сиглер [44] не только повысил качество изображения, но и увеличил относительное отверстие и полезное поле своего телескопа (рис. 82, а и табл. 20).

Горидж Долл построил несколько менисковых телескопов системы Кассегрена с оборачивающей линзой

(рис. 82, б). Это делает трубу еще и земной. В качестве обрачивающей линзы применяется хорошая ахроматическая линза подходящих размеров и фокусного расстояния. Менисковая система и линза работают независимо друг от друга и должны быть каждая хорошо исправлены. В сущности линза — простой окулярный микроскоп с увеличением в данном случае $1,5\times$. Увеличение и вынос фокальной плоскости системы в целом могут быть другими, другой может быть и сама линза. Ее фокусное расстояние и положение относительно фокуса менисковой системы вычисляется по формуле Гаусса.

Как уже отмечалось, менисковые телескопы очень чувствительны к ошибкам в конструктивных элементах. Особенно опасны ошибки в изготовлении мениска. Они не так страшны при малых относительных отверстиях. К сожалению точно выполнить все размеры очень трудно. Поэтому все менисковые телескопы требуют испытаний после сборки с коллиматором или с плоским зеркалом. Последний способ не годится для светосильных камер. Если в ходе испытаний обнаружилось, что телескоп дает плохое изображение точки, то для камер «мениск — зеркало» можно попытаться менять расстояние между мениском и зеркалом. Для кассегренов этот способ мало пригоден, так как с перемещением мениска и вторичного зеркала сильно меняется относительное отверстие.

Второй способ исправления остаточных аберраций — ретушь одной из поверхностей. С точки зрения теории ретушировать лучше одну из поверхностей мениска, но на практике удобнее ретушировать зеркало. Так как результат практически тот же, то чаще ретушируют зеркало.

Разместив в фокусе камеры источник, а в фокусе коллиматора нож или окуляр, наблюдаем теневой рельеф или изображение точки. При испытаниях кассегренов можно источник и нож поменять местами. При испытаниях фотографических камер достаточно, чтобы кружок рассеяния был не более $0,02-0,03$ мм.

МЕХАНИКА ТЕЛЕСКОПА

§ 1. НЕБЕСНАЯ СФЕРА И СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ
КОординАТ

Прежде чем перейти к описанию монтаровок телескопов, необходимо кратко рассказать о небесных координатах.

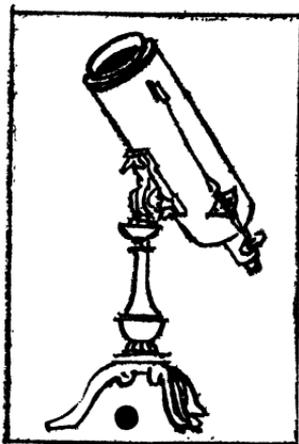
Небесная сфера — воображаемая поверхность, не имеющая определенного радиуса. Мы видим эту сферу изнутри, и ее центр находится точно там, где расположен наблюдатель.

Рассмотрим основные точки и круги небесной сферы (рис. 83), для чего выделим из двух сфер, изображенных на рисунке, наружную. Точки пересечения воображаемой оси вращения небесной сферы с самой сферой называются полюсами. Северный полюс мира (P) виден в северном полушарии Земли, южный (P') — в южном. Близ Северного полюса расположена Полярная звезда. Близ Южного нет сколько-нибудь заметной звезды.

Высоту полюса мира над горизонтом можно измерять в градусах, она равна географической широте места наблюдений (φ).

Большой круг сферы, проходящий через точку севера (C), полюс (P), зенит (Z) и точку юга ($Ю$), называется небесным меридианом. Меридиан делит небо на два полушария — восточное и западное.

Линия пересечения плоскости земного экватора с небесной сферой называется небесным экватором. Каждая точка экватора удалена от полюса на 90° . Малые круги, плоскости которых параллельны плоскости экватора и вдоль которых происходит су-



точное движение светил, называются суточными параллелями.

Экватор проходит через точки востока (В) и запада (З). В южной части неба он максимально поднимается над горизонтом. Точка пересечения экватора с меридианом поднимается над горизонтом на высоту $90^\circ - \varphi$, где φ — географическая широта места наблюдений.

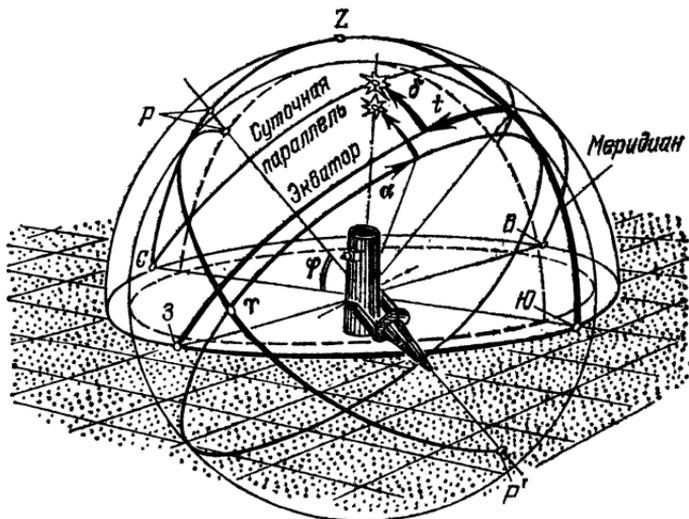


Рис. 83. Подвижная и неподвижная системы координат. Неподвижная система нанесена на наружную сферу, подвижная — на внутреннюю. Меридиан и горизонт, не участвующие в суточном вращении, показаны штриховой линией

Для уверенного поиска светил, особенно слабых и невидимых невооруженным глазом, созданы системы небесных координат. Мы рассмотрим только две из них — неподвижную (первую) экваториальную (наружная сфера на рис. 86) и подвижную (вторую) экваториальную (внутренняя сфера). Разделение сфер на две — условное, нужное для того, чтобы яснее различать обе системы.

В обеих системах координат одна координата общая. Эта координата указывает кратчайшее на небесной сфере расстояние светила от небесного экватора. Она называется склонением светила (δ).

Если светило лежит на экваторе, его склонение равно 0° . Склонение северного полюса $+90^\circ$, южного -90° . Склонение звезды Денеб (α Лебеда) равно $44^\circ 55'$, склонение звезды Ригель (β Ориона) равно $-8^\circ 19'$.

Вторая координата в каждой системе своя. В первой системе (наружная сфера на рис. 86)— это часовой угол (t). Часовой угол измеряется от меридиана до светила. По мере вращения небесной сферы часовой угол светила непрерывно меняется, поэтому его удобно измерять в часах, минутах и секундах (ч, м, с или латинскими буквами h, m, s) от меридиана по ходу вращения небесной сферы (по часовой стрелке). Каждый час часового угла равен 15° в угловой мере. Предположим, сейчас меридиан пересекает Капелла (α Возничего), и ее часовой угол равен нулю. Через час часовой угол Капеллы станет 1^h (15°), еще через полтора часа 2^h30^m ($37,5^\circ$). Эта система удобна для снабжения телескопа координатным кругом по часовому углу, но неудобна для составления каталогов и звездных атласов. Для каталогов принята вторая (подвижная) система координат (внутренняя сфера на рис. 83). Склонение здесь определяется так же, как и в первой системе, а вместо часового угла служит прямое восхождение (α), которое отсчитывается от так называемой точки весеннего равноденствия до светила против вращения небесной сферы (против часовой стрелки). Так как точка весеннего равноденствия (Υ) участвует в суточном вращении небесной сферы, вся система координат называется подвижной относительно наблюдателя, но неподвижной относительно звезд. Прямое восхождение отсчитывается также в часах, минутах и секундах. Если в данный момент меридиан пересекает светило с прямым восхождением $\alpha=0^h 0^m$, то час спустя его пересечет светило с $\alpha=1^h 0^m$.

Время полного оборота Земли относительно звезд — *звездные сутки* — на 4 минуты короче солнечных суток, по которым мы живем. Дело в том, что благодаря обращению Земли вокруг Солнца мы видим как оно ото дня ко дню перемещается среди созвездий. Конечно, днем звезды не видны, но зато по ночам вид звездного неба меняется в течение года. Каждые сутки Солнце в своем видимом годовом движении смещается на небесной сфере на 1° к востоку в том же направлении, что и Земля в своем суточном вращении. В результате солнечные сутки на 4 мин длиннее звездных.

Мы живем по солнечному времени, но телескоп приходится поворачивать за звездами по звездному времени со скоростью один оборот в звездные сутки. Это вынуждает нас вычислять звездное время по известному солнечному, чтобы найти часовой угол светила.

Интересно, что звездные сутки начинаются в тот момент, когда меридиан пересекает (кульминирует) точка весеннего

равноденствия Υ с $\alpha=0^{\circ}$. Выходит, что звездное время в любой момент суток в точности равно прямому восхождению светил, которые в это время кульминируют. Например, если в какой-то момент кульминирует Вега (α Лирь), прямое восхождение которой $\alpha=18^{\circ}34^m$, то звездное время также равно $18^{\circ}34^m$. Планетарная туманность «Гантель» (M 27) в созвездии Лисички всегда кульминирует в $19^{\circ}57,4^m$ звездного времени, так как ее $\alpha=19^{\circ}54,7^m$.

Таким образом, взглянув на часы, идущие по звездному времени, мы можем сразу узнать прямое восхождение светил, кульминирующих в данный момент.

Предположим, что сейчас $5^{\text{ч}}$ звездного времени. Нам нужно найти слабую галактику с $\alpha=3^{\text{ч}}$. Ясно, что кульминировала она 2 часа тому назад. Значит, нам нужно повернуть телескоп к западу от меридиана на угол $2^{\text{ч}}$ (в угловой мере на 30°). Но этому соответствует часовой угол $t=2^{\text{ч}}$. Установив на круге часовых углов 2, а на круге склонений склонение этой галактики, мы приведем ее в поле зрения телескопа без помощи искателя. Для слабых объектов, не видимых в искатель, это наиболее надежный и простой способ поиска объектов.

Каждая любительская обсерватория должна быть снабжена часами, идущими по звездному времени. Это могут быть обычные часы, которые спешат на 4 мин в сутки. Часовой угол вычисляется по формуле

$$t = S_0 - \alpha,$$

где S_0 — звездное время на гринвичском меридиане в $0^{\text{ч}}$ всемирного времени (см. в Переменной части *Астрономического календаря* раздел «О счете времени» и последнюю колонку в эфемеридах Солнца). Там же можно прочесть о переводе декретного и летнего времени в звездное. После длительного перерыва в наблюдениях, если звездные часы остановились, достаточно привести в поле зрения телескопа объект, прямое восхождение которого известно, и, определив часовой угол по соответствующему кругу телескопа, определить гринвичское звездное время и пустить часы.

§ 2. КОЕ-ЧТО О СОПРОМАТЕ

Сопромат — сопротивление материалов — наука о нагрузках, действующих на конструкции, и о сопротивлении конструкций этим нагрузкам. Наука эта довольно сложная и требует знания высшей математики. Однако мы рассмотрим работу конструкций с качественной стороны.

Зачем мы ввели параграф о сопромате в книгу о телескопостроении? Дело в том, что телескоп дает большие увеличения, и это, кроме положительной стороны, имеет и отрицательную: вместе с увеличением видимых размеров предметов увеличивается и дрожание изображения из-за дрожания инструмента в руках, от ветра, от случайных прикосновений к нему и т. п. На первый взгляд эти дрожания настолько малы, что о них вообще не стоит говорить. Но если вспомнить, что при увеличении, например, в 100 раз во столько же увеличивается дрожание изображения объекта в поле зрения, то станет ясно, что это не пустяк. В самом деле, дрожание изображения предмета с видимой амплитудой в 10' уже мешает наблюдать мелкие детали. Если при увеличении в 100 раз изображение предмета в окуляре дрожит с размахом в 10', то в действительности дрожание телескопа в 100 раз меньше. Это значит, что он дрожит с размахом в 6". Если труба 150-миллиметрового телескопа с фокусным расстоянием 1200 мм укреплена в середине, то ее конец при этом дрожит с размахом 0,02 мм. Две сотых миллиметра, и мы уже не можем рассматривать мелкие детали! А что же будет при большем увеличении? Дрожание плохо сконструированной и выполненной монтировки, равно как и трубы телескопа,— дело слишком серьезное: поверьте опыту любителя, не раз терпевшего неудачи.

§ 3. НАГРУЗКИ И ДЕФОРМАЦИИ

Начнем с того, что на каждую конструкцию — простую или сложную — всегда действует два типа нагрузок: полезные нагрузки и реакции самой конструкции, стремящейся уравновесить полезные нагрузки. Например, на рис. 84, а показана балка, опертая на две опоры по концам. В середине пролета на нее действует сосредоточенная сила. Если бы на балку действовала только эта сила, то балка начала бы равноускоренное движение вдоль этой силы, на самом же деле балка неподвижна; это значит, что какие-то силы препятствуют ее движению, они уравновешивают вертикальную силу. Этими (в данном случае двумя) силами являются реакции опор. На верхних рисунках легко видеть, что такое реакция опор. Здесь полезные силы — вес грузов штанги — действуют на балку (перекладину штанги); две опоры (руки атлета) сопротивляются действию сил. Это и есть реакция опор. Реакция опор позволяет штанге оставаться в равновесии, но если силы спортсмена сдадут, т. е. реакция опор

станет меньше полезной нагрузки, штанга немедленно упадет.

Сумма проекций всех вертикальных сил на вертикальную прямую должна быть равна нулю, если всем силам, действующим вниз, присписать знак плюс, а силам, действующим

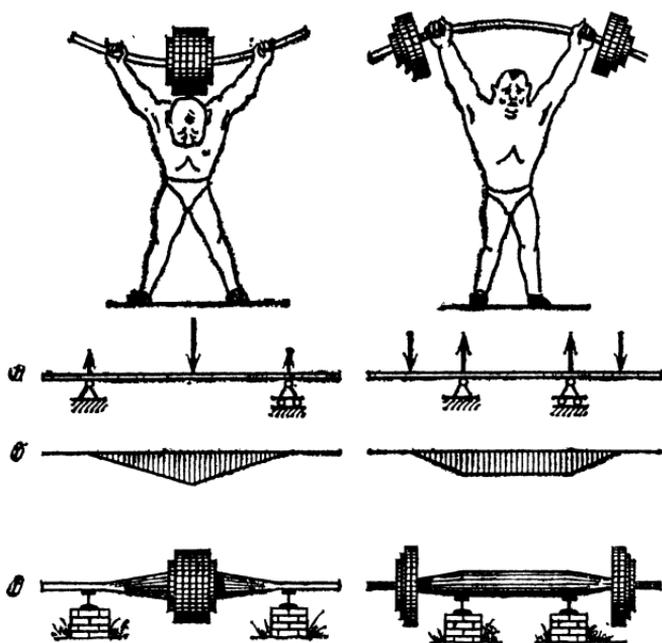


Рис. 84. Изгибающий момент балки: а — схема сил, б — эпюра (график) изгибающих моментов, в — рациональные формы балок

щим вверх, — знак минус. Только тогда балка будет оставаться в покое. В первом случае на рисунке слева полезная нагрузка — сосредоточенная сила — уравновешена двумя реакциями опор. Во втором реакцией опор — мускульной силой атлета — уравновешены две полезные силы. Та из опор оказывает большее сопротивление, возле которой сосредоточено больше сил. Рис. 85 показывает примеры полезных нагрузок и реакций опор, а также значения максимального момента и максимального прогиба*).

В результате действия нескольких сил на балку она изгибается. Балка сопротивляется этому изгибу — в ней возникают внутренние напряжения, препятствующие дальнейшему изгибу.

*) Формулы справедливы для балок и консолей, но не для стержневых систем.

Чем ближе к середине балки действует сила, тем больше изгибающий момент. Конечно, момент зависит еще и от величины силы.

	Нагрузка	Эпюра изгибающих моментов	Рациональная форма балки	Стержневая система	
a					$M_{\max} = Pl$ $f = \frac{Pl^3}{3EJ}$
б					$M_{\max} = \frac{ql^2}{2}$ $f = \frac{ql^3}{8EJ}$
в					$M = \frac{Pab}{l}$ $f = \frac{Pq^2b^2}{3EJl}$
г					$M = \frac{ql^2}{8}$ $f = \frac{5ql^3}{384EJ}$
д					$M = Pc = \text{const}$
е					$M = Pc = \text{const}$ $f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{8} \cdot \frac{c}{l}$

Рис. 85. Работа консолей, балок и стержневых систем: а, в, д, е — сосредоточенные нагрузки, б, г — равномерно распределенные нагрузки; M_{\max} — максимальный изгибающий момент, f — максимальный прогиб

Рассмотрим другой элемент, часто встречающийся в монтировках телескопов — консоль (рис. 85, а, б). Консоль — это стержень, один конец которого свободен, а второй прочно зажат (заделан) в какую-то неподвижную опору. Если нагрузить консоль, все реакции сосредоточатся в единственной опоре. Одна из реакций будет сила, направленная навстречу полезной силе или группе сил, и ее величина будет равна алгебраической сумме (сумме с учетом знаков) всех полезных сил. Вторая реакция опоры — крутящий момент, который стремится повернуть консоль навстречу вращению, вызываемому нагрузкой. На нашем ри-

сунке крутящий момент нагрузки действует по часовой стрелке и стремится опрокинуть консоль. Реактивный момент, приложенный к балке со стороны опоры, действует против часовой стрелки и стремится удержать консоль в покое. Сколько бы сил ни было приложено к консоли, реакция всегда будет состоять из силы и крутящего момента. Под действием внешних сил консоль изгибается. В каждом сечении консоли внутренние напряжения противостоят изгибающему моменту. Этот момент, а значит, и внутренние напряжения, минимален на конце консоли и максимален

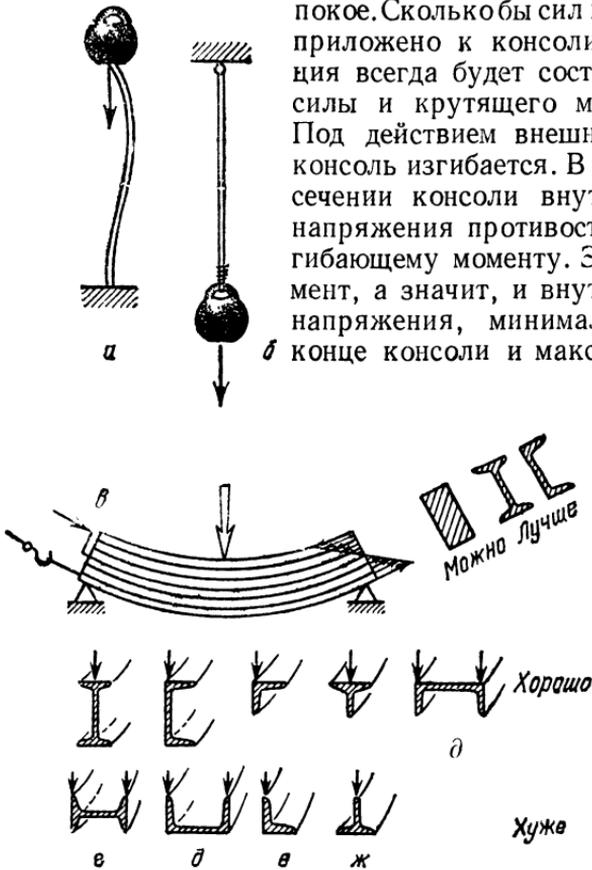


Рис. 86. Работа тонкого стержня на сжатие (а) и растяжение (б); поперечный изгиб балки и рациональные поперечные сечения балок (в)

возле самой опоры. Если у балки, нагруженной одной силой, «опасное» сечение расположено в районе приложения силы, то у консоли практически во всех случаях опасное сечение лежит возле опоры, поэтому чаще всего консоль имеет сечение, которое монотонно возрастает от конца консоли к опоре.

Изгиб, который мы рассмотрели, называется поперечным. Но возможен еще продольный изгиб. Например, на

тонкую и длинную вертикальную палочку установили большой груз. Палочка стремится изогнуться, она теряет устойчивость (рис. 86, а). Если ее немного поддержать, не давая изгибаться, то она может выдержать значительно больший груз, но если она не имеет дополнительных опор по длине, она теряет равновесие и изгибается. С другой стороны, если на этой палочке тот же груз подвесить, чтобы она работала на растяжение (рис. 86, б), а не на сжатие, как до сих пор, то она выдержит и значительно большую нагрузку. Таким образом, длинные и тонкие стержни плохо работают на сжатие, но вполне хорошо на растяжение.

§ 4. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ

Теперь рассмотрим форму поперечного сечения балок. Во время поперечного изгиба с нагрузкой, действующей вертикально вниз, верхний пояс балки сжимается, тогда как нижний растягивается (рис. 86, в). Средние же слои деформируются мало. Внутренние напряжения в балке прямоугольного сечения распределяются следующим образом: вдоль оси симметрии усилия равны нулю и пропорционально возрастают по мере продвижения к крайним (верхнему и нижнему) поясам, достигая максимума как раз на самых внешних слоях. Очевидно, что средние слои балки работают с большой недогрузкой. Поэтому можно вместо прямоугольного сечения выбрать такое, где площадь поперечного сечения средних слоев будет меньше. Одним из самых распространенных сечений подобного рода является двутавр (рис. 86, г). Почти аналогичным образом работает и швеллер (рис. 86, д). Вспомним, что тонкие стержни, к которым можно отнести и двутавр со швеллером, плохо работают на сжатие и хорошо на растяжение. Вспомним также, что изгибаемая балка работает своими верхними слоями на сжатие, а нижними на растяжение, конечно, если сила действует вертикально сверху вниз. Теперь ясно, что у двутавра можно резко уменьшить сечение нижнего пояса и сохранить прежним сечение верхнего. В пределе мы получим новое сечение — тавр (рис. 86, ж). Если подобную операцию проделать и со швеллером, получится уголок (рис. 86, е). Существуют равнобокие и неравнобокие уголки. У последних одна из полок в сечении длиннее. Подчеркнем, что все эти элементы хорошо работают только в положениях, указанных на рис. 86, г, д, е, ж с в е р х у.

Жесткость горизонтального стержня, нагруженного вертикальными силами, пропорциональна первой степени ши-

рины его сечения и третьей степени высоты этого сечения. Например, увеличение ширины прямоугольного бруса в два раза увеличит его жесткость тоже в два раза. Увеличение же высоты бруса в два раза увеличит его жесткость в 8 раз (рис. 87, а). При этом подразумевается, что все силы действуют вертикально. Если они дейст-

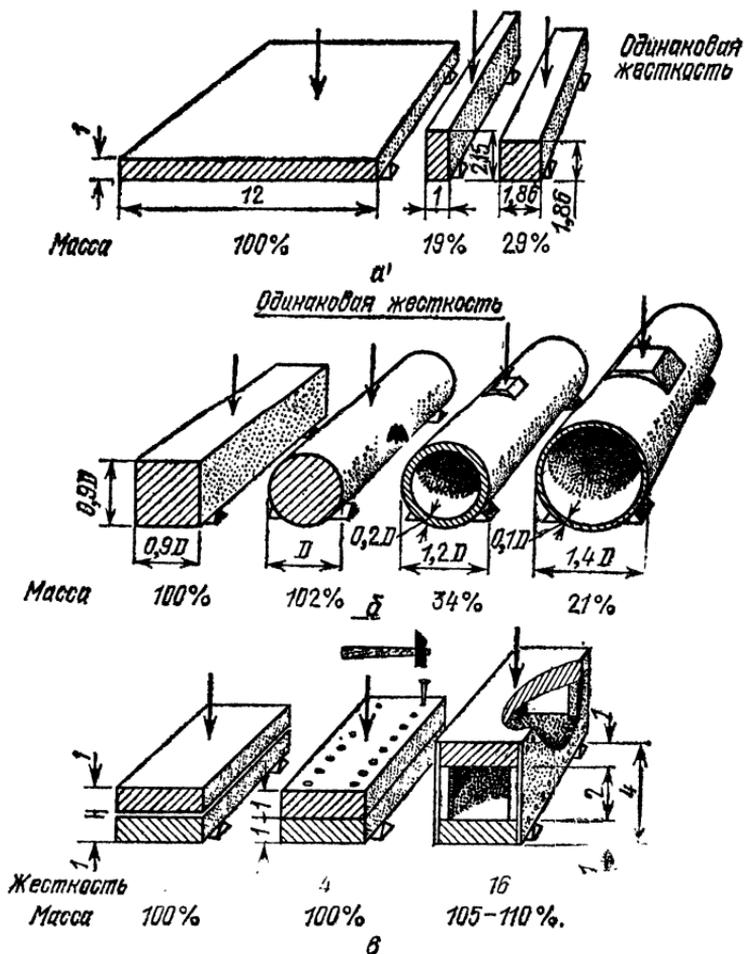


Рис. 87. Жесткость стержней различного сечения: а, б — изменение массы при одинаковой жесткости, в — изменение жесткости при одинаковой массе

вуют горизонтально, то жесткость пропорциональна кубу ширины. Чтобы не было путаницы, считается, что высота сечения стержня имеет то же направление, что и направление сил. Тогда увеличение высоты всегда

значительно выгоднее увеличения ширины. В этом смысле неравнобокий уголок выгоднее устанавливать так, чтобы его большая полка была вертикальной (ее направление совпадает с направлением сил).

Большой интерес представляют полые сечения (рис. 87, б, в), так как при одинаковой площади сечения полые элементы сопротивляются значительно лучше сплошных. На этом основании существует даже мнение, что труба

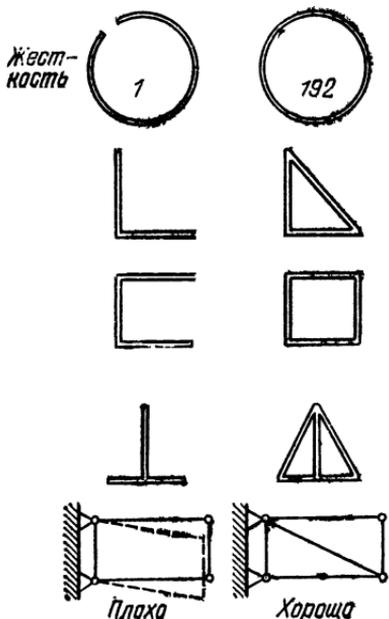


Рис. 88. «Разомкнутые» и «замкнутые» системы

«работает» лучше, чем сплошной стержень того же диаметра. Это ложное мнение. Если наружный диаметр трубы и стержня одинаковы, то стержень «работает» лучше. Но если мы несколько увеличим диаметр трубы против диаметра сплошного стержня, но при этом площадь сечения возьмем для трубы меньше (на деле это означает, что на трубу пойдет меньше материала, и она будет легче), то можно добиться того, что они будут работать одинаково хорошо, а мы, применив трубу, сэкономим материал и добьемся значительно облегчения. То же самое можно сказать, сравнивая сплошной брус с полым коробом (рис. 87, б).

В некоторых случаях выгоднее вместо сплошного сечения взять отдельные стержни в самых напряженных поясах (правая колонка на рис. 85). Так, консоль превращается в кронштейн (рис. 85, а, б), а балка — в плоскую ферму (рис. 85, в—е). Консоль имеет растягиваемый верхний и сжимаемый нижний пояса, поэтому выгодно нижний пояс делать из достаточно толстого стержня, а верхний — из тонкой струны, называемой растяжкой или вантой.

Очень интересная система — ферма. Она представляет собой комбинацию стержневых треугольников, построенных так, что одна из сторон треугольника служит основанием другого треугольника. При этом любые нагрузки, приложенные в вершинах треугольников, вызывают в стержнях только растяжение или сжатие и никогда изгиб. Это

позволяет применить значительно более тонкие стержни, чем в сплошных балках при той же жесткости. Нагружение стержня в середине его пролета в фермах нерационально и никогда не применяется.

Здесь нужно оговориться, что это относится только к случаю, когда стержни соединены между собой шарнирами, как, например, показано на рис. 85. На практике вместо шарниров часто применяют жесткое соединение стержней, например сваркой. В этом случае ферма работает несколько иначе, но она остается фермой с ее основными достоинствами. На рис. 88 показаны различные случаи, когда разомкнутые конструкции выгодно заменить замкнутыми, а прямоугольники из стержней — системой треугольников.

§ 5. ТИПЫ МОНТИРОВОК

Каждый телескоп снабжается штативом, позволяющим направлять телескоп в любую точку небесной сферы и закреплять в нужном положении. В связи с суточным движением небесной сферы штативы, называемые монтировками, нередко снабжаются часовыми приводами, которые чаще всего представляют собой небольшой электродвигатель мощностью в 7—15 ватт, который через систему шестерен вращает весь телескоп со скоростью один оборот в сутки.

Большинство земных зрительных труб снабжается так называемыми азимутальными монтировками с двумя осями — вертикальной и горизонтальной. На рис. 89 показаны две азимутальные монтировки для небольших любительских телескопов.

Монтировка Добсона (рис. 89, а) предназначена для рефлекторов, с помощью которых ведутся только визуальные наблюдения туманностей, скоплений, галактик и комет. Эта довольно простая монтировка делается из многослойной фанеры (8—10 мм) с небольшим использованием металлических деталей. Монтировка Добсона удобна для сравнительно коротких труб рефлекторов Ньютона. Для рефлекторов и «касегренов» больше подходит монтировка рис. 89, б. Здесь изображена монтировка кометоискателя, которым много лет пользуется австралийский ловец комет У. Бредфилд.

Описанные монтировки страдают тем недостатком, что наблюдатель, следящий за суточным движением светила, вынужден поворачивать время от времени телескоп сразу по двум координатам. Это приходится делать тем чаще, чем больше увеличение телескопа.

Если вертикальную ось азимутальной монтировки наклонить на угол, равный широте места наблюдений, и направить ее на полюс мира, то она станет параллельной земной оси (направление, указанное стрелкой на рис. 90). Поворачивая телескоп только вокруг этой оси, мы сможем удерживать светило неопределенно долго в поле зрения телескопа. Эта ось носит название полярной оси, а вся монтировка — полярной или экваториальной.

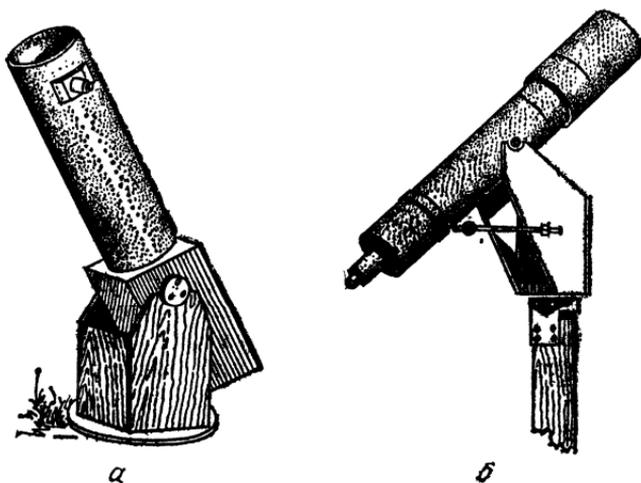


Рис. 89. Азимутальные монтировки: *a* — монтировка Добсона, *б* — кометоскатель Бредфилда

Поворачивая телескоп вокруг полярной оси, мы изменяем часовой угол, а при повороте вокруг оси склонений изменяем склонение. Одна из экваториальных монтировок на полярной оси несет корпус оси склонений. Такая монтировка называется «немецкой». На ней крепятся небольшие телескопы. Монтировка асимметричная и требует противовеса, который для небольших телескопов незначительно увеличивает вес всей установки. Подробнее об этой монтировке мы расскажем ниже.

Традиционная немецкая монтировка (рис. 90, *a*) имеет тот недостаток, что при прохождении светила через меридиан в районе от зенита до точки севера труба своим нижним концом упирается в колонну. Телескоп приходится «перекладывать», повернув на 180° по склонению и на 12 ч по прямому восхождению. После этого наблюдения можно продолжать. Чтобы избежать этого, колонну изгибают под

углом, равным широте места (рис. 90, б), или увеличивают длину полярной оси и опускают опору (рис. 90, в).

Если полярную ось удлинить и опереть на две опоры, монтировку можно сделать значительно жестче. Такая монтировка называется английской (рис. 91, а).

Чем больше вес телескопа, тем больше должен быть противовес и тем больше прогибается полярная ось. Можно «раздвоить» полярную ось, превратив ее в ядро (рис. 91, б). Труба крепится на полуосях, а ядро вращается в двух подшипниках, установленных на двух опорах — северной и южной.

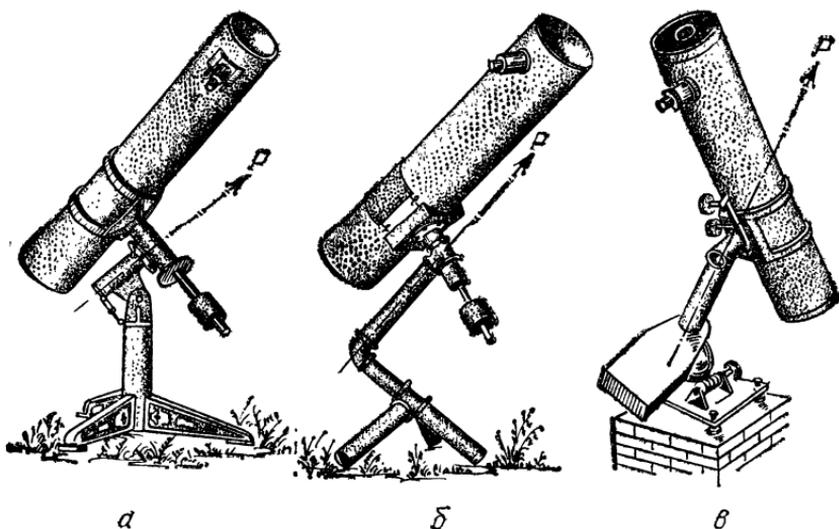


Рис. 90. Немецкие монтировки: а — монтировка с регулируемым наклоном полярной оси, б — монтировка из толстых водопроводных труб, в — монтировка Бостиана и Мейнела [10]

Ядро делают недоступной полярную область неба. Это не очень страшно, так как в околполярной области мало интересных для наблюдений объектов.

При строительстве 5-метрового рефлектора обсерватории Маунт Паломар было решено северный подшипник ядра выполнить в виде подковы, в которую погружается телескоп при наведении на полюс мира *). Эта подкова в лю-

*) Этот тип монтировки предложил в начале века художник, полярный исследователь и любитель телескопостроения Рассел Портер. Когда в 30-е годы он был привлечен к строительству 5-метрового телескопа обсерватории Маунт Паломар, он применил этот тип монтировки для телескопа-гиганта.

бительских монтировках катается на двух небольших ро-
ликах, как это показано на рис. 92, а.

Если подкову снабдить консолями, чтобы нижняя часть
трубы свободно проходила, не задевая плоскость подковы,
то подкову можно заменить сплошной шайбой, как это сде-
лано у 2,5-метрового телескопа им. Ньютона (Англия).

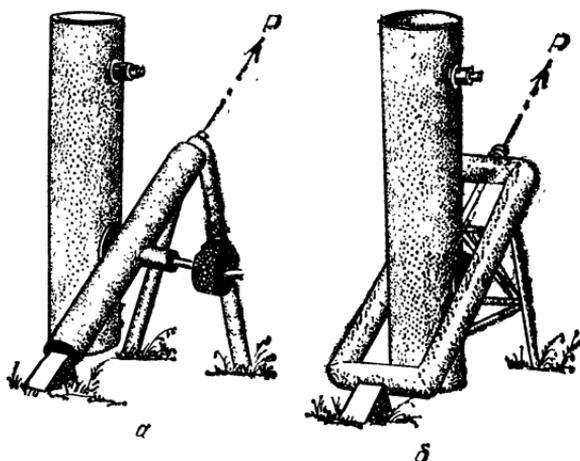


Рис. 91. Английские монтировки: а — асимметричная монтировка, б — ярмо с недоступной полярной областью

Полярной осью служит собственно шайба, которая в люби-
тельских монтировках, как и подкова, катается по двум ро-
ликам и фиксирована в центре короткой осью (рис. 92, б).

Если шайбу заменить поперечной балкой, называемой
траверсой, и обычной полярной осью, получится монтиров-
ка, называемая *вилочной* (рис. 92, в). Обычно к числу ее
достоинств причисляют отсутствие противовеса. Это дей-
ствительно так, если труба не слишком длинна. В против-
ном случае консоли становятся слишком длинными и нежесткими.
Если же нагрузить нижнюю часть трубы, чтобы сместить ее
центр тяжести книзу и тем самым укоротить консоли, то мы
лишим монтировку ее главного преимущества: она станет
тяжелой.

Французский любитель Андриен Понсэ придумал прос-
тое приспособление превращать азимутальную монтировку
в экваториальную. Основной ее узел выглядит так (рис. 93):
вращение осуществляется вокруг шарнира 1. Подвижный
стол 2 опирается на этот шарнир и на наклонную площадку
3, на которую опирается клинообразная рейка 4. Наклон

площадки 3 равен наклону небесного экватора к горизонту $\alpha = 90^\circ - \varphi$, где φ — географическая широта места наблюдения. Шарнир 1 установлен на южном краю монтировки.

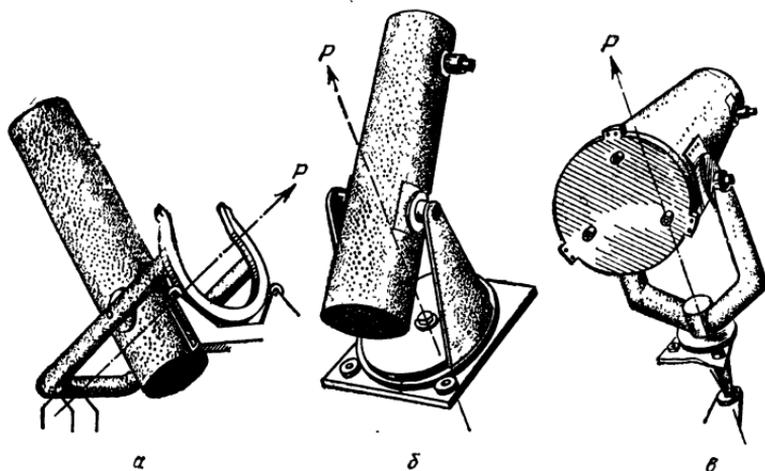


Рис. 92. Монтировки Р. Портера и вилка: а — ярмо с подковой, б — платформа с консолями, в — вилка

Перпендикуляр, проведенный из этой точки к плоскости «экватора» монтировки, является полярной осью P , вокруг которой происходит движение.

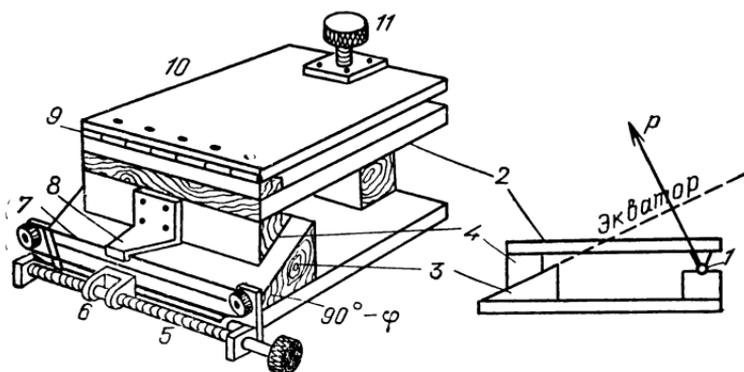


Рис. 93. Монтировка Понсе: 1 — шаровая опора, 2 — горизонтальная платформа, 3 — брусок, срезанный под углом $90^\circ - \varphi$, 4 — опора горизонтальной платформы, скользящая по бруску 3, 5 — винт, 6 — гайка, к которой прикреплен шнур 7, 8 — консоль, скрепленная со шнуром, 9 — мебельный шарнир, 10 — подвижная платформа, 11 — винт для коррекции по склонению

Для движения вслед суточному вращению небесной сферы служит винт 5, который через гайку 6 тащит жесткий шнур 7, а тот с помощью консоли 8 передает движение столу 2. Для коррекции по склонению к столу 2 крепится с помощью мебельного шарнира 9 пластина 10. При необходимости с помощью винта 11 можно сделать поправку по склонению.

Установив на пластину 10 обычную азимутальную монтировку вроде монтировки Добсона, мы получим удобный инструмент для ловцов комет. Поиск ведется обычным образом по горизонтальной и вертикальной осям азимутальной монтировки. В случае обнаружения подозрительного объекта можно легко сделать его фотографию, приводя инструмент в движение вокруг полярной оси P с помощью винта 5. Эта монтировка хороша и для небольших астрографов.

§ 6. КАК ОЦЕНИВАТЬ ЖЕСТКОСТЬ УЗЛОВ МОНТИРОВКИ

Одна из самых важных характеристик монтировки — ее жесткость. Расчет монтировки на жесткость — дело непростое, очень трудоемкое и требует хорошего знания теоретической механики и высшей математики. Но тщательный расчет нам не так уж и нужен. Важно уметь оценить жесткость при выборе той или иной конструкции, того или иного материала.

В этом параграфе мы рассмотрим несколько примеров такой оценки. Для анализа сначала всю конструкцию разобьем на несколько простых элементов (консоль, балка, растягиваемый или сжимаемый стержень). Определим внешние нагрузки на каждый элемент. Это прежде всего сила веса той части телескопа, которая опирается на рассматриваемый элемент.

Если сила действует не под прямым углом к стержню, разложим ее на две составляющие — одну действующую под прямым углом к стержню, а вторую — вдоль стержня. Сделаем это по правилу параллелограмма, известного из школьного курса физики. Сила, действующая вдоль стержня, сжимает его, а действующая поперек — изгибает. В реальных конструкциях более всего для оценки жесткости важны изгибы. Мы рассмотрим только деформации при изгибе, тем более, что деформации при растяжении и сжатии рассматриваются в школьном курсе физики.

Зная величину нагрузки, размеры стержня и точку приложения нагрузки с помощью формул на рис. 88 мы вычис-

Физические свойства некоторых материалов

Материал	ρ , г/см ³	E , 10 ⁸ кг/см ²	α , 10 ⁻⁶ м/град
Медь	8,6	1,1	9,6—11
Алюминий	2,7	0,75	10—18
Сталь	7,7	2,1	5,5—7,2
Ситалл	2,5	1	0
Плавленый кварц	2,2	0,6	0,3
Пирекс (ЛК-5, ЛК-7)	2,3	0,6	1,8
Кроп-8 (и оконное стекло)	2,5	0,75	5,3
Тяжелый флинт	4,4	0,5	4,8
Твердое дерево вдоль волокон	0,8	0,11	2—4
Оно же поперек волокон	0,8	—	18—27

лим величину изгибающего момента в наиболее опасном сечении.

Величина прогиба зависит от изгибающего момента M , геометрических свойств сечения, точнее от величины момента инерции J (рис. 94) и материала, из которого сделан стержень, а точнее от модуля упругости E (модуля Юнга, о котором можно прочесть в школьном учебнике физики) (табл. 21).

Ясно, что чем больше нагрузка (сила веса, нагрузка от ветра, от прикосновения к телескопу, от работы зеркала зеркальной камеры и т. д.) и чем больше плечо, на котором действует эта нагрузка, тем больше изгибающий момент. Прогиб конструкции прямо пропорционален изгибающему моменту. Даже большие усилия на малом (коротком) плече вызовут сравнительно небольшие деформации и, наоборот, малые нагрузки на длинном плече могут вызвать большие деформации. С точки зрения жесткости монтажки надо избегать длинных труб, консолей вилки и т. п.

С другой стороны, сравним деформации одной и той же детали, сделанной из разных материалов. Рассмотрим консоль вилки, сделанную из стали и алюминия. При прочих равных условиях меньше деформируется деталь из материала с большим модулем упругости. Так, для стали $E_{ст} = 2\ 100\ 000$ кг/см², а для алюминия $E_{ал} = 750\ 000$ кг/см². Это значит, что прогибы алюминиевой консоли того же сечения в $2\ 100\ 000 : 750\ 000 = 2,8$ раза больше.

Прогибы обратно пропорциональны моменту инерции сечения, момент инерции прямо пропорционален четвертой степени линейных размеров сечения (см. рис. 94). Иначе го-

вора, увеличив все размеры сечения в 2 раза, мы увеличим жесткость стержня в $2^4=16$ раз.

Из-за нехватки места мы не будем вникать в геометрический смысл момента инерции. Достаточно знать величину момента инерции сечения и уметь ее вычислить.

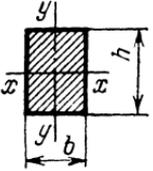
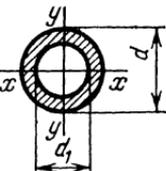
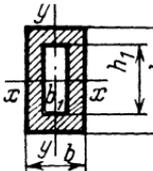
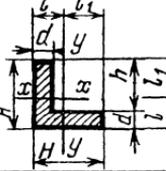
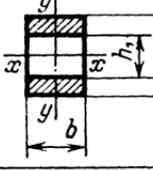
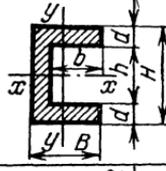
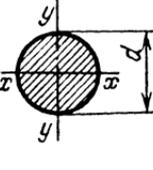
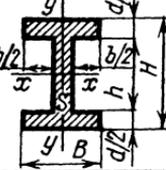
Форма сечения	Момент инерции в см^4	Форма сечения	Момент инерции в см^4
	$J_x = \frac{bh^3}{12}$ $J_y = \frac{hb^3}{12}$		$J_x = J_y = 0,049(d^4 - d_1^4)$
	$J_x = \frac{bh^3 - b_1h_1^3}{12}$ $J_y = \frac{hb^3 - h_1b_1^3}{12}$		$J_x = J_y = \frac{1}{3} [d l_1^3 + H(H-l_1^3) - (H-d) \cdot (H-l_1-d)^3]$
	$J_x = \frac{b}{12} (h^3 - h_1^3)$ $J_y = \frac{b^3}{12} (h - h_1)$		$J_x = \frac{1}{12} (BH^3 - bh^3)$
	$J_x = J_y = 0,049d^4$		$J_x = \frac{1}{12} (BH^3 - bh^3)$ $J_y = \frac{1}{12} (dB^3 + hS^3)$

Рис. 94. Таблица сечений и моментов инерции

Чтобы алюминиевый стержень в предыдущем примере деформировался не больше стального, размеры его поперечного сечения нужно увеличить в $\sqrt[4]{2,8} = 1,3$ раза. Например, если диаметр трубы, из которого сделаны консоли, увеличить с 50 до 65 мм, а толщину стенок с 4 до 5 мм, то стальную консоль можно заменить на алюминиевую. Жесткость 65-миллиметровой алюминиевой трубы будет та же, что и 50-миллиметровой стальной. Но плотность алюминия $\rho_{ал} = 2,8 \text{ г/см}^3$, а стали — $\rho_{ст} = 7,7 \text{ г/см}^3$. Вычислим

объем в сантиметрах и массу обеих труб длиной по 1 метру

$$M_{ал} = \rho_{ал} V = 2,8 \cdot \frac{3,14}{4} (6,5^2 - 5,5^2) \cdot 100 = 2638 \text{ г} \approx 2,6 \text{ кг.}$$

Масса стальной равна

$$M_{ст} = \rho_{ст} V = 7,7 \cdot \frac{3,14}{4} (5,0^2 - 4,2^2) \cdot 100 = 4449 \text{ г} \approx 4,4 \text{ кг.}$$

При одинаковой жесткости 65-миллиметровая алюминиевая труба в $4,4 : 2,6 = 1,7$ раза легче 50-миллиметровой стальной.

Этот пример наглядно показывает, что для достижения большой жесткости необязательно повышать вес монтировки. Именно таким путем идут конструкторы серийных любительских телескопов, когда важно, чтобы даже относительно крупные инструменты оставались еще транспортабельными.

Другой пример. Если диаметр оси склонений немецкой или английской монтировки увеличить в 1,19 раза, например с 50 до $59,6 \approx 60$ мм, то момент инерции и жесткость возрастут в $1,19^4 = 2$ раза. Во столько же уменьшатся прогибы оси при различных нагрузках. Если же прогибы оставить прежние, то на 60-миллиметровой оси можно «повесить» трубу вдвое тяжелее.

Рассмотрим, на какой угол закрутится полярная ось, закрепленная тормозом на расстоянии l от ее верхнего конца, где крепится корпус оси склонений. Этот угол для круглого стержня равен

$$\varphi = \frac{2M'_k l}{G\pi R^4} \text{ (рад),}$$

где M_k — момент кручения, l — закручиваемая длина оси, G — модуль упругости при сдвиге, который для большинства металлов приблизительно равен трети модуля упругости при изгибе ($G \approx 0,3E$), R — радиус оси.

Предположим, что к верхнему концу телескопа на расстоянии $L = 110$ см от оси склонений приложена сила в 1,5 кг в направлении суточной параллели. Возьмем самый опасный случай, когда труба телескопа направлена на экватор и ее ось перпендикулярна полярной оси. В этом случае $M_k = 1,5 \cdot 110 = 165$ кг·см. Примем длину закручиваемой части полярной оси (расстояние от ее тормоза или червячной пары до верхнего конца) $l = 50$ см (рис. 90, в). Диаметр оси возьмем равным 4 см, тогда $R = 2$ см. Положим материал

оси — сталь. Тогда модуль упругости сдвига $G=2\ 100\ 000 \times 0,3=630\ 000$ кГ/см². Подставив все значения величин в формулу, получим

$$\varphi = \frac{165 \cdot 50 \cdot 2}{630\ 000 \cdot 3,14 \cdot 16} = 0,00052 \text{ рад, или } \varphi = 1,8'.$$

Если принять во внимание, что в действительности деформироваться будут и труба и ось склонений и деформации могут возникнуть также в месте сочленения полярной оси с корпусом оси склонений, то ясно, что реальное смещение объекта в поле зрения будет еще больше. Особенно это опасно в ветреную погоду, когда нагрузка быстро меняется, а телескоп дрожит. Чтобы увеличить жесткость оси, можно перенести червячную пару ближе к оси склонений. Если, например, взять $l=10$ см, то деформации оси уменьшатся в $50 : 10=5$ раз.

Если для полярной оси использована толстостенная труба, то вместо R^4 нужно взять $(R_1^4 - R_2^4)$, где R_1 и R_2 — наружный и внутренний радиусы трубы.

Рассмотрим кручение траверзы вилки, когда на трубу телескопа действует боковая нагрузка, как в предыдущем случае. Возьмем ту же нагрузку и длину трубы L . Если ширина вилки (расстояние между консолями) B , то силы, действующие на концы консолей, равны $P_1=P_2=P_0 \cdot L/B$. Примем ширину вилки $B=40$ см. Тогда усилия на концах консолей будут равны $P_1=P_2=1,5 \cdot 110 : 40=4,125$ кГ. Крутящий момент $M=4,125 \cdot 40=165$ кГ·см.

Если вилка и траверза сделаны из труб, то расчет дальше ведется, как в предыдущем примере. Если траверза — прямоугольный стержень (алюминий), то угол поворота равен

$$\varphi = \frac{2Ml}{\alpha Gbc^3},$$

где b — высота сечения, c — ширина сечения, α — коэффициент, который для квадратного сечения, когда $b/c=1$, равен 0,14. Если отношение $b/c=1,5$, то $\alpha=0,20$, при $b/c=2$ $\alpha=0,23$, при $b/c=4$ и более $\alpha \approx 0,3$.

Предположим, что траверза имеет сечение $b \times c = 12 \times 5$ см. Тогда угол кручения в нашем примере составит

$$\varphi = \frac{2 \cdot 165 \cdot 40}{0,25 \cdot 250\ 000 \cdot 12 \cdot 5^3} = 0,000014 \text{ рад, или } 29''.$$

Последовательно складывая деформации всех элементов монтировки, мы найдем общее смещение оптической оси

телескопа. В зависимости от требований к телескопу это смещение может оказаться допустимым или недопустимым. Нужно только иметь в виду, что чаще всего при снятии нагрузки телескоп довольно быстро успокаивается. К сожалению, время, в течение которого затухают колебания телескопа (одна из самых важных характеристик монтировки), рассчитывается слишком сложными методами. Чтобы читатель мог сделать выбор конструкции и размеров ее элементов, лучше всего внимательно изучить помещенные в этой книге рисунки и фотографии построенных телескопов. Автор стремился избегать слишком схематических изображений.

§ 7. КОНСТРУКЦИЯ ОПРАВЫ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

Если зеркало с оправой установлено внутри трубы, то оно достаточно защищено. Труба может быть сравнительно простой и легкой (рис. 95). Все устройство состоит из опорной пластины 3, которая в трех точках с помощью уголков 4 крепится к трубе телескопа 8. Эта пластина несет на себе другую пластину 2, которая служит собственно оправой зеркала. Зеркало 1 удерживается с помощью трех лапок 5, сделанных из 2—3-миллиметрового алюминия.

Зеркало опирается на три точки. Эти «точки» представляют собой три кружка из фетра, войлока, толстого картона 9. Их диаметры должны составлять $1/8$ — $1/10$ диаметра зеркала. Приклеиваются они к пластине каким-нибудь синтетическим клеем.

Материал оправы, например алюминий, имеет отличный от стекла коэффициент температурного расширения и при изменениях температуры зеркало может оказаться зажатым в оправе и покоробленным. Поэтому зеркало должно немного «играть» в оправе.

Как точно определить нужный зазор между удерживающей деталью и зеркалом? Ясно, что этот зазор должен быть не меньше той разницы в изменяющихся размерах зеркала и оправы, которая возникает при изменении температуры. Предположим, что зеркало диаметром 200 мм может нагреться летним днем до $+30^\circ\text{C}$, а зимней ночью охладиться до -30°C . Перепад составляет 60°C . Зная коэффициент температурного расширения стекла *) (для ЛК7, например, он равен $\alpha = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}/\text{мм}$) и алюминия — $23 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}/\text{мм}$, мы можем вычислить, на сколько изменится радиус зеркала и на сколько переместится боковой упор оправы. Из

*) См. табл. 21,

школьного курса физики мы знаем, что удлинение при нагревании равно $\Delta l = lT\alpha$, где l — длина предмета, T — интервал температур.

Подставив наши числа в формулу, получим для алюминия $\Delta l = 100 \cdot 60 \cdot 23 \cdot 10^{-6} = 0,138$ мм, а для ЛК7 $\Delta l =$

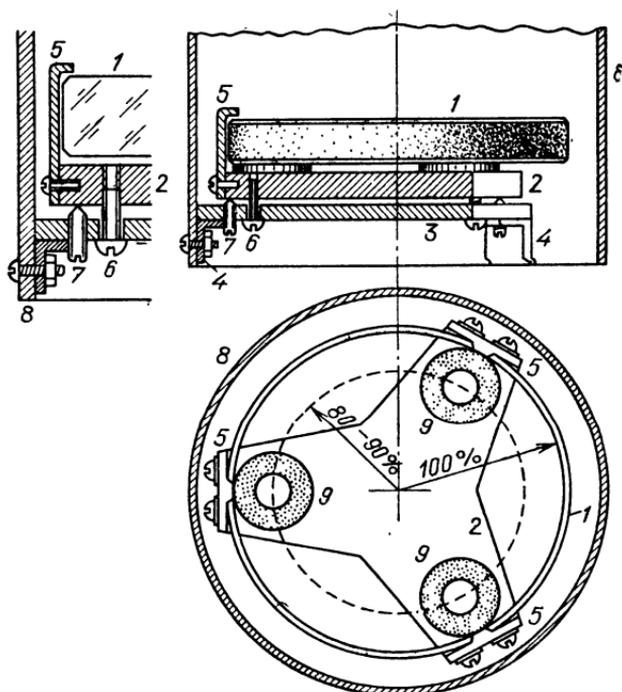


Рис. 95. Простая оправа: 1 — зеркало, 2 — пластина оправы, 3 — опорная пластина, 4 — уголок для крепления к трубе 8, 5 — лапка, удерживающая зеркало, 6 — юстировочный винт, 7 — стопорный винт, 8 — труба, 9 — три фетровые опоры

$= 100 \cdot 60 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} = 0,023$ мм. Разность между этими удлинениями и есть минимальный зазор между зеркалом и упорами оправы. В нашем случае он равен 0,115 мм. Для верности сделаем этот зазор шириной 0,2—0,3 мм. При переключивании трубы смещение зеркала на такую величину не скажется на качестве изображения.

Для точной установки зеркала относительно оси трубы и других оптических деталей нужно, чтобы оно вместе с оправой могло в небольших пределах наклоняться (юстироваться). С этой целью наша оправа снабжена юстировочными 6 и стопорными 7 винтами. При прямом вращении юстировочного винта 6 оправа опускается; стопорный винт для

этого должен быть ослаблен. Ослабив винт 6 и вворачивая винт 7, мы поднимаем край оправы. После юстировки стопорный винт 7 при прямом вращении упирается концом в нижнюю сторону оправы и надежно фиксирует край.

Если зеркало тонкое, его нужно разгрузить на шесть точек. Это делается с помощью V-образных коромысел, которые могут свободно покачиваться (рис. 96). Каждое

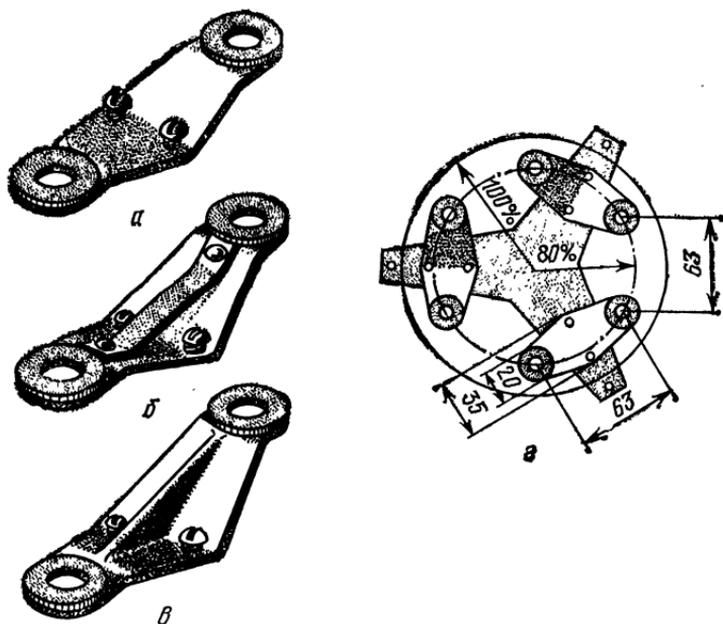


Рис. 96. Оправа с разгрузкой на шесть точек

плечо коромысла служит одной «точкой». Когда зеркало кладется на все три равноудаленных коромысла, они легко устанавливаются так, что на каждое плечо приходится совершенно одинаковая нагрузка. Важно, чтобы коромысла от нагрузки не деформировались. Для 150-миллиметрового зеркала нужно взять сталь или латунь толщиной 1,5—2 мм или алюминий 3 мм. При переходе к большему зеркалу размеры коромысел нужно пропорционально увеличить, а толщина может остаться той же, если жесткость коромысла увеличить добавлением одной «тяги», как показано на рис. 96, б. Можно отлить коромысла с ребрами жесткости

из алюминия, силумина и т. п. (рис. 96, *в*). О том, как это сделать, рассказано в первом издании этой книги. Пример оправы с разгрузкой на шесть точек показан на рис. 96, *г*. Размеры указаны для 150-миллиметрового зеркала.

Еще более тонкие зеркала разгружаются на 9 и даже 18 точек (рис. 97). Крупные зеркала диаметром более 250—300 мм нужно разгружать и по боковой поверхности. При разгрузке по торцу на шесть точек применяют коромысла

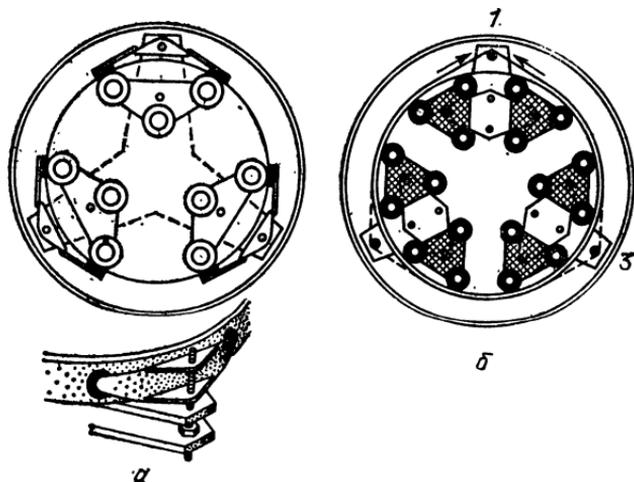


Рис. 97. Оправы с разгрузкой на 9 (*а*) и 18 (*б*) точек

вроде тех, что используются для разгрузки зеркала с тыльной стороны. Коромысла должны свободно покачиваться. В клубе им. Д. Д. Максимова для этого делаются три длинных винта диаметром 8—10 мм. До того как зеркало установлено в оправе, на эти винты наворачиваются коромысла, в отверстиях которых нарезана соответствующая резьба. Таким образом, коромысло может покачиваться, но не съезжает вниз.

Для разгрузки боковой поверхности можно применить три тросика, надетых на три опорных стержня 1, 2, 3, как показано на рис. 97, *б*. Зеркало оказывается подвешенным, как на стенде для теневых испытаний. Все три троса должны быть немного натянуты, для чего нужно предусмотреть устройство с винтом и гайкой.

Когда телескоп выносят на улицу, перепады температуры могут достигать 50—60 °С. Так как стекло имеет малую теплопроводность, то в то время, когда внешние слои стекла уже остыли, внутренние все еще сохраняют прежнюю тем-

пературу. Это немедленно приводит к короблению зеркала и резкому ухудшению качества изображения. Нужно время, чтобы по всей толщине зеркала выравнялась его температура. Большое достоинство описанных оправ состоит в том, что зеркало в них не закрыто и обдувается воздухом со всех сторон. Это означает, что оно скорее принимает температуру окружающего воздуха.

Эти оправы широко применяются в серийном производстве любительских телескопов во всем мире. Они использованы в большинстве телескопов клуба им. Д. Д. Максудова и прекрасно работают в телескопах диаметром по крайней мере до 300—400 мм.

§ 8. ОПРАВА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЗЕРКАЛА

Диагональное зеркало или призма в системе Ньютона устанавливается внутри трубы на верхнем ее конце. В небольшом телескопе диаметром до 140—150 мм лучше всего применить стойку, вырезанную из латунной или стальной пластины толщиной 1,5 мм, или же алюминиевой до 3 мм. Алюминий для этих целей надо брать мягкий, чтобы он легко гнулся без изломов под углом 90°. Стойка вырезается ножницами по металлу и потом гнется, как показано на рис. 98, а. На рисунке линейные размеры указаны для трубы диаметром 180 мм (для 140—150-миллиметрового зеркала); для меньших или больших труб размеры нужно пропорционально изменить. Зеркало тыльной стороной приклеивается к стойке на картонной или кожаной прокладке для компенсации различных для стекла и металла температурных деформаций. Можно его приклеить мягким клеем типа «герметик», но только в центральной части, а не по всей поверхности. В этом случае можно обойтись без прокладки. Толщина стойки увеличивается пропорционально диаметру главного зеркала.

Призма клеивается нерабочими треугольными матовыми плоскостями. Нужно следить, чтобы клей не попадал на рабочие, отполированные грани призмы. Особенно опасен канцелярский клей, после которого на поверхности полированного стекла остаются матовые неудаляемые пятна. Вообще же канцелярский клей хорошо склеивает металл со стеклом, бумагой и стекло с бумагой. Правда, через 3—4 месяца клей разрушается. Поэтому его можно применять для временных соединений. Между призмой и стойкой должны быть прокладки из бумаги или тонкого картона толщиной 0,5—1 мм.

Юстируется такая оправа изгибанием стойки, если надо зеркало сместить к оптической оси главного зеркала, перемещением вдоль оси в продолговатых отверстиях для винтов, крепящих стойку к стенке трубы, подкладыванием

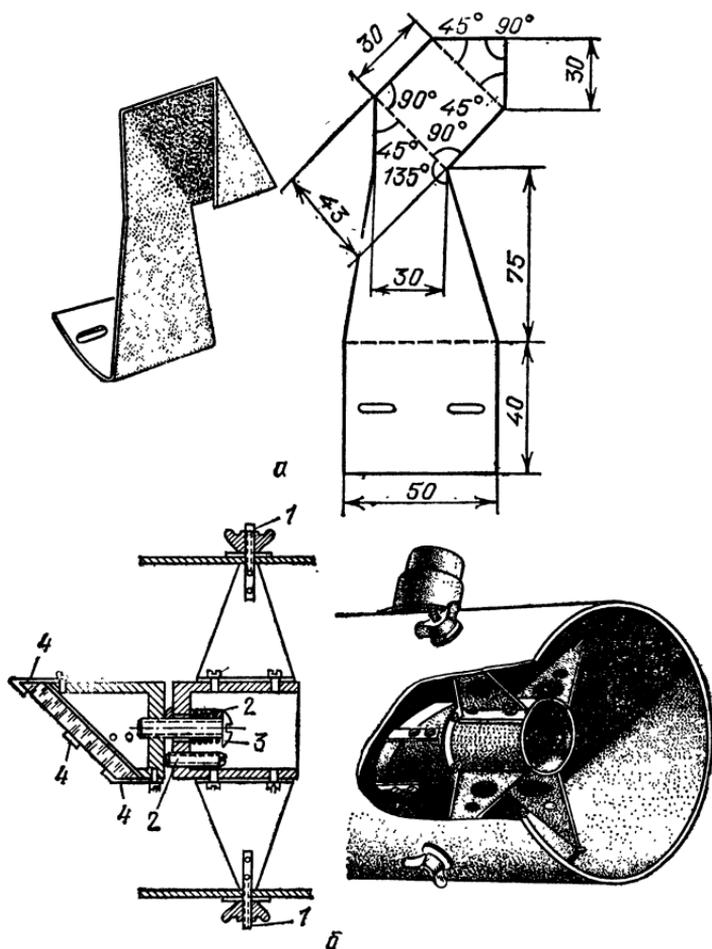


Рис. 98. Оправы вспомогательных зеркал: 1 — винты с барашками или гайками, 2 — юстировочные винты, 3 — винт с возвратной пружиной, 4 — лапки

шайб между стенкой трубы и основанием стойки для наклона, подъема или опускания зеркала. Оправа со стойкой зарекомендовала себя очень хорошо, она проста в изготовлении и удобна в работе.

Для телескопов диаметром больше 200 мм лучше применить систему растяжек, так как толщина стойки будет увеличиваться пропорционально ее длине. Например, для 300-миллиметрового главного зеркала толщину стойки придется увеличить с 1,5 мм до 3 мм. Рис. 98, б поясняет устройство растяжек и оправы. Растяжки работают только на растяжение и потому могут быть тонкими. Для телескопа диаметром 200—250 мм они могут иметь толщину 0,5—0,7 мм. Их можно сделать из жести или кровельной стали. Растяжки должны быть хорошо натянуты. На конце каждой из них крепятся длинные винты-шпильки 1, которые

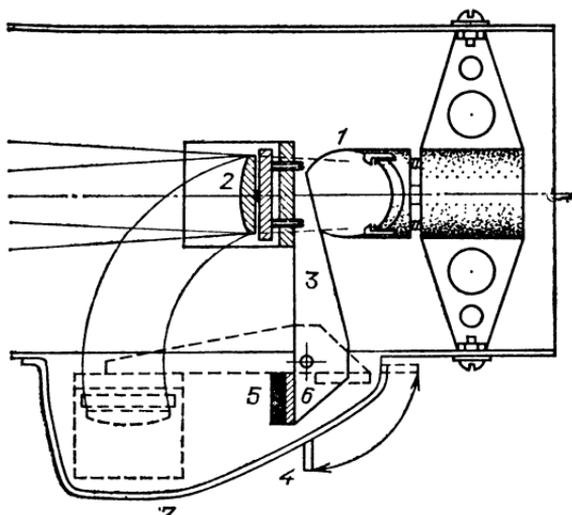


Рис. 99. Переход от фокуса Ньютона к фокусу Кассегрена: 1 — диагональное ньютоновское зеркало, 2 — вторичное кассегреновское зеркало, 3 — стойка, 4 — ручка для откидывания стойки (виден только ее конец), 5 — магнит, 6 — стальная пластина, 7 — кожух, предохраняющий зеркало в нерабочем положении

вставляются в отверстия в трубе так, что их концы оказываются снаружи. На эти шпильки наворачиваются гайки с широкими шайбами, ими растяжки и натягиваются.

Нужно помнить, что четыре растяжки рациональнее трех, так как три растяжки дают шесть дифракционных лучей, а четыре растяжки — только четыре луча. Жесткость же и в том, и в другом случае одинакова.

Конструкция оправы ясна из рисунка. Зеркало легко юстируется тремя юстировочными винтами 2, расположенными через 120° относительно центрального винта,

и центральным винтом 3 с возвратной пружиной. Пружину можно убрать и стопорить оправу этим центральным винтом.

Зеркало крепится к срезанной под углом 45° части оправы четырьмя лапками из 1-миллиметровой латуни или стали 4, которые приворачиваются к оправе небольшими винтами.

Подобным образом устроены и оправы вторичных зеркал кассегреновских и грегорианских телескопов. Часто телескоп имеет два фокуса: кассегреновский и ньютонский. В этом случае желательно устройство для быстрого перехода от одного к другому. На рис. 99 показана конструкция, сделанная А. Н. Болтневым по идее автора. Она позволяет перейти от одного фокуса к другому за одну-две секунды. Здесь стойка оправы вторичного зеркала поворачивается вокруг оси и тем самым вторичное зеркало вводится в поток света или выводится из него. В рабочем положении стойка кассегреновского зеркала фиксируется сильным магнитом 5.

§ 9. ОКУЛЯРНЫЙ УЗЕЛ

Среди наблюдателей, работающих с телескопом, могут оказаться не только люди с нормальным зрением, но и близорукие и дальнозоркие. Для близорукого глаза окуляр приходится несколько приблизить к зеркалу, для дальнозоркого — отодвинуть. Величину, на которую надо переместить окуляр, можно определить по формуле

$$\pm\Delta = D \cdot \frac{\phi^2}{1000},$$

где D — число диоптрий близорукого или дальнозоркого глаза (для близорукого эта величина берется со знаком «минус», для дальнозоркого — со знаком «плюс»), ϕ — фокусное расстояние окуляра в миллиметрах. Например, близорукость наблюдателя — 3 диоптрии, фокусное расстояние окуляра 40 мм. Перемещение окуляра составит

$$\Delta = -3 \cdot \frac{40^2}{1000} = -4,8 \text{ мм.}$$

Чем больше близорукость (или дальнозоркость) наблюдателя, тем больше придется передвигать окуляр. Наоборот, чем меньше фокусное расстояние окуляра, тем меньше надо его передвигать при той же близорукости. По приведенной формуле читатель без труда определит, насколько ему при-

дется передвигать окуляр, а значит, и сможет вычислить необходимую длину фокусирующей трубки.

Есть еще несколько причин, по которым приходится передвигать окуляр, добиваясь наилучшей фокусировки. При изменениях температуры воздуха из-за температурных деформаций зеркала его радиус кривизны и фокусное расстояние изменяются, поэтому требуется небольшая перефокусировка окуляра. Перефокусировка требуется и при смене окуляров из-за небольших ошибок в размерах их оправ. При наблюдении земных предметов, когда расстояние до предмета не равно «бесконечности», приходится слегка выдвигать окуляр; этот эффект уже хорошо заметен при фокусном расстоянии зеркала 1000 мм и расстоянии до объекта менее 1,5—2 км.

Для определения смещения фокальной плоскости воспользуемся формулой Ньютона $x_1 \cdot x_2 = f^2$, где x_1 — расстояние от предмета до переднего фокуса системы, x_2 — расстояние от заднего фокуса до изображения предмета. Это именно та величина, на которую нужно сместить окуляр, чтобы изображение близко расположенного предмета стало резким. Если расстояние до предмета существенно больше фокусного расстояния телескопа, под x_1 можно понимать расстояние от предмета до объектива или зеркала телескопа. В этом случае $x_2 = f^2/x_1$. Например, 150-миллиметровый телескоп автора с $f' = 960$ мм при наблюдении телевизионной башни в 1200 метрах (1 200 000 мм) приходится перефокусировать на $x_2 = \frac{960^2}{1200000} = 0,77$ мм

Исходя из этих предпосылок рассмотрим простейшую конструкцию фокусирующего устройства (рис. 100, а). Оно состоит из двух трубок: неподвижной 1, которая крепится непосредственно к трубе телескопа, и подвижной 2, которая с трением, но плавно перемещается в первой.

Большую по диаметру трубку вклеивают в круглое отверстие в стенке трубы телескопа, которое сначала высверливается по окружности дрелью, а потом обрабатывается полукруглым напильником. Чтобы склейка была прочной, смочим в эпоксидной смоле жгутик из ваты, следя за тем, чтобы вата полностью пропиталась смолой, и проконопатим этим жгутиком место склейки, чтобы образовался плотный шов. После затвердевания смолы обрабатываем шов напильником.

Вставим меньшую трубку в первую и станем, слегка поворачивая ее, вдвигать или выдвигать. Чтобы трубка не проваливалась в неподвижную, на краю подвижной надо

сделать бортик. Окуляр вставляется в подвижную трубку также на трении.

Можно несколько усовершенствовать это устройство, если на наружной трубке просверлить серию одинаковых

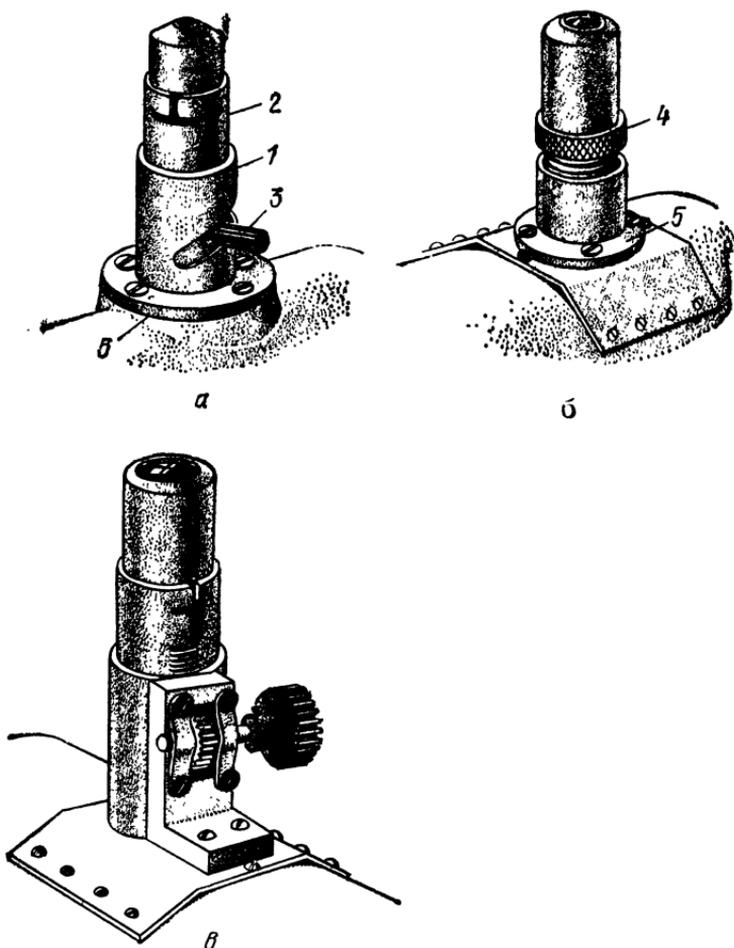


Рис. 100. Фокусировочные устройства: 1 — неподвижная и 2 — подвижная трубки, 3 — винт, 4 — валик с накаткой, 5 — фланец

отверстий вдоль спиральной линии, а потом распилить их надфилем, чтобы получился криволинейный направляющий паз одинаковой ширины. В подвижной трубке сверлится отверстие и нарезается метчиком резьба для винта М4—М6. Вставив винт в направляющую щель, ввернем его в отвер-

стие с резьбой в подвижной трубке. Ведя за винт 3, можно с удобством перемещать подвижную трубку. Вместо стандартного винта лучше сделать специальный поводок. Для этого на стержне подходящего диаметра нарезаем леркой резьбу на длину чуть больше толщины стенки подвижной трубки. Остальную часть стержня оставляем гладкой.

Если вы имеете доступ к токарно-винторезному станку, можно и подвижную трубку снабдить резьбой с шагом около 2 мм (рис. 100, б). Резьбу лучше сделать однозаходную: так и проще и удобнее. В этом случае неподвижная трубка должна быть снабжена фланцем 5, с помощью которого она крепится к трубе телескопа. Подвижная трубка снабжается валиком с накаткой 4. Для того чтобы окуляр надежно держался на своем месте, надо на конце подвижной трубки сделать пропилы, как показано на рис. 100, а, в, и несколько подогнуть внутрь образовавшиеся концы.

Будет хорошо, если удастся достать старое фокусирующее устройство микроскопа с кремальерой: специальной зубчатой гребенкой, по которой катится зубчатое колесо с тем же шагом зубьев *). На валу этого колеса установлена ручка — штурвальчик, которую наблюдатель вращает. Зубчатое колесо толкает гребенку, а та в свою очередь заставляет подвижную трубку с окуляром передвигаться вдоль оси.

Если у вас есть доступ к фрезерному станку, можно гребенку нарезать прямо на подвижной трубке. Для этого, выточив и тщательно подогнав подвижную трубку к неподвижной, устанавливаем подвижную трубку в тисках фрезерного станка перпендикулярно к дисковой фасонной зуборезной фрезе и начинаем последовательно нарезать зуб за зубом, перемещая каретку с тисками вдоль оси трубки каждый раз на величину шага, который надо предварительно замерить на специально подобранной широкой шестеренке, которая будет служить в окончателно собранном узле. Детали этого устройства хорошо видны на рис. 100, в.

Длина подвижной трубки должна быть такой, чтобы при самом большом выдвигении она на 1,5 своего диаметра оставалась в неподвижной трубке.

Внутренний диаметр подвижной трубки выбирается из расчета, чтобы стенки трубки не срезали конуса лучей. Приблизительно этот диаметр можно определить, если к диамет-

*) Кремальеру с гребенкой можно заменить устройством, применяемым в фотоувеличителях: гладкой направляющей, по которой катится обрезиненный ролик,

ру конуса лучей в том сечении его, где он входит в трубку, прибавить линейный поперечник поля зрения. Если при определении размеров диагонального зеркала мы допускали некоторое виньетирование пучка на краю, то в случае с окулярной трубкой виньетирование должно быть исключено, так как край трубки расположен слишком близко к фокальной поверхности и границы срезаемой части слишком резки. Поэтому виньетирование лучше всего полностью исключить.

§ 10. ТРУБА

В многочисленных руководствах по любительскому телескопостроению постоянно указывается на то, что большая масса телескопа — залог его высокой жесткости. Эта тенденция, до сих пор широко бытующая в любительской среде, приводит просто к курьезным последствиям. Складывается впечатление, что часто любители соревнуются в том, кому удалось сделать телескоп самой большой массы. Известны 150-миллиметровые рефлекторы массой 500—800 кг. Их трубы — нередко стальные цилиндры с толщиной стенок 3—5 мм! Для сравнения укажем, что грамотно сконструированная и снабженная ребрами жесткости труба 600—700-миллиметрового телескопа обычно имеет толщину стенок 2—3 мм. Еще более разительные результаты мы видим, когда профессиональный конструктор, комплексно подходя к задаче, не только «выжимает» максимум возможного из механической части телескопа, но еще и выбирает рациональную оптическую схему. Так, например, телескоп системы Шмидта — Кассегрена «Силестрон-14», имеющий действующее отверстие диаметром 350 мм и эквивалентное фокусное расстояние 3500 мм, настолько легок, что его переносит один человек!

Кроме чисто эстетической стороны этой инженерной задачи есть еще и утилитарная сторона дела: большинство любителей не имеет постоянной обсерватории и вынуждено выносить телескоп на площадку чаще всего в одиночестве. «Чикинская доска» слишком примитивна и требует ненамного меньше труда, чем описанная здесь круглая труба. Квадратная труба, сделанная из дерева, слишком тяжела, а сделанная из металла (например, алюминия) слишком трудоемка при посредственных качествах. Фермы, в том числе ферма Серрюрье, и предварительно напряженная ферма А. Н. Подьяпольского слишком трудоемки и рациональны только для сравнительно больших телескопов, когда друго-

го разумного решения просто нет. При диаметре зеркала до 300—400 мм и длине до 2—2,5 м нет смысла отказываться от круглой тонкостенной трубы.

Заметим, что многие зарубежные фирмы на протяжении уже трех десятилетий выпускают такие трубы подобных размеров, склеенные из стеклоткани, а начиная с конца 70-х годов многие из них перешли на бумажно-клеевые трубы как еще более рациональные. Диаметры этих труб от 120 до 800 мм. Для телескопов указанных размеров жесткость труб вполне достаточна, а масса несоизмеримо меньше массы металлических.

Недавний беспримерный кругосветный полет Дика Рутана и женщины-пилота Джини Йигер без посадки и дозаправки на самолете, сделанном из бумаги, проклеенной эпоксидной смолой, показал уникальные свойства этого материала. В смолу добавлялись еще графитоволокнистые материалы. Это дало материал, в три раза легче алюминия и в семь раз прочнее. За десять дней непрерывного полета самолет несколько раз пересекал сильные тропические грозы и ураганы, имевшие скорость до 120 км/ч, во время которых, по словам Дика, ветер «мог оторвать крылья самому мощному «Боингу».

Бумажная труба, проклеенная эпоксидной смолой, не только достаточно прочна, жестка, но и виброустойчива, что не менее важно. Она легко гасит вибрации в отличие от металлической.

Если диаметр трубы невелик, подберем болванку из дерева, металлическую или асбоцементную трубу с наружным диаметром, равным внутреннему диаметру трубы телескопа. Этот последний должен быть на 25—30 мм больше диаметра зеркала, но если размеры оправы вынуждают взять больший диаметр, значит, надо его увеличить. На эту болванку плотно наматываем два слоя газетной бумаги, и чтобы она не разматывалась, «прихватим» канцелярским клеем или изолентой. После этого смажем газету каким-нибудь маслом, чтобы она впоследствии не прилипла к эпоксидной смоле. Некоторые любители не обращают на это внимания, и их трубы навсегда приклеиваются к болванке.

Приготовим 150—200 г эпоксидной смолы с отвердителем, смешивая 6—8 частей смолы с 1 частью (по объему) отвердителя. Обернем болванку одним слоем ватмана без смолы и после этого намажем полосу шириной 200—300 мм вдоль трубы смолой на внутренней стороне бумаги. Намазывать лучше всего широкой лопаткой в виде шпателя, постоянно следя за тем, чтобы слой смолы был одинаковой

толщины и без неоднородностей. Нужно, чтобы ватман наматывался совершенно ровно, не перекашиваясь при намотке. После примерки наматываем смазанную часть на болванку и намазываем еще 200—300 мм. Наматывая ватман, очень важно следить за тем, чтобы между слоями не образовывалось пустот. Если это произошло, нужно постараться выдавить воздух, разглаживая лист. Если это не помогает, надо лезвием бритвы надрезать «пузырь» и выдавить воздух в разрез, разгладив бумагу.

Смола быстро твердеет, поэтому не нужно готовить ее более 200 г. Когда смола кончается, очень важно очистить посуду, не оставив твердеющей смолы, так как в следующей порции смолы будут попадаться твердые комочки, которые трудно устранить.

Обычно ширина листа ватмана недостаточна для полной длины трубы, в этом случае склеим две трубы длиной в ширину ватмана и половиной толщины. После затвердевания обеих половинок составим их торцами и навернем лист ватмана на стык. Для лучшей стыковки труб очистим края от наплывов смолы и косо наматавших краев бумаги. Навернув среднюю часть трубы, навернем бумагу на ее концы. Ширина этих полос, разумеется, меньше полной ширины бумаги. Подобным образом поступаем, если длина болванки мала. Нужно следить за тем, чтобы швы всегда были «вразбежку» — не совпадали один с другим. Важно, чтобы бумага или стеклоткань не просто склеивались, а хорошо пропитывались на всю толщину листа. Только в этом случае получается достаточно однородная и прочная масса. Поэтому нужно, чтобы смола была не слишком густой. Если она густа, можно добавить пластификатора или просто ацетона. Ацетон наливается в посуду, куда наложена густая смола без отвердителя и оставляется до полного растворения смолы. Обычно на это требуется около суток.

Общая толщина стенок трубы 150-миллиметрового рефлектора должна быть 3—4 мм, если труба склеена из ватмана и 2—3 мм, если из стеклоткани. Расчеты показывают, что жесткость на поперечный изгиб 200-миллиметровой трубы (для 150—170-миллиметрового зеркала) при толщине бумажных стенок 3—4 мм с эпоксидной смолой не ниже, чем жесткость на изгиб сплошного стального стержня диаметром около 40 мм. На первый взгляд этот результат кажется совершенно бессмысленным. Чутье подсказывает нам, что стальной стержень должен быть значительно жестче бумажного. Но если вспомнить, что сейчас речь идет только о жесткости при поперечном изгибе трубы от совер-

шенно равномерно распределенной по ней нагрузки, то такой результат удивлять не будет.

В действительности на трубу действуют несколько сосредоточенных нагрузок: вес оправы и зеркала, оправы диагонального зеркала, окулярного узла и, наконец реакция опоры — оси склонений, к которой прикреплена труба. Если на стенку тонкостенной трубы воздействовать большой сосредоточенной нагрузкой, например просто сильно надавить рукой, она прогнется, а может и проломиться. Для того чтобы этого не случилось, надо ввести несколько ребер жесткости, которые, мало добавляя в массу, значительно увеличат жесткость при сосредоточенных нагрузках. Эти ребра могут выглядеть как дополнительные кольца из металла или все той же бумаги или стеклоткани. На рис. 57, а показана такая труба в разрезе. Сначала склеиваются кольца толщиной примерно 4—5 мм и длиной по 100 мм для концов трубы и 200 мм для того места, где будет крепиться ось склонений. Потом на эти кольца наворачиваются слои собственно трубы. Ребра жесткости можно навернуть и сверху трубы, но при этом несколько пострадает внешний вид телескопа. Ребра жесткости должны быть расположены в местах приложения сосредоточенных нагрузок.

Если автору книги не удалось убедить читателя в целесообразности бумажно-клеевой трубы или трубы из стеклопластика, он может изготовить и металлическую трубу. Материалом здесь будет служить листовая, 0,5—0,8 мм, сталь или листовая алюминий. Толщина листа алюминия 0,8—1 мм. В качестве ребер жесткости можно использовать три старые алюминиевые кастрюли с незавальцованными краями, в дне которых вырезается круглое отверстие с таким расчетом, чтобы оставался внутренний бортик шириной около 15 мм для нижнего конца трубы, 10 мм для средней части и около 5 мм для верхней части (рис. 101, б). Впрочем, от третьей кастрюли можно отказаться, если завальцевать верхний край трубы. Делается это с помощью плоскогубцев, которыми, постепенно отгибая наружу край на ширину 8—10 мм, мы обходим всю окружность (рис. 101, в). После первого круга, когда край отогнут на 40—45°, повторяем операцию, отгибая кромку на 5—6 мм еще на 45°, наконец, отгибаем кромку шириной около 2—3 мм еще на 45°. Так сделан верхний конец 250-миллиметрового телескопа Ньютона клуба им. Д. Д. Максудова (рис. 132).

Продольный шов свернутого в трубу листа склеиваем (рис. 101, б) или соединяем болтами с гайками. Кастрюли также приклеиваются или соединяются с трубой винтами.

Надо обязательно иметь в виду, что жесткой будет такая труба, где ребра жесткости (кастрюли с бортиком вместо дна) будут вставлены в трубу с достаточным трением так, чтобы они слегка распирали трубу.

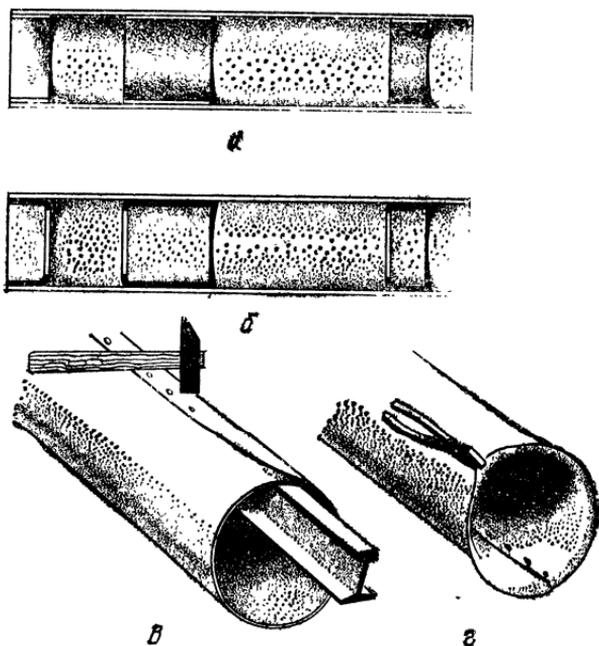


Рис. 101. Тонкостенная труба: *а* — бумажная, *б* — металлическая труба, *в* — клепка, *г* — вальцевание

Для больших рефлекторов диаметром 300—400 мм можно с успехом применить ферму Серрюрье, которую он использовал в свое время для 5-метрового телескопа обсерватории Маунт Паломар. Эта ферма не жестче сплошной трубы, но рассчитана так, что линейные смещения верхнего и нижнего концов трубы под действием веса равны. В горизонтальном положении ферма 5-метрового телескопа провисает на обоих концах по 10 мм, но все оптические детали и фотопластинка остаются на общей оптической оси, и качество изображения не страдает.

Как работает ферма? Рассмотрим простейший и наиболее опасный случай, когда труба-ферма направлена на горизонт (рис. 102, *а*). В этом положении деформации максимальны. Средняя часть — жесткий металлический квадрат, средник — несет восемь стержневых треугольников по четыре

с каждой стороны (рис. 102, а). В горизонтальном положении трубы нагрузку воспринимают по два треугольника на обоих концах. Они расположены в плоскости, параллельной плоскости чертежа. Это треугольники aed и $a'e'd'$. Под действием веса оправ зеркал и самих зеркал концы треугольников e и e' прогибаются (рис. 102, б).

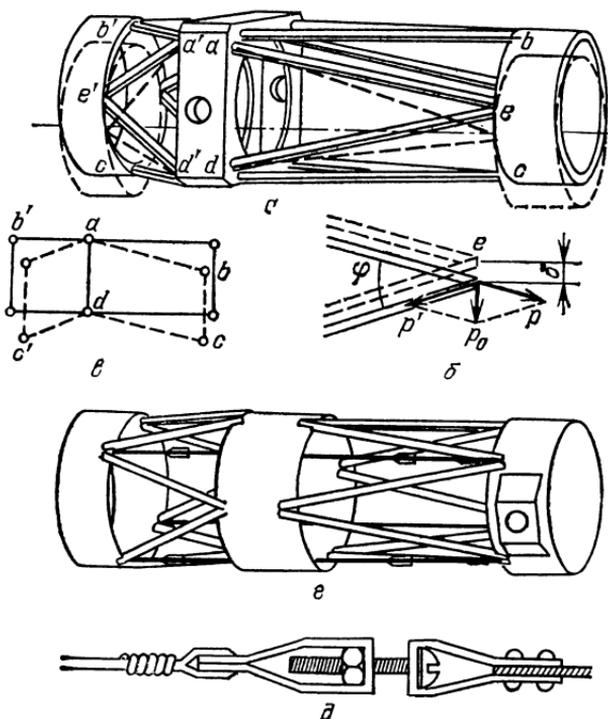


Рис. 102. Ферма Серрюрье: а — конструкция и деформации, б — смещение конца треугольника со стержней, в — деформации параллелограммов, г — модификация, предложенная А. Н. Подъяпольским, д — стягивание тросов

Четыре других треугольника, плоскости которых перпендикулярны плоскости чертежа, не воспринимают нагрузку, так как расположены горизонтально, и сила веса действует на них под прямым углом к их плоскости. Однако и они выполняют важную функцию. Глядя на трубу сбоку, можно обратить внимание на то, что вместе с кольцами на концах фермы они образуют параллелограммы (рис. 102, в). От этого при любом смещении колец вниз линии bc и $b'c'$ остаются параллельными линии ad . Значит, и оба кольца

вместе с оправами и зеркалами остаются параллельными самим себе. Зеркала не наклоняются друг к другу.

Рассмотрим, как деформируется ферма Серрьюрье, на конкретном примере. Зеркало и оправа 600-мм рефлектора весят 210 кг. Верхнее кольцо с оправой вторичного зеркала — 60 кг, поперечник средника $ad=80$ см, длина стержней треугольников $ae=de=191$ см, $a'e'=d'e'=66$ см. Угол в вершине верхнего треугольника $\varphi=24^\circ$, в вершине нижнего треугольника $\varphi'=74^\circ$. Стержни представляют собой алюминиевые трубы с наружным диаметром 5 см и внутренним 4 см. Площадь поперечного сечения стержня $F=\pi(R_1^2-R_2^2)=3,14(2,5^2-2^2)=7,1$ см².

Из школьного курса физики известно, что сила P_0 по правилу параллелограмма разложится на две силы $P_1 \equiv P$, идущие вдоль стержней. Так как полезная нагрузка (60 кг) распределяется на два треугольника, то $P_0=30$ кг. $P=-P_1=P_0 : 2 \sin \varphi/2=30 : 2 \cdot 0,208=72$ кг. Известно также, что удлинение стержня $\Delta l=lP/EF$, где l — длина стержня, P — нагрузка, действующая вдоль стержня, E — модуль упругости или модуль Юнга (для алюминия $E=750\,000$ кг/см²). Таким образом, $\Delta l=191 \cdot 72/750\,000 \times 7,07=0,0026$ см. Смещение вершины треугольника в результате удлинения стержня ae и сокращения ed $\delta=\Delta l : \sin \varphi/2=0,0026 : 0,208=0,0125$ см или 0,125 мм. Как видим, смещение незначительное и им можно пренебречь. Расчет для нижнего конца фермы покажет, что там смещение вершины треугольника еще меньше $\delta'=0,0018$ см $=0,018$ мм.

Нельзя ли взять диаметр стержней значительно меньше, чтобы облегчить трубу, ведь диаметры стержней мы можем выбрать так, чтобы и сравнительно большие деформации фермы компенсировали друг друга, чтобы $\delta=\delta'$. Расчеты показывают, что у такого небольшого телескопа как 600-мм рефлектор, поперечное сечение стержней могло бы быть буквально 1—0,5 см². К сожалению в этом случае продольный изгиб сжимаемых стержней (см. рис. 86, а) приведет к сильным вибрациям от малейших динамических нагрузок. По той же причине нужно взять именно трубы, а не сплошной стержень. Диаметр сплошного стержня с площадью 7,1 см² как в нашем примере будет равен 3 см. Такой стержень будет значительно более гибким. У нашей трубы момент инерции $J=0,049(d^4-d_1^4)=18$ см⁴, а для 1,5-см стержня $J=0,049d^4=3,9$ см⁴. Труба в нашем примере оказалась в $18 : 3,9=4,6$ раза жестче. Пример показывает, что даже для 600-мм телескопа главное достоинство фермы Сер-

рюрье еще не проявляется заметным образом. Тем не менее и в любительском и в профессиональном телескопостроении ферма Серрюрье часто используется для рефлекторов, начиная уже с 500—600 мм.

Средник работает в очень неблагоприятных условиях: резко меняются сосредоточенные нагрузки при различных фермах относительно горизонта. Поэтому по возможности он должен быть сварным из листового металла. Чтобы его вес не стал слишком большим при достаточной жесткости, для 400—500 мм телескопа его можно сварить из тонкого листа (6—8 мм), но в этом случае чрезвычайно важно установить радиальные ребра в углах средника. Эти ребра жестко связывают пластины, на которые опираются стержни фермы.

По тем же причинам не желательно собирать средник на винтах или заклепках. Он должен быть сварным. Стержни также желательно приварить к среднику. У крупных телескопов они крепятся на болтах с помощью фланцев, установленных на концах стержней. В этом случае ферма разбирается, но в любительских условиях может стать слишком ненадежной даже из-за деформации в этих узлах.

Мы не приводим расчета деформаций фермы Серрюрье для различных ее положений относительно горизонта, так как рассмотрели горизонтальное положение, когда деформации фермы максимальны.

Для гигантских рефлекторов XX века ферма Серрюрье стала единственно возможным типом трубы. Она так популярна, что появилось несколько ее модификаций. Одна из них имеет нижнюю часть в виде сплошной короткой трубы, когда оправа практически крепится к среднику, а верхний конец представляет собой ферму из треугольников. В этом случае компенсационный принцип, о котором мы говорили выше, отсутствует, прогибы обоих концов различны и учитываются с большим трудом. В этом случае ферма рассчитывается так, чтобы ее максимальные деформации не превышали для малых телескопов двух-трех сотых миллиметра.

Интересный вариант фермы Серрюрье разработал советский любитель А. Н. Подъяпольский [8] (рис. 102, з). С помощью четырех тонких тросов он стянул вершины треугольников фермы Серрюрье, сделав ферму предварительно напряженной. Деформации в этом случае меньше, чем у фермы Серрюрье, но принцип Серрюрье здесь соблюсти очень трудно. Поэтому важно, чтобы ферма Подъяпольского имела большую абсолютную жесткость, для чего сечения

стержней должны быть несколько больше. Эта ферма в изготовлении сравнительно трудоемка, и нет особого смысла применять ее для телескопов меньше 300—400 мм. Она срав-

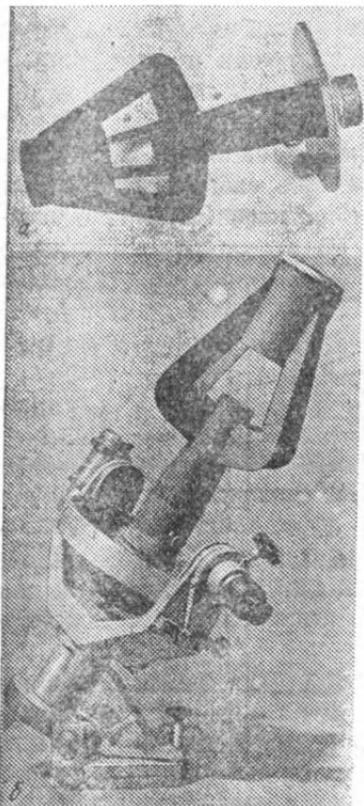


Рис. 103. Телескоп Ричи — Кретьена, построенный А. Б. Зайцевым: а — конструкция «трубы», б — общий вид. Главное зеркало сделано из плоско-выпуклой линзы, эквивалентное относительное отверстие $1/6$, фокусное расстояние 1500 мм

нительно легка и может с успехом применяться для визуальных телескопов, но применение ее для фотографического телескопа связано с риском из-за трудности учесть ее деформации.

Весной 1976 г. автор разработал необычную конструкцию трубы для телескопа Ричи — Кретьена, а в середине 1977 г. А. В. Зайцев закончил постройку телескопа с 250-миллиметровым зеркалом (рис. 103). Однако еще в 1974 г. американский любитель Доналд Дилуорт предложил эту же конструкцию. Она оказалась настолько плодотворной, что вскоре стала широко применяться в профессиональном телескопостроении, когда нужно во много раз снизить вес телескопа. Сейчас она разрабатывается в проекте 4-метрового телескопа-рефлектора, проектируемого американскими экспертами для КНР [54]. Конструкция хороша только для короткофокусных главных зеркал. В нашем телескопе зеркало имеет относительное отверстие $1/2$, в новом китайском гиганте $1/1,5$. В обоих случаях телескоп получается в 8—10 раз легче и примерно во столько же раз дешевле обычного при очень большой жесткости и удобстве в работе.

Но приступать к строительству такого телескопа можно только будучи уверенным, что мастер сможет сделать первоклассное зеркало такого относительного отверстия, а механика будет выполнена на высшем уровне.

Часто любители вынуждены строить легкие переносные телескопы. Ясно, что в этом случае придется использовать иные принципы конструкции трубы. Рис. 104 показывает несколько вариантов облегченных труб. Они годятся только для небольших телескопов диаметром до 150—160 мм *).

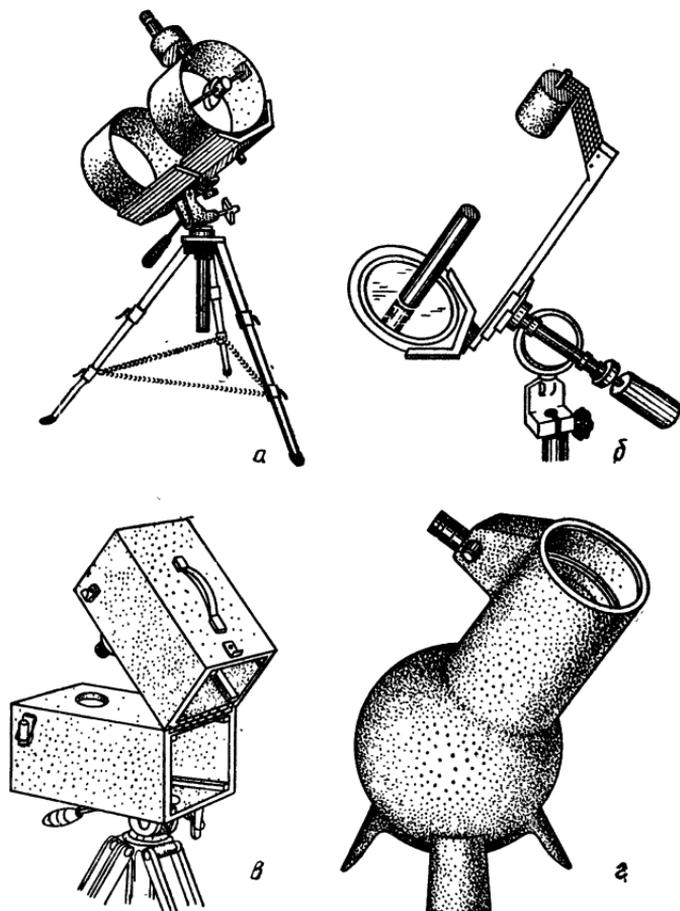


Рис. 104. Трубы небольших компактных телескопов

На рис. 104, *а* показана «труба» серийного любительского телескопа, выпускаемого в США. Как видим, это складная «доска Чикина». Два алюминиевых швеллера вхо-

* Подобные трубы применяются и для телескопов Кассегрена или Грегори, если их главное зеркало светосильно ($1/3,5-1/3$),

дят один в другой. При необходимости они вытягиваются друг из друга и «труба» становится необходимой длины. На концах установлены две бленды, предохраняющие оптическую систему от засветки близрасположенными огнями. Основной швеллер имеет гайку со стандартной резьбой 3/8 или 3/16 дюйма для того, чтобы трубу можно было устанавливать на фотоштативе.

Аналогична «труба» 150-миллиметрового рефлектора Кассегрена, построенного английским любителем Г. Доллом (рис. 104, б). Это складная труба с шарнирами между основным стержнем и оправой главного зеркала и стойкой вторичного. Телескоп в сложенном виде укладывается в портфель. Монтировкой служит фотоштатив.

Квадратная труба из 3—5-слойной фанеры может быть складной. Здесь использованы мебельный шарнир и запор, который закрывается обязательно с усилием. Это предварительное напряжение в месте стыка делает трубу жесткой (рис. 107, б).

Необычна труба и монтировка серийного телескопа «Астрокэн-2000» (рис. 104, в). Пластмассовая труба, склеенная из стеклопластика, должна иметь форму колбы. Центр тяжести трубы расположен в центре сферы. Поэтому в любом положении труба находится в состоянии безразличного равновесия. Иначе говоря, она уравновешена. Для того, чтобы она произвольно не смещалась, основание треноги, на которое опирается сфера, может быть оклеено тонким фетром или сукном.

§ 11. КРЕПЛЕНИЕ УЗЛОВ К ТРУБЕ

Если труба сделана не из толстостенного стального цилиндра, нужно внимательно отнестись к креплению на ней различных узлов, оправы, окулярного узла и креплению трубы к оси монтировки. Это особенно относится к бумажно-клеевым трубам. В этом случае нужно рационально распределить все внешние нагрузки. Под шляпки винтов, которыми опорная пластина оправы зеркала крепится к трубе, надо подложить большие шайбы, чтобы увеличить площадь опоры шляпки. То же надо сделать во всех случаях, когда шляпка или гайка опирается непосредственно на бумагу или стеклоткань.

Окулярная трубка крепится к трубе с помощью фланца. Для того чтобы плоская поверхность фланца сочленялась с цилиндром трубы, на трубе надо сделать «прилив», имеющий плоскую поверхность. Вокруг круглого отверстия

для пучка лучей на стенке трубы телескопа сделаем из пластилина два бортика — один по диаметру отверстия, а второй по наружному диаметру фланца. Высота бортика по всей окружности должна быть одинаковая и превышать наиболее высокую часть горизонтально положенного цилиндра трубы на 3—5 мм. Между двумя бортиками наливаем эпоксидную смолу. Чтобы в дальнейшем смола не растрескалась, ее надо армировать с помощью кусочков любой ткани, лучше стеклоткани. Эти кусочки погружаются в смолу, смачиваются в ней и укладываются между пластилиновыми бортиками. После того как высота этого слоя материи и смолы на 2—3 мм не дойдет до края бортиков, остановимся и, если надо, немного дольем смолы, чтобы поверхность «прилива» стала совершенно ровной. Осторожно положим трубу так, чтобы «прилив» образовал поверхность, перпендикулярную к оптической оси окуляра. После затвердевания смолы в «приливе», так же как и во фланце окулярной трубки, сверлятся отверстия для крепежных винтов, которых должно быть 3 или 4 (см. рис. 100, а).

Можно поступить и иначе. Из 2-миллиметрового листа алюминия или 1—1,5-миллиметрового листа стали вырежем прямоугольник. Края его согнем, как показано на рис. 100, б, в. Сгибать нужно в тисках, постукивая молотком возле места, где пластина зажата.

После сгибания начертим чертилкой окружность того же диаметра, что и диаметр окулярной трубки. Высверлим дрелью или на сверлильном станке центральную часть окружности и обработаем ее край полукруглым напильником. Пластинку укрепим винтами на трубе, а к ней привернем фланец неподвижной трубки окулярного узла. Несмотря на кажущуюся слабость такой пластины, узел получается очень жестким. Важно только, чтобы все три грани изогнутой пластины были прикреплены винтами к трубе, как показано на рис. 100, б, в. Для наведения телескопа на объект, не видимый невооруженным глазом, телескопы снабжаются искателями, которые представляют собой небольшой рефрактор с увеличением 6—12[×] *): Оптические оси искателя и телескопа должны быть строго параллельны.

Наиболее распространенный способ крепления искателя — два кольца, расположенных на трубе на некотором

*) Крупные телескопы диаметром свыше 300 мм часто снабжают двумя искателями: один диаметром 50—60 мм, второй — диаметром 100—150 мм. Во втором случае можно использовать и короткофокусный рефлектор Ньютона.

расстоянии одно от другого. Трубка искателя поддерживается в кольцах тремя винтами на каждом (рис. 105, а). Вращая головки винтов, можно наклонять оптическую ось искателя в ту или иную сторону. Кольца со стойками могут быть отлиты из алюминия или выточены на токарном станке, а дуги, которыми они крепятся к трубе, можно вырезать и обработать вручную из 10-миллиметрового алюминия.

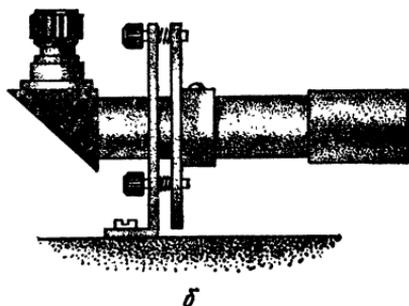
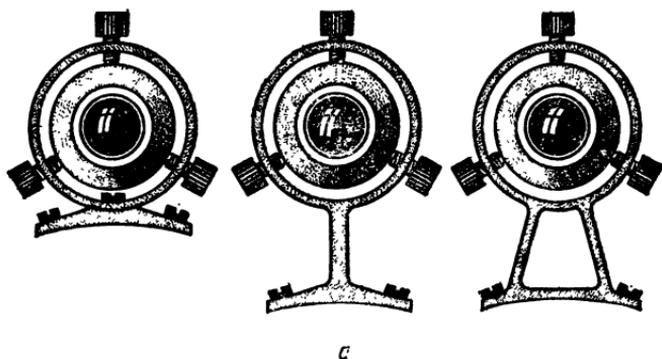


Рис. 105. Крепление искателей

На рис. 105, а показана форма стоек, благодаря которой нагрузка от искателя хорошо распределяется на довольно большую площадь.

Второй способ напоминает юстировочное приспособление оправы зеркала (рис. 105, б). С помощью трех винтов и возвратных пружин юстируются два диска, один из которых жестко скреплен с трубой, а второй с искателем. После завершения юстировки оба диска фиксируются тремя стопорными винтами, как и главное зеркало в своей оправе.

§ 12. УЗЛЫ ПРОСТОЙ МОНТИРОВКИ

Конструкции простой азимутальной и немецкой монтировок практически одинаковы. Для превращения азимутальной монтировки в экваториальную немецкую достаточно наклонить вертикальную ось под углом к горизонту, равным широте места наблюдений. Тогда вертикальная ось становится полярной.

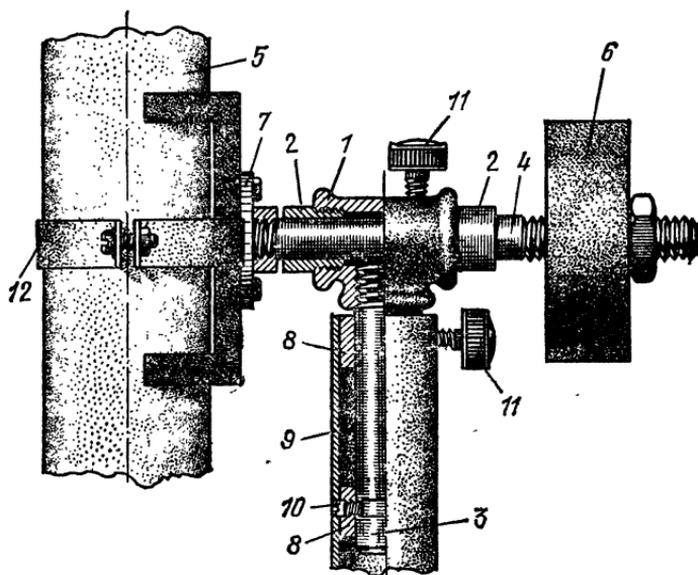


Рис. 106. Узел осей монтировки: 1 — тройник, 2 — бронзовые втулки, 3 — вертикальная (или полярная) ось, 4 — горизонтальная ось (или ось склонений), 5 — труба телескопа, 6 — противовес, 7 — фланец, 8 — бронзовые втулки, 9 — корпус вертикальной оси, 10 — винт, предупреждающий выпадение оси, 11 — стопорные винты (тормоза), 12 — хомут

Простейшая монтировка может быть собрана из водопроводного тройника, нескольких труб и пары стопорных винтов (рис. 106). Для того чтобы ось склонений (или горизонтальная ось) вращалась плавно, надо в тройник 1 добавить пару медных или латунных втулок 2. Для этого на концах толстостенной медной или латунной трубы подходящего диаметра нарезаем резьбу на токарном станке или специальным резьбонарезателем, который можно найти в любой сантехнической мастерской. После нарезания резьб отрезаем кусочки этих труб с таким расчетом, чтобы после

того как концы с резьбами будут завернуты в тройник, втулка на 2—4 мм выступала из тройника. Чтобы эти втулки не выворачивались, их можно «посадить» на какой-нибудь клей. В третий патрубок тройника вставим длинную трубку 3 — это будет полярная (или вертикальная) ось.

Во втулки оси склонений вставляем собственно ось. Это труба или стержень такой длины, чтобы на нем можно было укрепить как телескоп 5, так и противовес 6. Так как желательно, чтобы вес противовеса не был слишком большим, нужно увеличить длину плеча, на котором крепится противовес. Конечно, удлинение это нужно сделать в разумных пределах — скажем, длина плеча оси, где крепится противовес, может быть на 30—50 % больше длины плеча, на котором крепится труба телескопа.

К оси склонений надо жестко прикрепить трубу. Для этого выточим или подберем фланец 7, в котором просверлим отверстие того же диаметра, что и ось. Лучше, если это отверстие будет меньше на 0,1 мм. Тогда, нагрев фланец до температуры 100—150 °С, вставим в него ось. После остывания фланца его размеры сократятся, и он жестко «сядет» на ось. Если не удастся установить фланец на «горячую» посадку, придется в нем сделать два отверстия через 120°. В соответствующих местах оси просверлим отверстия и нарежем в них резьбу. После этого закрепим фланец на оси с помощью винтов. Для оси диаметром 25—30 мм нужно взять винты М6—М8. Можно плотно насадить фланец на ось с эпоксидной смолой или просто приварить его к оси. Если читатель в состоянии наладить у себя литье алюминия в его простейших формах, можно ось залить (заформовать) в пластину, к которой крепится телескоп (рис. 107)*).

Противовес должен легко и просто закрепляться на оси, а в случае нужды легко перемещаться вдоль оси для балансирования. Кроме того, важно, чтобы во время работы противовес случайно не соскользнул с оси, когда этот конец направлен вниз. Чтобы избежать падения противовеса, лучше всего на отрезке оси, где он перемещается, нарезать резьбу. В центре же самого противовеса также надо нарезать резьбу. Теперь противовес легко перемещается по оси, а контргайка его надежно фиксирует. Можно и на гладкой оси установить противовес, который будет фиксироваться небольшим винтом, а для того чтобы противовес

*) О том, как это сделать, можно прочитать в первом издании книги.

не упал, на конце оси установим небольшой винт, который задержит его, если он соскользнет.

Полярная ось прочно вворачивается в средний патрубок тройника. Нижний конец оси вставляется во втулки 8, плотно установленные в корпусе оси 9. Втулки могут быть установлены на «горячей» посадке, вставлены на клею или фиксированы винтами, проходящими сквозь трубку — корпус оси. Для того чтобы оси не выпадали из корпусов,

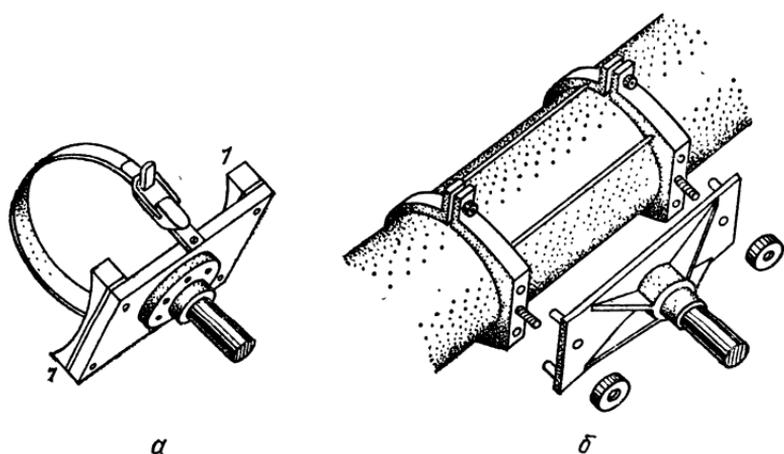


Рис. 107. Крепление трубы к оси склонений: *а* — с помощью гибкого хомута, *б* — съемные хомуты

на концах последних следует вернуть по винтику 10, которые входят в пазы, проточенные в осях.

Теперь полярную ось надо установить под углом к горизонту, равным широте места наблюдений. Проще всего ее приварить примерно под этим углом к вертикальной стойке, которая будет служить основанием монтировки. В одном из рефлекторов-кометоскателей клуба им. Д. Д. Максимова корпус полярной оси был прикреплен к стойке с помощью эпоксидной смолы и стеклоткани. В стойке предварительно был сделан срез под углом 55° к горизонту, равным широте Новосибирска. После этого срез трубы был обработан напильником так, чтобы корпус полярной оси ложился на срез, как в ложе. Затем были нарезаны полосы стеклоткани, которые смачивались эпоксидной смолой, и корпус оси приматывался ими к стойке. После затвердевания смолы стеклопластик обрабатывается напильником. Соединение осей можно осуществить также с помощью литейной техники.

Наконец, рассмотрим простой способ крепления трубы телескопа к оси склонений. Фланец, наваренный или привинченный к концу оси склонений, имеет слишком малую площадь, чтобы к нему непосредственно можно было крепить бумажную или стеклопластиковую трубу. Поэтому к фланцу прикрепим шесть винтами М6—М8 прямоугольную пластину толщиной 10—12 мм, а уже к ней трубу. Чтобы плоскую поверхность пластины сочленить с цилиндрической трубой, надо на концах пластины укрепить пару дугообразных деталей — лож (*l* на рис. 107, *a*). Эти детали можно выполнить из алюминия, стали, в крайнем случае и из многослойной фанеры. Толщина дуг — 10—20 мм. С помощью клея и винтов М4 они прикрепляются к пластине. Труба прижимается к пластине с помощью хомута. При затягивании хомутов не нужно опасаться прилагать большие усилия. Большое усилие при затягивании создаст предварительное напряжение в стенках трубы, а это приведет к увеличению ее жесткости. Это усилие (сжатие) действует по окружности стенки трубы, никак не изгибая ее, а только сжимая. Для этого нужно, чтобы хомуты и дуги, на которых лежит труба, охватывали весь периметр трубы, не оставляя свободных промежутков более 1—2 см. В противном случае усилия в хомутах надо несколько уменьшить, чтобы в свободных, не охваченных хомутами участках трубы стенку не «выперло» и она не потеряла устойчивости. Впрочем, и при неполном прилегании трубы усилия могут быть достаточно большими. Это крепление гораздо надежнее и жестче, чем крепление трубы винтами непосредственно к пластине или ложам. Кроме того, оно позволяет легко отделять трубу от монтировки, а это важно при переносе телескопа. Оно также позволяет перемещать трубу вдоль ее оси для балансировки и поворачивать вокруг оси, чтобы придать окуляру желаемое направление (вбок, вверх и т. п.). Не нужно бояться использовать гибкие хомуты с запорами (рис. 107, *a*). У автора таким образом крепятся 100-миллиметровый гид к 150-миллиметровому рефлектору Ньютона и 140-миллиметровая камера Шмидта к 315-миллиметровому рефлектору Ньютона и не возникает никаких проблем.

§ 13. КРЕПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛОЙ ТРУБЫ К ОСИ СКЛОНЕНИЙ

В тех случаях, когда диаметр зеркала больше 150 мм или когда по каким-нибудь иным причинам труба тяжела, узлу крепления трубы надо придать более рациональную

форму. Прежде всего, кольца — хомуты, в которых лежит труба, придется сделать жесткими — литыми или вырезанными из металлической трубы подходящего диаметра. На одной стороне хомута установим шарнир, как показано на 130, б. На другой стороне хомутов — приливы для крепления стягивающего винта. Жесткость узла достигается за счет рационального напряжения в стенках трубы (сжатие без изгиба).

Пластина оси склонений для жесткого крепления к оси должна иметь прилив, куда запрессована ось, и ребра жесткости, которые идут от прилива к углам пластины и имеют максимальное сечение около прилива и сходят на нет на концах. Толщина пластины и ребер около 6—8 мм, если труба имеет диаметр до 200 мм и длину около 1500 мм. Толщина хомутов 3—5 мм при ширине 15—25 мм для 110—150-миллиметрового телескопа и 5—10 мм при ширине 30—50 мм для 250—400-миллиметрового телескопа.

Для переносного телескопа диаметром 150—250 мм лучше сделать съемные хомуты (рис. 107, б). Хранятся хомуты на трубе, а во время сборки крепятся с помощью двух надежных винтов к пластине на оси. Часто оба хомута соединяют тремя-четырьмя тонкими стержнями (рис. 116), расположенными вдоль трубы телескопа, чтобы хомуты не перекашивало и они всегда были на одном расстоянии друг от друга и чтобы крепежные винты во время сборки легко попадали в отверстия на пластине. В разобранном виде телескоп занимает меньше места, когда его хомуты остаются на трубе.

Ребристую пластину можно заменить цилиндрическим «седлом». Оно вырезается из толстостенной трубы подходящего диаметра. Ось вворачивается на резьбе в выточенный из стали и приваренный к седлу прилив. После сборки ось фиксируется стопорными винтами.

§ 14. ОСИ НЕМЕЦКОЙ МОНТИРОВКИ

На рис. 108, а показаны нагрузки, действующие на оси экваториальной монтировки, и изгибающие моменты. Исходя из того, что по мере увеличения изгибающего момента надо увеличивать и сечение оси, здесь же приведены и наиболее рациональные с точки зрения прогибов продольные сечения осей (рис. 108, б). Конечно, на практике можно несколько упростить сечения и даже просто взять их постоянными по всей длине, но в этом случае надо помнить, что без заметного увеличения жесткости мы значи-

тельно увеличиваем вес оси. Поскольку часто оси делаются постоянного поперечного сечения по всей длине, то увеличение веса оси очень заметно. Правда, и к рациональному сечению надо подходить творчески. Например, сечение оси

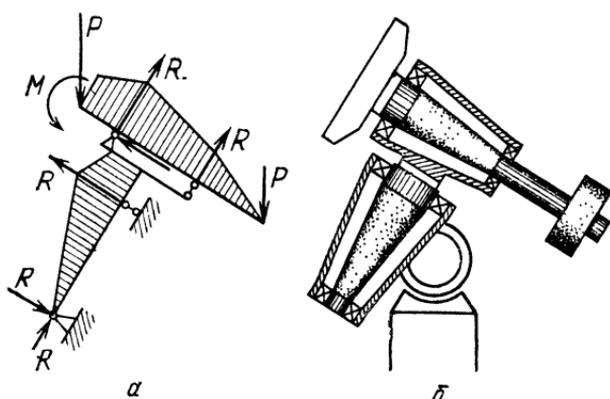


Рис. 108. Оси немецкой монтировки: *а* — нагрузки, реакции и эпюры изгибающих моментов, *б* — рациональная форма осей

склонений на конце противовеса может быть выбрано меньше, чем на остальных участках, так как прогибы конца противовеса не так важны, как прогибы на остальных

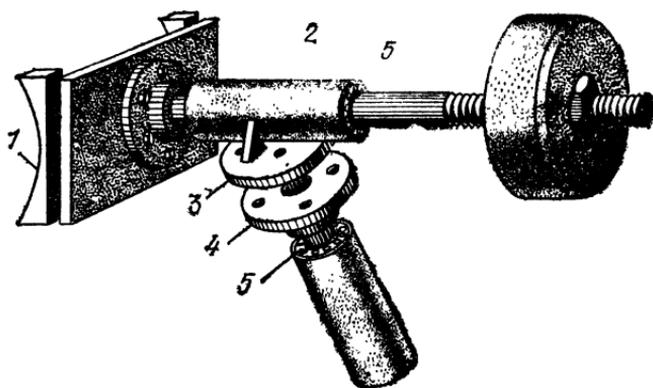


Рис. 109. Немецкая монтировка с шарикоподшипниками: *1* — пластина и ложе для крепления трубы телескопа к оси, *2* — корпус оси склонений, *3* — пластина для крепления полярной оси, *4* — фланец полярной оси, *5* — шарикоподшипники

участках. Однако чрезмерное уменьшение сечения оси на конце противовеса может привести к ощутимым вибрациям, которые будут передаваться всей монтировке.

В некоторых руководствах рекомендуется подшипники осей установить на прямоугольных пластинах. В этом случае одна из пластин, на которой крепится полярная ось, устанавливается наклонно к горизонту, а вторая крепится к фланцу на конце полярной оси. На первый взгляд такая конструкция много проще. На деле она более трудоемка,

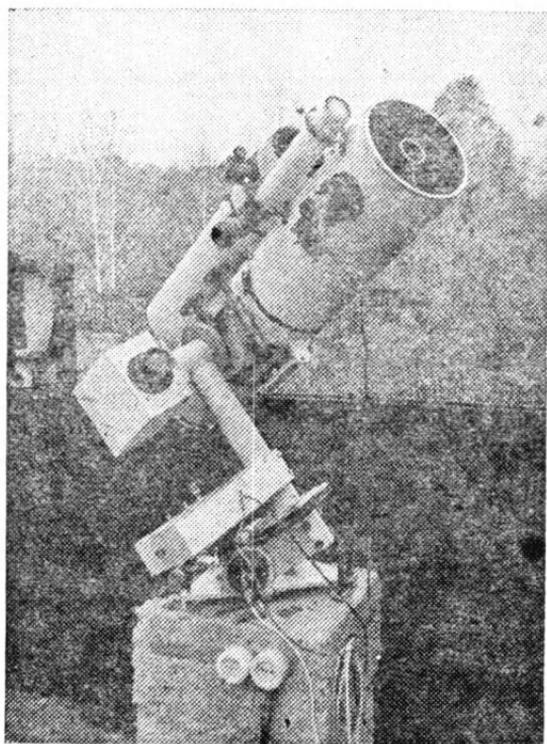


Рис. 110. 150-миллиметровый рефлектор Ньютона на монтировке Бостяна и Мейнела. Построен автором в 1968 г. Телескоп установлен на обсерватории Горн под Новосибирском. На втором конце оси склонений установлен 47/210-миллиметровый астрограф для формата 9×12 см

а самое главное, значительно менее жесткая. Замена труб в качестве корпусов осей на пластины приводит к увеличению веса узла в 4 раза при той же жесткости или к потере жесткости в 20—25 раз при том же весе. Можно пластину заменить швеллером, но и в этом случае мы проиграем в жесткости по сравнению с трубой.

Кроме того, в случае трубчатых корпусов значительно легче установить тормоз и микрометричные ключи тонких движений, а также часовой механизм с червячной парой.

Проще всего соединить корпус оси склонений и полярную ось, приварив конец полярной оси к корпусу оси

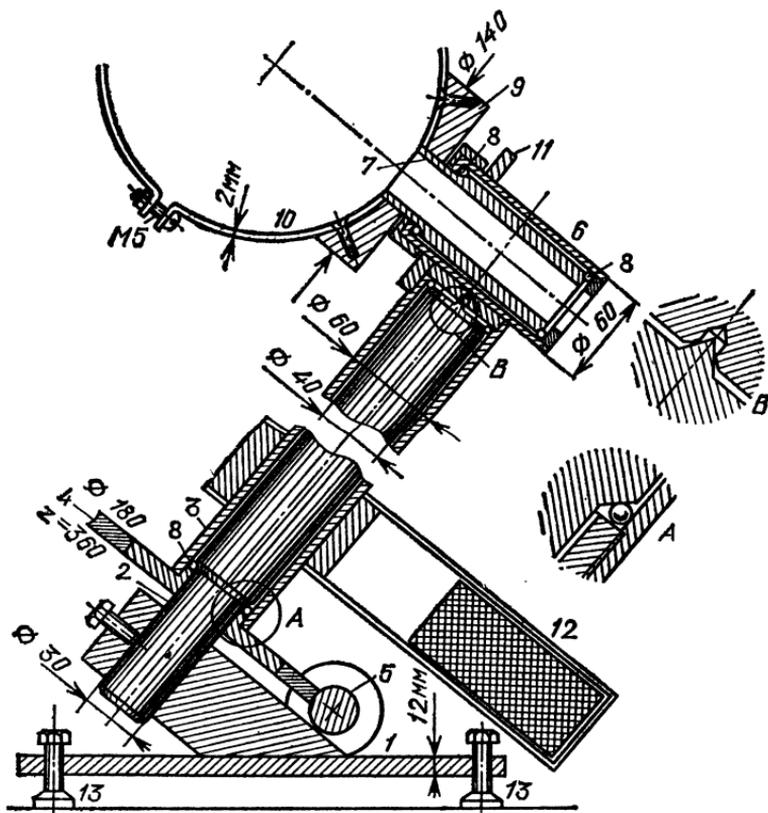


Рис. 111. Конструкция монтировки 150-миллиметрового рефлектора, изображенного на рис. 110: 1 — основание монтировки, 2 — неподвижная полярная ось, 3 — вращающийся корпус полярной оси, 4 — червячная шестерня, 5 — червяк, 6 — корпус оси склонений, 7 — полая ось склонений, 8 — насыпные подшипники, 9 — фланец оси склонений, 10 — хомут, 11 — круг склонений, 12 — противовес, 13 — опорные винты

склонений. Важно при этом проследить за строгой перпендикулярностью обеих осей. Можно выполнить это соединение с помощью литья. Можно сделать этот узел разборным. Для этого приварим к корпусу оси склонений толстую пластину с отверстиями для болтов, а на северный

конец полярной оси — фланец с отверстиями для тех же болтов (рис. 109).

Исходя из расчетов и многолетнего опыта любителей, можно рекомендовать диаметры для оси склонений и диаметр на северном подшипнике для полярной оси равным 30 и 40 мм соответственно при расстоянии между подшипниками около 200—250 мм, если речь идет о 150-миллиметровом телескопе. Для зеркала диаметром 250 мм выберем диаметр осей 50 мм.

Оси немецкой монтировки с часовым механизмом лучше установить в шариковых подшипниках, а подшипники должны быть запрессованы в корпусах, имеющих форму труб. Для этого концы корпусов надо расточить с таким расчетом, чтобы внутренний диаметр корпуса был на 0,05 мм меньше наружного диаметра подшипника. После расточки корпус нагревается до 100—150° и подшипники закладываются в корпус. После остывания корпуса подшипник оказывается плотно стоящим на месте. Нужно проследить за тем, чтобы разница в диаметрах не превышала 0,05 мм, иначе подшипник может оказаться пережатым и будет плохо работать.

Лучше, однако, расточить корпус так, чтобы подшипник становился на место с трением, но без люфта. В этом случае весь узел окажется разборным, но для того, чтобы подшипники не выпадали, придется сделать колпачки, которые будут надеваться на корпуса и удерживать подшипники от выпадения. Эти колпачки будут одновременно защищать подшипники от пыли и грязи.

Полярная ось 150-миллиметрового телескопа Ньютона, изображенного на рис. 110, вращается на шпиле и в насыпном подшипнике (рис. 111). Подшипник хорош тем, что может регулироваться для устранения мертвого хода.

§ 15. ВИЛКА И ЕЕ ДЕТАЛИ

На рис. 112 показана эпюра изгибающих моментов для вилки. Изгибающий момент, а вместе с ним и сечение вилки возрастают по мере продвижения от концов консоли к ее основанию и далее к середине траверзы, где крепится полярная ось и где момент достигает максимума.

Любители часто допускают ошибку, делая консоли из уголка или швеллера большой жесткости, а траверзу из толстой пластины (рис. 115, б). Чаще всего толщина пластины около 15—20 мм, а ее ширина 150—250 мм. Интуиция подсказывает конструктору, что толстая пластина жестче

любого швеллера. Рассмотрим этот вопрос на конкретном примере такой реально построенной вилки (рис. 112, б). Момент инерции швеллера № 6,5 равен

$$J_x = \frac{1}{12}(BH^3 - bh^3) = \frac{1}{12}(3,6 \cdot 6,5^3 - 3,16 \cdot 5,04^3) = 48,5 \text{ см}^4 *).$$

Сила, действующая на конец консоли, не лежит в плоскости треугольника, и поэтому жесткость сдвоенного швеллера просто удваивается и J_x равен 97 см⁴. Для пластины

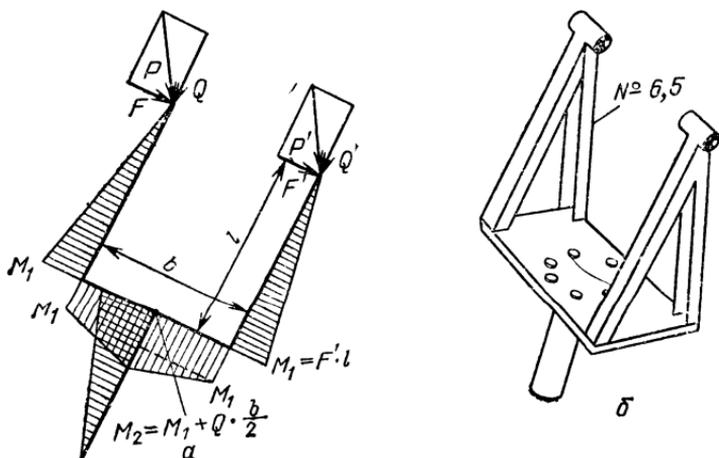


Рис. 112. Нагрузки и эпюры моментов вилки (а) и неправильная конструкция, часто встречающаяся в любительских монтировках (б)

момент инерции равен $J_x = \frac{15 \cdot 2^3}{12} = 10 \text{ см}^4$. Вместо того, чтобы на траверзе возрасти, момент инерции и жесткость снизились почти в 10 раз! Если эта вилка будет вибрировать, то только за счет траверзы.

Для сравнения рассмотрим вилку, полностью сделанную из швеллера № 8 (рис. 113, е). В данном случае швеллер и консоли и траверзы работает вокруг оси y :

$$J_y = \frac{1}{3} [Hl_1^3 - h(l_1 - s)^3 + dl_2^3] = \\ = \frac{1}{3} [8 \cdot 1,4^3 - 6,6(1,4 - 0,5)^3 + 0,75 \cdot 2,6^3] = 30 \text{ см}^4.$$

Это в три раза меньше, чем у консолей предыдущей вилки из-за поворота швеллера в менее благоприятное положение

*) Значения моментов инерции см. в § 4 этой главы. Обозначения в этом параграфе те же.

ние, но это втрое больше, чем у толстой и широкой пластины. Если нас устраивает жесткость траверзы этой вилки, то тем более благополучно дело обстоит с консолями.

Приведем диаметры толстостенных труб, которые обеспечат ту же жесткость. Для этого возьмем трубу диаметром 7 см и толщиной стенок 0,25 см. Тогда

$$J_y = J_x = 0,049 (d_1^4 - d_2^4) = 0,049 (8^4 - 7^4) = 30 \text{ см}^4.$$

Если длины консолей во всех трех случаях равны 60 см, а длина траверзы 40 см, то вес предыдущих трех стальных вилок будет соответственно равен 23,3, 8,9, 6,6 кг. Труба оказалась выгоднее всего.

Вилка оптимальной формы (рис. 113, а) может быть сделана из стеклоткани с эпоксидной смолой. Для этого из плотного пенопласта делается модель будущей вилки. Эта модель оклеивается стеклотканью. Толщина слоя 5—8 мм в зависимости от размеров и веса трубы. Стеклоткань перед оклейкой желательно прокалить при температуре 150—200 °С, чтобы выгорело масло в нитях. После затвердевания смолы в вилке делаются три отверстия: на концах консолей и в центре траверзы, где будет крепиться полярная ось. В эти отверстия заливается ацетон. Пенопласт растворяется, и вилка становится полой.

Нежелательно обрабатывать материал напильником, так как пыль небезопасна, когда попадает в дыхательные пути. Неровности лучше зашпаклевать, добавив в смолу мела, талька и т. п.

Рис. 113, б, в, г, д, е показывает сварные вилки. Вилку можно отлить (рис. 113, д) или сварить (рис. 113, д) из листовой стали толщиной 5—8 мм или из алюминия толщиной 10—12 мм. Вилку можно сварить и из водопроводных труб (рис. 113, е).

Хорошие вилки для небольших телескопов до 250 мм получаются из твердого дерева толщиной 20 мм (рис. 113, д). Не нужно думать, что большое количество гвоздей сделает вилку прочнее и жестче. Дерево с деревом склеивают (лучше эпоксидной смолой) и «прихватывают» двумя-тремя шурупами каждую деталь. Особое внимание нужно уделить сочленению дерева и металлических деталей (оси, обоймы подшипников). Поверхность сочленения должна быть достаточно большой.

В начале семидесятых годов американский любитель Джон Добсон построил 600-миллиметровый визуальный телескоп Ньютона для наблюдений комет, туманностей, скоплений, галактик. Вся монтировка сделана из много-

слоистой фанеры. Консоли для жесткости «схвачены» с одной стороны стенкой. На концах консолей — вырезы для полуосей, оклеенные фетром. Хорошо уравновешенная

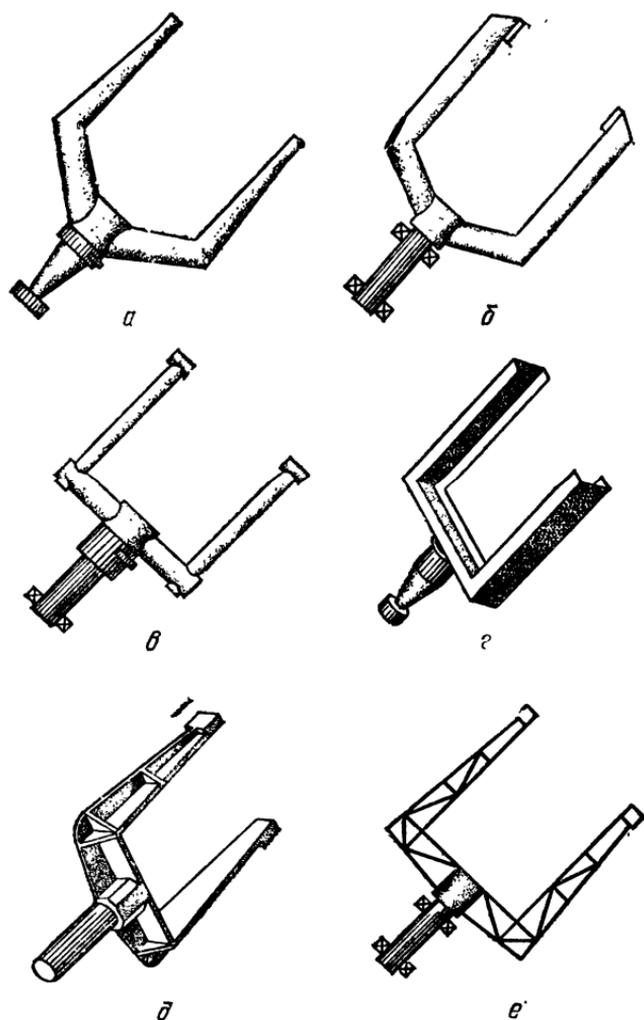


Рис. 113. Конструкции вилок: *а* — оптимальная форма вилки, *б*, *в* — вилки из труб, *г* — из швеллеров, *д* — литая, *е* — сварная из тонких труб

труба вращается в этих «подшипниках» с некоторым трением и легко сохраняет приданное ей положение. В клубе Д. Д. Максудова построены два телескопа диаметрами 150 и 250 мм на монтировках Добсона (рис. 114). Эти про-

стейшие телескопы просто замечательны вдали от города, где с небольшими увеличениями и большими полями зрения они показывают просто феерические картины сокровищ ночного неба. И труба и вилка 250-миллиметрового телескопа снабжены ручками. В результате телескоп без труда переносится одним человеком.

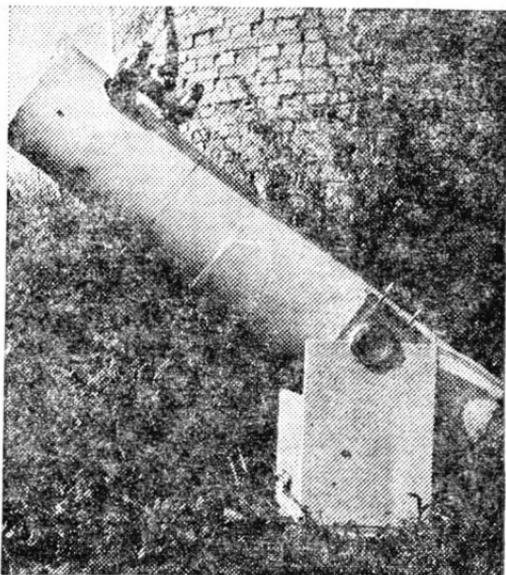


Рис. 114. 250-миллиметровый телескоп клуба им. Д. Д. Максудова на монтировке Добсона. Монтировка построена за два дня

Его вилка сделана из 10-миллиметровой фанеры и собрана с помощью алюминиевых уголков № 35. Основание в виде круга также сделано из 10-миллиметровой фанеры. Между основанием и дном вилки — прокладка из металлизированного пластика диаметром 350 мм. Труба картонная и снабжена внутри четырьмя кольцами из алюминия толщиной 5 мм и шириной от 70 до 100 мм.

В США серийно выпускаются рефлекторы «Одисей» на этой монтировке диаметром до 760 мм. Подобные рефлекторы чрезвычайно дешевы при отличных оптических качествах. Конечно, они непригодны для фотографических работ, но впечатления при визуальных наблюдениях с ними просто поразительны. Такие рефлекторы за рубежом становятся центрами клубов Мессье и Гершеля, цель которых —

визуальные наблюдения гигантского количества туманных объектов, в том числе крайне слабых.

Полуоси оси склонений в вилочной монтировке лучше устанавливать на консолях, а подшипники этих осей на трубе. Большое значение при установке полуосей имеет то, что они должны лежать строго на одной прямой, являясь продолжением одна другой. Это условие также легче выполнить при установке полуосей на консолях, а не на трубе, как это до сих пор чаще всего делалось. В этом случае

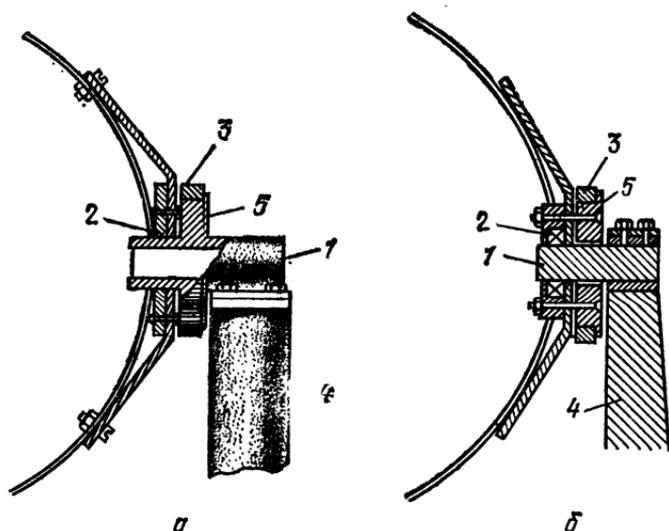


Рис. 115. Полуоси оси склонений: *а* — водило с винтом и возвратной пружиной связаны с трубой телескопа, *б* — барабан поворачивается вместе с трубой телескопа, водило с винтом и возвратной пружиной связаны с консолью вилки; *1* — неподвижные цапфы, *2* — подшипники (*а* — скользящий, *б* — шариковый), *3* — хомуты тормозов, *4* — консоль вилки, *5* — барабан тормозов (*а* — барабан неподвижен, *б* — барабан вращается вместе с трубой). См. также рис. 118

на консолях крепится сплошной круглый стержень или труба. После того как концы этой трубы надежно установлены на свое место и закреплены, выпилим ножовкой среднюю часть этой трубы, оставив только полуоси. После этого можно отвернуть полуоси от консолей и дополнительно обработать, например проточить на токарном станке торцы, отрезанные ножовкой, а потом их легко установить на место без опасения, что они окажутся не на одной прямой.

Для правильной установки подшипников на трубе выточим или подберем круглый стержень, который будет

служить оправкой, а на него «посадим» подшипники. Установив подшипники на трубу и надежно закрепив их, уберем оправку (рис. 115). Лучше всего крепить скользящие или шариковые подшипники 2 к трубе с помощью трехгранной пластины, наподобие того, как мы крепили окулярный узел (см. § 11 главы пятой. Для 150-миллиметрового телескопа достаточно пластины толщиной 4—5 мм. Еще раз подчеркнем, что жесткости такой пластины, если она закреплена по периметру, вполне достаточно. Подшипники крепятся к пластине с помощью чашеобразной обоймы, а пластина — к трубе. До окончательной установки подшипники не снимаем с оправки.

Полярная ось вилочной монтировки в идеале должна иметь коническую форму с большим диаметром в районе траверсы, так как именно здесь действует максимальный изгибающий момент. Это вынуждает делать северный подшипник больших размеров. В некоторых случаях любители вместо шарикового подшипника берут точеное колесо, которое катится по двум роликам, установленным на расстоянии около 120° по дуге колеса. Очевидно, что оси этих роликов должны иметь минимальный прогиб. Для этого они должны быть достаточного диаметра и иметь минимальную длину. Вместо роликов можно взять два небольших шариковых подшипника. В этом случае диаметр оси будет равен внутреннему диаметру подшипника. Оси роликов имеют на концах фланцы, с помощью которых крепятся к станине монтировки.

Для рефлектора диаметром 150 мм диаметр полуосей оси склонений может быть 10—20 мм. Диаметр полярной оси в районе ее северного подшипника 30—40 мм. Для 250-миллиметрового рефлектора эти диаметры должны быть 25—30 мм и 60—80 мм соответственно.

§ 16. ОСИ ДРУГИХ МОНТИРОВОК

В тех случаях, когда у любителя есть возможность устанавливать телескоп стационарно если не постоянно, то хотя бы на длительное время, можно применить английскую монтировку, ярмо с подковой или без нее.

Для 300—400-миллиметрового рефлектора проще всего в качестве полярной оси английской монтировки применить корпус оси автомобиля (рис. 116) [45, 46]. Расширение корпуса оси для установки дифференциала используется в этом случае для установки подшипников оси склонений.

Ось можно заменить ярмом, которое представляет собой раму из коробчатых стержней. Эти стержни могут быть из дерева, металлического проката, лучше всего из швеллера, труб диаметром 50—80 мм в зависимости от веса телескопа и длины ярма. Для 150-миллиметрового телескопа при

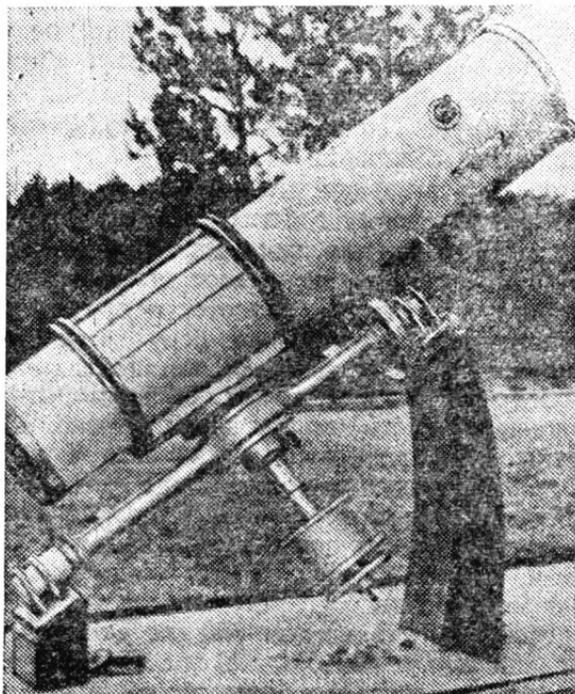


Рис. 116. Английская монтировка 400-миллиметрового рефлектора. Полярной осью служит задний мост небольшого грузовика

длине ярма более 700—800 мм диаметру труб должен быть около 50 мм. Для 250-миллиметрового телескопа с ярмом длиной 1200 мм диаметр труб около 70—80 мм.

Для того чтобы сделать доступной полярную область, можно северный (верхний) подшипник полярной оси заменить на подкову. Среди металлолома можно найти диски диаметром до 400—500 мм. Для 150-миллиметрового телескопа достаточно будет диска диаметром около 300 мм и толщиной 10—20 мм. В этом диске вырезаем автогеном или высверливаем с дальнейшей обработкой напильником отверстие овальной формы так, чтобы телескоп мог входить в это отверстие. Эта «подкова» устанавливается с помощью

фланцев или приваривается к балкам ярма. Катится она по двум роликам, установленным под углом 120° (см. рис. 92, а).

§ 17. ТОРМОЗА И МЕХАНИЗМЫ ТОНКИХ ДВИЖЕНИЙ

После наведения на объект телескоп должен быть закреплен в этом положении. Учитывая малое поле зрения при больших увеличениях, желательно снабдить телескоп механизмами тонких движений на обоих осях для плавного наведения на объект. Большинство простейших телескопов

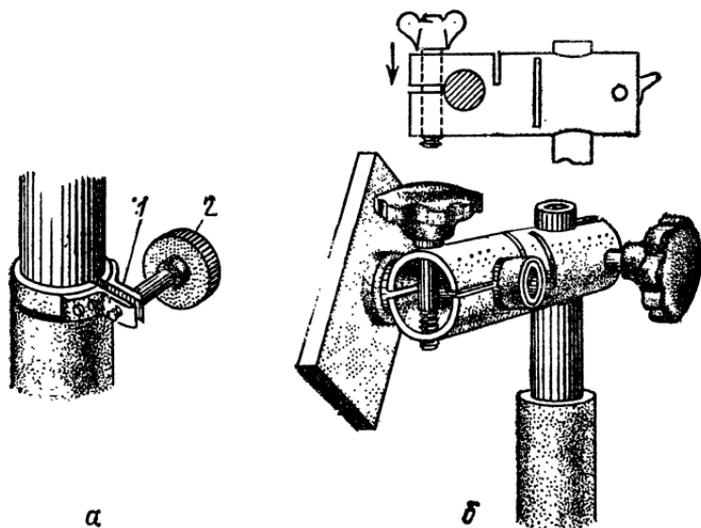


Рис. 117. Простые тормоза

системы Ньютона, предназначенных для визуальных наблюдений, снабжаются только тормозами.

В простейшем случае тормозом может служить винт, упирающийся прямо в ось. Например, в азимутальной монтировке из тройника и водопроводных кранов, построенной в клубе им. Максимова, во втулках, несущих оси, сделаны отверстия, в которых нарезана резьба. В эти отверстия вворачиваются стопорные винты с маховичками. Конечно, это самое простое приспособление из всего, что можно придумать (см. рис. 61, б) и назвать его совершенным нельзя, прежде всего, потому, что от постоянного стопорения конец винта делает небольшие углубления в оси, если ее металл не слишком тверд, и постепенно ось перестает быть доста-

точно гладкой. Часто требуется зажать ось не «намертво», а только слегка притормозить, чтобы телескоп поворачивался с некоторым усилием. Кстати, чаще всего так и поступают, если телескоп не снабжен механизмами тонких движений. При этом телескоп движется не очень плавно.

Гораздо лучше тормозить специальным хомутом. Для этого на конце корпуса оси делается надрез, как показано

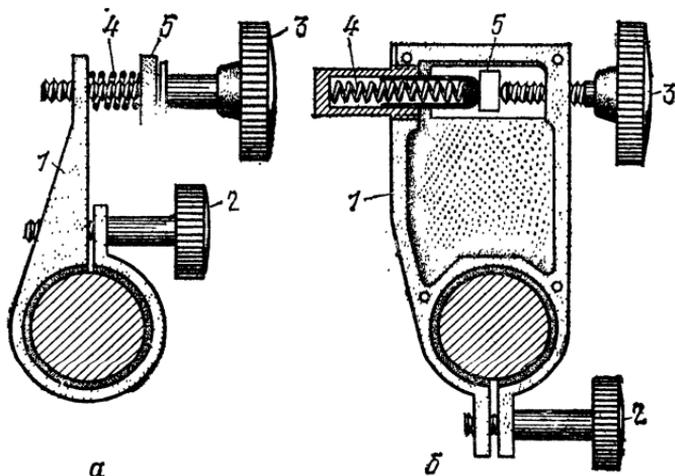


Рис. 118. Конструкция механизма тонких движений: 1 — водилорычаг с хомутиком, охватывающим корпус полярной оси, 2 — винт хомутика-тормоза, 3 — винт тонких движений, 4 — возвратная пружина, 5 — поводок, связанный с трубой телескопа

на рис. 117, *a*, и к краям надреза приваривается или привинчивается пара ушек 1. В одном из ушек делается гладкое отверстие, а во втором — отверстие с резьбой. Теперь, если в это отверстие вернуть винт 2, то он может очень равномерно с помощью облегающего ось хомута зажать или только подтормозить ее. Если же ось надо очень сильно зажать, то описанное приспособление сделает это гораздо лучше простого винта. На рис. 117, *b* показан еще один вариант тормозов.

Следующее усовершенствование позволит ввести в узел механизм тонких движений. Для этого надо изготовить отдельный хомут с достаточно длинным рычагом. На рис. 118, *a* показан механизм тонких движений телескопа «Алькор», выпускаемого Новосибирским приборостроительным заводом им. В. И. Ленина. Этот механизм применяется на обеих осях монтировки. Здесь хомут 1 облегает трубчатый корпус оси. Стопорный винт 2 может затормозить хомутик.

Теперь, вращая винт тонких движений 3, мы притягиваем к рычагу 1 гайку-поводок 5, укрепленную на трубе телескопа. Труба плавно и медленно движется к рычагу. Если необходимо обратное движение, то, выворачивая винт, мы даем возможность пружине 4 толкать гайку, а вместе с ней и трубу в обратную сторону.

Здесь важно сделать несколько замечаний. Во-первых, при затягивании стопорного винта он смещает рычаг и трубу телескопа. Поэтому после грубого наведения, когда мы пытаемся зажать ось, труба слегка наклоняется и объект уходит из центра поля зрения. Чтобы эти деформации рычага сделать меньше, нужно сильно увеличить сечение рычага в его начале, чтобы деформировалось только ушко хомутика. Именно так и поступили при доработке опытной партии телескопов «Алькор». Другой путь заключается в том, чтобы перенести разрез и стопорный винт на другую от рычага сторону хомута, как показано на рис. 118, б. В этом случае при затягивании рычага вообще не происходит смещения объекта в поле зрения.

Во-вторых, для того чтобы при зажиме хомута не прилагать слишком больших усилий, надо сделать надпил на кольце хомута на расстоянии примерно 120° от короткого ушка хомутика или два надпила на расстоянии 120° от ушек хомутика в конструкции, когда рычаг находится на противоположной стороне. Кроме того, важно, чтобы зазор между проточенной частью корпуса и внутренней поверхностью хомутика был минимальным.

В-третьих, для телескопов диаметром 200—250 мм надо, чтобы хомут тормоза облегал уже не корпус оси, а специальный барабан, жестко насаженный на корпус (рис. 115, а, деталь 5). Этот барабан должен иметь больший, чем у корпуса, диаметр. В этом случае телескоп можно будет хорошо тормозить, не прилагая больших усилий.

Механизм тонких движений (рис. 118, а) превосходно работает с визуальными телескопами, когда небольшие неточности в движении совершенно не страшны. Иное дело фотографические работы с длительными экспозициями и фокусными расстояниями более 1000 мм. При попытках повернуть винт тонких движений крутящий момент из-за трения разлагается на две силы, одна из которых действует на трубу в направлении, перпендикулярном тому движению, которое мы хотим вызвать. В результате ведущая звезда прежде, чем вернуться на перекрестие, сначала делает движение в перпендикулярном направлении, что приводит к размазыванию изображений звезд на фотопленке.

Поэтому механизм тонких движений следует усовершенствовать следующим образом. Как показано на рис. 118, б,

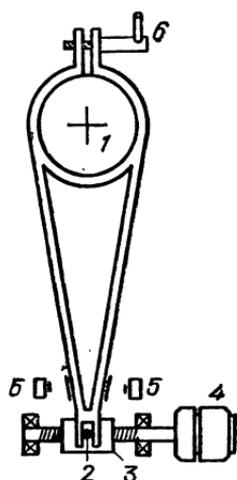


Рис. 119. Механизм тонких движений по склонению 250-миллиметрового рефлектора Ньютона (см. рис. 132): 1 — барабан оси склонений, 2 — поводок, 3 — гайка винта, 4 — реверсивный (меняющий направление вращения) электродвигатель РД-9 на 15 Вт, 5 — концевые выключатели, 6 — ручка тормоза оси склонений

на конце рычага теперь вворачивается микрометрический винт 3, а на противоположной стенке укреплен патрон с возвратной пружиной 4. В этом механизме поводок 5, жестко скрепленный с трубой телескопа, оказывается зажатым между винтом и патроном с возвратной пружиной. На поводок действует только перпендикулярная к его рабочей поверхности сила, и труба телескопа движется строго в одной плоскости. Звезда перемещается вдоль прямой линии.

Этот механизм широко используется повсеместно. Он применяется во многих (в том числе геодезических) приборах. Автор применил его при проектировании «Мицара» и «Альтаира».

Несколько иначе устроен механизм тонких движений по склонению у 250-миллиметрового рефлектора Ньютона клуба им. Д. Д. Максудова (рис. 119). Здесь подшипники винта установлены на консоли вилки. По винту движется гайка с «водителом», входящим в разрез на конце кронштейна. Хомут кронштейна охватывает барабан на полуоси склонений. Этот барабан вращается вместе с трубой телескопа. После закрепления трубы тормозом включается двигатель со встроенным редуктором. Его скорость 0,5 об/с. Двигатель реверсивный и может вращать винт в обе стороны. В крайних положениях кронштейн водила нажимает на микровыключатели 5 и выключает двигатель. Управляется механизм с ручного пульта нажатием одной из двух кнопок, соответствующих движению к северу или югу. Чем длиннее рычаг и мельче резьба винта, тем медленнее движение механизма. У 315-мм рефлектора автора длина рычага на оси склонений 700 мм, а шаг винта 1 мм. За один оборот винта труба смещается на $1/700$ рад или на $4,5'$.

Недостаток винта с возвратной пружиной в том, что скорость рычага неравномерна. Она максимальна в среднем положении и минимальна в крайних. Это мало сказывается, если работа ведется вручную, но становится совершенно недопустимым, если винт вращается мотором и ведет полярную ось за суточным вращением небесной сферы. Очевидно, что скорость движения телескопа будет непостоянной и механизм потеряет смысл. Поэтому рычаг с винтом практически никогда не употреблялся в качестве часового механизма для слежения за небом. Однако в 1978 г. Андре Гамон (Франция) предложил [39] установить на винте кулачок специальной формы, который позволяет компенсировать неравномерность хода рычага (рис. 120, а). Рычаг 1 хомутка, охватывающего полярную ось 2 , упирается своим концом в кулачок 3 , жестко связанный с гайкой, которая движется вдоль винта 4 . Этот кулачок, равно как и конец рычага, имеет форму специальной кривой, которую можно построить графически.

Допустим, что шаг винта составляет 1 мм и винт делает один оборот в минуту. Солнечные сутки содержат 1440 минут, звездные 1436 минут; значит, для того чтобы угловая скорость рычага составляла 1 об/сут, нужно окружность длиной 1440 мм или 1436 мм разделить на $2\pi = 6,28$. В этом случае длина рычага составит 229,2 мм для солнечных и 228,6 мм для звездных суток. На практике можно взять длину 229 мм и во время работы время от времени вводить небольшие поправки в суточный ход телескопа.

Теперь на листе хорошей бумаги вычертим схему механизма (рис. 120, б) в масштабе 1 : 1. Для того проведем прямую x_0R , которая обозначает ось винта, и дугу окружности с центром в точке O , расположенной на расстоянии 229 мм от прямой x_0R . Опустим перпендикуляр из точки O на прямую x_0R . Точку пересечения перпендикуляра и прямой обозначим x_1 . На дуге окружности отложим от точки x_1 в обе стороны дуги по 60° . Концы дуг обозначим J и H . Деля дуги на четвертые и восьмые части, получим точки a, b, c, d и $1, 2, 3, 4$. Каждая дуга составит $7^\circ,5$, или $1/48$ полной окружности. Так как длина окружности 1440 мм, то каждый отрезок будет иметь длину 30 мм. На прямой x_0R отметим точки x_0, A, B, C, x_1 через 30 мм.

На куске плексигласа толщиной 0,5—1 мм размером около 100×200 мм проведем острой иглой прямую линию и на ней отметим точку, которую назовем F (рис. 120, в).

Перевернем лист плексигласа и наложим плексиглас на схему «б», чтобы линия на плексигласе точно совпала с

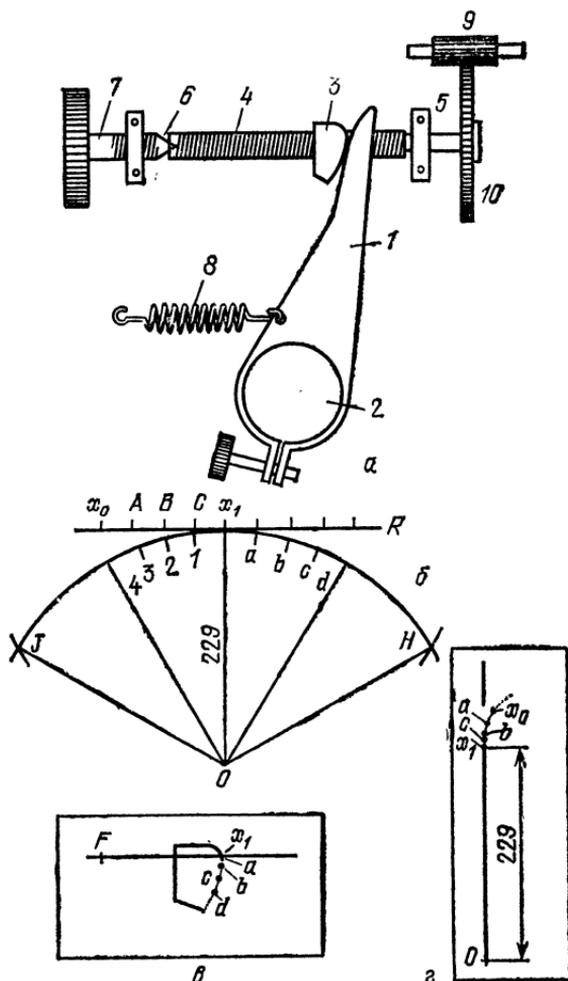


Рис. 120. Механизм Гамона для привода полярной оси и тонких движений: 1 — водило, 2 — полярная ось, 3 — гайка с кулачком специальной формы, 4 — винт часового привода, 5 — подшипник винта, 6 — упорный конус винта тонких движений, 7 — винт тонких движений, 8 — возвратная пружина, 9 — шестерня на выходном валу редуктора синхронного двигателя, 10 — шестерня винта часового привода

линией x_0R на чертеже, а точка F с точкой x_0 . Тщательно отметим точку x_1 . Осторожно переместим плексиглас вправо, чтобы точка F совпала с точкой A , следя за тем, чтобы

линия на плексигласе в точности совпадала с линией x_0R . Отметим на плексигласе точку a крестиком. Переместим точку F в точку B и отметим на плексигласе точку b . Последовательно перемещая плексиглас до совмещения точки F с точками C и x_1 , получим точки c и d . На плексигласе получилась цепочка точек, идущая вниз от прямой линии. Если теперь тщательно соединить эти точки плавной кривой, мы получим форму рабочей поверхности кулачка при работе винта на участке x_0x_1 . Вырежем получившуюся фигуру и тщательно обработаем ее по намеченной линии надфилем. Прикрепим двумя винтами плексиглас к куску латуни, стали или твердого алюминия и обработаем край металла, используя плексиглас в качестве шаблона.

Для равномерной работы механизма надо подобным образом обработать и конец рычага. Вырежем второй лист тонкого плексигласа, размером 100×400 мм (рис. 120, z). Прочертим вдоль тонкую линию и вблизи ее конца просверлим крошечное отверстие o . С помощью иглы совместим эту дырочку с точкой O на чертеже, следя за тем, чтобы не было люфта и плексиглас не болтался на оси. Далее совместим линию на плексигласе с линией Ox_1 и отметим точку x_1 ; повернем плексиглас, пока линия на нем не совпадет с точкой I , и отметим в этом положении точку C . Затем последовательно переводим линию на плексигласе в точки 2, 3, 4 и отмечаем соответствующие точки. Соединяем эти точки плавной кривой, которая представляет собой рабочую кривую рычага. При движении гайки слева направо сначала работает кривая на рычаге, а кулачок работает одной точкой (x_1), а после перехода точки x_1 работает кривая кулачка, а рычаг прикасается к ней одной точкой, поэтому форма кулачка и рычага вне вычерченных нами кривых не имеет большого значения. При переводе кривой рычага с шаблона в металл не забудем, что точка O — центр полярной оси телескопа.

Надо сказать, что сложность этих построений на самом деле кажущаяся. На практике все это получается довольно легко.

Дуга от точки 4 до точки d составляет 60° . Это значит, что, установив механизм на начало, можно вести наблюдение непрерывно на протяжении 4 часов.

Рассмотрим некоторые другие элементы механизма Гамона. Как бы точно ни была выполнена работа по перенесению рабочих кривых, как бы точно ни работал электродвигатель механизма, все равно придется время от времени в работу механизма вносить поправки. Это происходит из-за

незначительных прогибов инструмента, из-за так называемой атмосферной рефракции, в результате которой лучи света, проходя сквозь атмосферу, несколько искривляются,

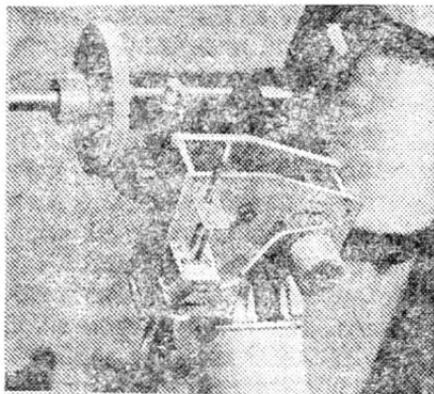


Рис. 121. Механизм Гамона для телескопа «Мицар», построенный львовским любителем Ю. М. Конрадом: вверху — сам механизм; справа южный конец полярной оси, на котором закреплен рычаг, идущий к кулачку слева; внизу — снимок лунного кратера Коперник и его окрестностей, полученный на этом телескопе с помощью окулярной камеры

и тем больше, чем ниже над горизонтом светило. Это приводит к тому, что звезда видна несколько выше, чем на самом деле. В результате по мере движения звезды от горизонта к меридиану, где рефракция минимальна, скорость этого движения меняется в небольших пределах; наконец, на неравномерности хода сказывается и нестабильная частота в сети переменного тока. Исходя из этого, надо предусмотреть возможность вносить поправки в работу механизма от руки по желанию наблюдателя. В механизме Гамона это достигается следующим образом. Главный винт 4 (рис. 120, а) установлен во втулке 5 справа так, что он может свободно перемещаться вдоль оси. Второй его подшипник представляет собой так называемую опору на шпиле. В коническую ямку на конце винта упирается конический конец второго винта 7, которым управляют от руки. При вворачивании этого второго винта он толкает главный винт право, при выворачива-

нии возвратная пружина 2 через рычаг возвращает винт с гайкой влево. Для того чтобы при этом не перемещать электродвигатель, на его валу установлена очень широкая шестерня 9, сцепленная с шестерней 10 на главном винте.

После того как полностью будет выбран ход главного винта, нужно отвести электродвигатель с редуктором в сторону и, быстро вращая винт за специальную ручку на его шестерне в обратную сторону, вернуть гайку в исходное положение.

Как показывает опыт, механизм Гамона (рис. 121) — хорошая альтернатива червячной паре.

§ 19. ЧАСОВОЙ ПРИВОД С ЧЕРВЯЧНОЙ ПАРОЙ

В качестве основного элемента часового привода обычно применяется червячная пара (рис. 122), которая представляет собой червяк 1, зацепленный с шестерней 2, имеющей зубья специальной формы. Ориентировочно диаметр червячной шестерни должен быть равен 1—1,5 диаметра главного зеркала.

В качестве привода лучше всего использовать синхронные реактивные двигатели типа СД-2, СД-10 и т. п., которые обычно применяются в различных самописцах и программных устройствах. Эти моторы питаются от сети переменного тока напряжением 220 В, потребляют мощность 7—15 Вт и имеют скорость вращения на выходном валу встроенного редуктора 2 об/мин. В дальнейшем мы будем иметь в виду подобный двигатель.

Если число зубьев шестерни 2 составляет 360, а винт вращается со скоростью 1 оборот в 4 минуты, то шестерня сделает полный оборот за 1440 минут (86 400 с), или за одни солнечные сутки. Это хорошо для солнечного телескопа, однако телескоп, предназначенный для наблюдения звезд, должен делать полный оборот за звездные сутки, которые примерно на 4 минуты короче солнечных и равны 86 164,09 с. Поэтому на шестерне надо нарезать 359 зубьев, чтобы телескоп, не отставая, следил за звездой.

Эта небольшая разница мало дает о себе знать при визуальных наблюдениях, когда даже при большом увеличении приходится поправлять положение телескопа раз в одну-две минуты, но становится слишком неприятной при фотографических наблюдениях с длительными экспозициями на астрографе с фокусным расстоянием 1 м и более. В этом случае поправки приходится делать каждые 3—4 с, что превращает работу в практически ручное гидирование.

Здесь мы приводим таблицу из статьи Эдварда Фейджина [40], где рассчитаны различные комбинации шестерен и приведены ошибки соответствующих механизмов. Эта таб-

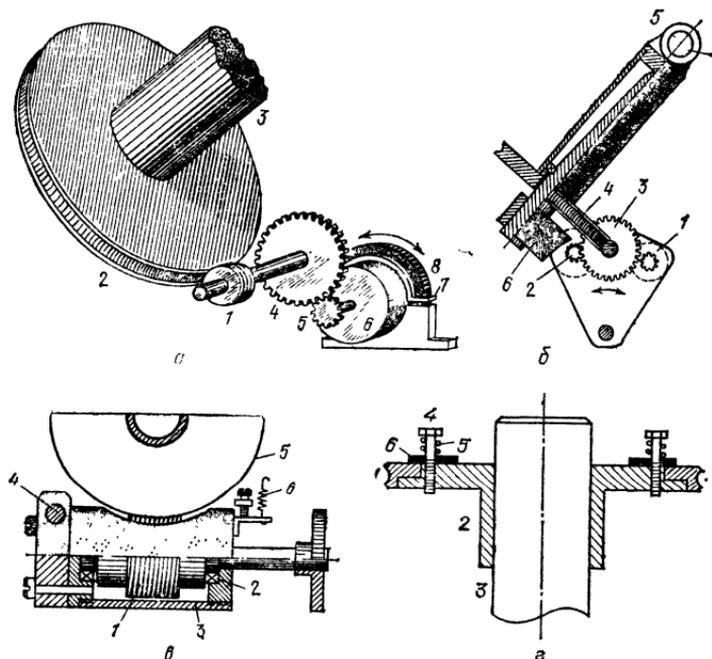


Рис. 122. Часовые приводы: *а* — часовой привод 150-миллиметрового рефлектора (см. рис. 110 и 111); 1 — червяк, 2 — червячная шестерня, 3 — полярная ось, 4 — шестерня червяка, 5 — шестерня выходного вала редуктора электродвигателя, 6 — электродвигатель с вмонтированным редуктором, 7 — хомут, притормаживающий корпус двигателя, 8 — ручка тонких движений; *б* — механизм грубого и тонкого наведения; 1 — электродвигатель часового механизма, 2 — электродвигатель грубого наведения, 3 — шестерня червяка, 4 — червячная шестерня, 5 — ось склонений, 6 — основание станины; *в* — червячная пара с замыкаемым винтом; 1 — червяк, 2 — подшипник червяка, 3 — корпус винта, 4 — ось, на которой отводится червяк, 5 — червячная шестерня, 6 — пружина; *г* — червячная шестерня с фрикционным; 1 — «венчик» шестерни, 2 — основание шестерни, 3 — полярная ось, 4 — винт, 5 — пружина, 6 — кольцевая прокладка

лица несколько изменена в предположении, что двигатель делает не 1 об/мин, как у Фейджина, а 2 об/мин, как это имеет место в нашем случае (табл. 22). В первой колонке приведено передаточное число между червячной шестерней и червяком. Если червяк однозаходный, то это число равно числу зубьев на шестерне. Во второй и третьей колонках

Таблица 22

Число зубьев червячной шестерни	Относительное число зубьев		Ошибка за звезды сутки, с
	на валу червячного винта	на валу двигателя	
147	254	13	0,53
169	17	1	25,91
200	158	11	17,73
207	111	8	-0,34
221	13	1	25,91
252	57	5	19,91
254	147	13	0,53
255	214	19	-0,93
266	54	5	19,91
271	53	5	13,91
321	170	19	-0,93
333	69	8	-0,34
338	17	2	25,91
359	8	1	-4,09
378	38	5	19,91
381	98	13	0,53
399	36	5	19,91
414	111	16	-0,34
438	400	61	-0,16
476	356	59	-0,02
508	147	26	0,53
510	107	19	-0,93
527	109	20	0,41

приведены относительные числа зубьев шестерни на валу винта и валу двигателя соответственно. Например, при числе зубьев однозаходной шестерни 169 передаточное отношение между винтом и валом двигателя составит 17/1. Значит, на винте придется поставить, скажем, шестерню со 170 зубьями, а на валу двигателя — с 10; умножив эти числа, например, на 1,4 мы получим для шестерни винта 238, а для шестерни вала — 14 зубьев.

В тех случаях, когда число зубьев на одной из цилиндрических шестерен велико, можно добавить еще одну пару шестерен с передаточным отношением 2/1, 4/1 или каким-нибудь другим, удобным для любителя.

Чтобы проверить правильность расчета, нужно умножить передаточное число червячной пары на отношение между числами зубьев шестерни винта 4 и шестерни вала 5 и умножить на время одного оборота двигателя (0,5 мин). Например, для однозаходной шестерни с числом зубьев 476 отношение числа зубьев шестерен винта и вала составит

356/59. Так как один оборот вал электродвигателя делает за 0,5 минуты, то производство будет равно

$$476 \times 356/59 \times 0,5 = 1436,0677 \text{ мин} = 86 \text{ 164,07 с,}$$

т. е. механизм спешит на 0,02 с.

Число зубьев 356 на шестерне вала винта велико, поэтому можно добавить еще одну пару шестерен. Эта пара может иметь отношение 2/1, тогда число зубьев на шестерне винта уменьшится до 178. Можно дополнительную пару взять с передаточным числом 4/1, тогда число зубьев на шестерне винта сократится до 89. Все-таки шестерню с числом зубьев 360 (или кратным 90) найти проще. Поэтому приведем комбинацию, при которой полярная ось делает один оборот за звездные сутки. Этот редуктор двузвенный — 120 : 36 и 146 : 61.

§ 20. КОНСТРУКЦИИ ЧЕРВЯЧНЫХ ПАР

Червячная пара — одно из самых уязвимых мест с точки зрения жесткости монтировки в целом. Диаметр червячного колеса обычно небольшой — чаще всего он равен диаметру зеркала телескопа или на 10—25 % превышает его. Впрочем, в профессиональных монтировках для любителей диаметр шестерен может быть меньше диаметра зеркала в 1,5—2 раза. Мы, однако, постараемся придерживаться первого варианта, особенно если телескоп предназначен для фотографирования в главном фокусе.

Малый радиус определяет плечо рычага, который сопротивляется крутящему моменту на полярной оси. Даже если телескоп очень хорошо уравновешен относительно полярной оси, случайные нагрузки от ветра, прикосновения и т. п. создают значительные усилия в месте зацепления червяка с шестерней и в подшипниках червяка. Например, если длина трубы 150-миллиметрового телескопа составляет 1200 мм, а сама она прикреплена к оси склонений в середине, то, приложив усилие на конце трубы в 1 кг, мы получим на винте усилие в 8 кГ, если диаметр шестерни 150 мм. Поэтому узел червяка должен быть сконструирован и изготовлен с большой тщательностью.

Один из возможных вариантов червячного механизма следующий. Червяк установлен в неподвижных подшипниках, которые удерживаются неподвижными опорами. Эти опоры должны обеспечивать высокую жесткость в направлении оси винта. Поэтому лучше всего их заключить в кожух из 1-миллиметровой стали или 2-миллиметрового алюминия

(рис. 121, в). Этот кожух будет защищать червяк от пыли и грязи и не даст возможности опорам-подшипникам наклоняться в направлении оси червяка, т. е. в самом опасном направлении. Разумеется, кожух должен иметь вырез для подведения шестерни к червяку.

Описанная шестерня может вращаться только от червяка и потому ее обычная скорость слишком мала для грубого наведения. Можно поступить так, как это в последнее время стали делать для небольших и умеренных профессиональных телескопов (рис. 122, б): последняя пара шестерен между винтом и валом двигателя размыкается, двигатель отводится, а с противоположной стороны шестерни 3 червяка подводится другой электродвигатель 2 с шестерней на валу, но с большим числом оборотов. Нужно, чтобы после этого винт червячной пары 3 получил вращение со скоростью примерно 5 об/с. Тогда телескоп будет поворачиваться вокруг полярной оси со скоростью примерно $5-10^\circ/\text{с}$ в зависимости от числа зубьев червячной шестерни. Поворот на 180° будет совершен за 20—40 с. После грубого наведения мотор 2 грубого наведения отводится от шестерни 3 и одновременно замыкается редуктор часового двигателя. Очевидно, что мотор грубого наведения может быть асинхронным, но обязательно реверсивным (меняющим направление вращения по желанию наблюдателя). Еще проще двигатели установить неподвижно, а перебрасывать «паразитную» шестерню.

В последние годы фирма Карл Цейс выпускает любительские телескопы, снабженные червячными парами с замыкаемым червяком. Приведем в качестве примера одну из новосибирских конструкций подобного механизма (рис. 122, б). Здесь червяк 1 с подшипниками 2 может несколько поворачиваться так, что червяк выходит из зацепления с шестерней 5. Специальная пружина 6 поджимает корпус, и червяк постоянно находится в зацеплении, даже если шестерня имеет достаточно большое «биение». Для грубого наведения надо оттянуть червяк и, когда шестерня освободится, навести телескоп. После этого червяк подводится к шестерне. При этом не всегда нарезка червяка попадает точно в углубление между зубьями шестерни. Это приводит к тому, что иногда во время замыкания червяка телескоп может сместиться в ту или иную сторону на $0,5-1^\circ$ в зависимости от числа зубьев на червячной шестерне. Так как большинство любительских телескопов имеют искатели, то это не страшно. Смещение объекта в поле зрения искателя на 1° легко поправить и привести объект на перекрестие,

немного повернув червячный винт. Особое внимание надо уделить редуктору между двигателем и червячным винтом. Здесь ошибка в нарезке зубьев шестерен или неконцентричная посадка шестерен на оси приведет к периодической ошибке, и ход двигателя придется ежеминутно корректировать.

В серийных телескопах для любителей применяется очень удобная в работе схема. В ней используется фрикционная (за счет трения с проскальзыванием) связь червячной

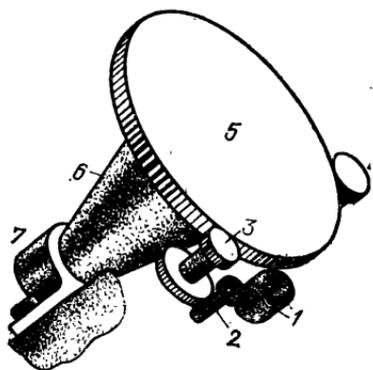


Рис. 123. Привод с гладким барабаном: 1 — электродвигатель, 2 — малая червячная пара, 3 — ведущий ролик, 4 — ролик, 5 — диск, 6 — полярная ось, 7 — южный подшипник

шестерни с полярной осью телескопа (рис. 122, з). Собственно шестерня в этом случае — только венец 1, надетый на диск 2, жестко связанный с полярной осью 3. Три или шесть винтов 4 через пружины 5 прижимают с помощью плоского круглого кольца 6 венец к диску 2. Сила прижима регулируется винтами 4. При наведении на объект телескоп идет с некоторым усилием, но плавно. После наведения он остается направленным на объект, и требуется заметное усилие, чтобы его сбить.

Вместо червячной шестерни можно использовать плоский и жесткий диск, жестко насаженный на полярную ось и ведомый небольшим роликом (рис. 123). Этот ролик через редуктор связан с двигателем. Вместо оси можно использовать план-шайбу, насаженную на единственный подшипник. Диск и ведущий ролик смазываются незамерзающей смазкой. Подобные приводы использованы для 1,5-метровых телескопов фирмы REOSC Южно-европейской обсерватории (ESO), французской обсерватории Верхний Прованс и др.

§ 21. МЕХАНИЗМЫ ТОНКИХ ДВИЖЕНИЙ В ЧАСОВЫХ ПРИВОДАХ

Поскольку часовой механизм приводится во вращение синхронным электродвигателем со строго постоянной скоростью, важно ввести приспособление, которое позволило бы вносить небольшие изменения в его ход.

Проще всего было бы установить на оси червяка механизм так называемого конического дифференциала: системы шестерен, позволяющие при неподвижном корпусе редуктора передавать вращение без изменения скорости, а при вращении корпуса увеличивать или уменьшать скорость на выходе механизма. Мы не можем позволить себе подробное описание этого механизма и его изготовление,

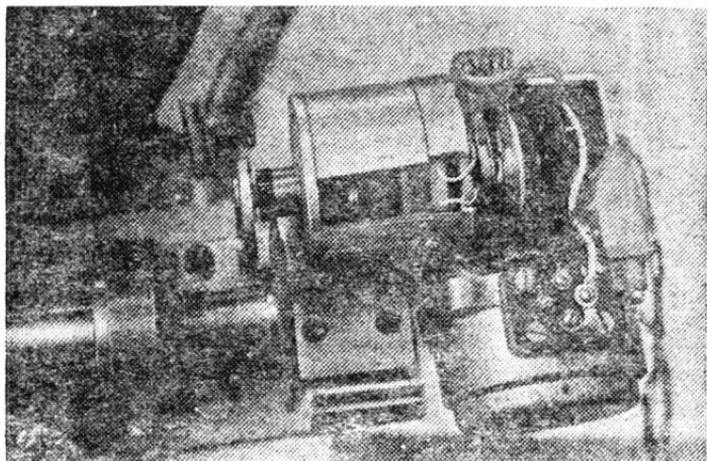


Рис. 124. Механизмы тонкой коррекции часового привода 315-миллиметрового рефлектора

так как его проще подобрать и на месте решить, как его применить в конкретном случае. Одна из разновидностей дифференциала — плоский дифференциал, или планетарная система. Эта система служит редуктором с огромным передаточным числом; вращением корпуса или одного из сателлитов (мелких шестерен, обегаящих две большие шестерни) можно увеличивать или уменьшать скорость вращения на выходе планетарной системы. Планетарные системы с небольшим передаточным числом применяются в электродрелях.

Можно выполнить червячную пару по схеме *червячного* дифференциала. В этом случае червяк может перемещаться в небольших пределах вдоль собственной оси. Тогда, не останавливая часового привода, можно несколько «подать» червяк в ту или другую сторону, а вместе с этим и слегка повернуть шестерню. Аналогичное устройство применено в механизме А. Гамона (см. § 18 этой главы).

Удобное решение было найдено автором книги для одного из своих телескопов (см. рис. 122, а и 110). Здесь винт 1 неподвижно закреплен на оси. Дополнительное вращение получается за счет поворота корпуса электродвигателя 6 вместе со встроенным редуктором. Поворачивая двигатель с помощью ручки 8 на некоторый угол, мы увеличиваем или уменьшаем скорость вращения червячного винта.

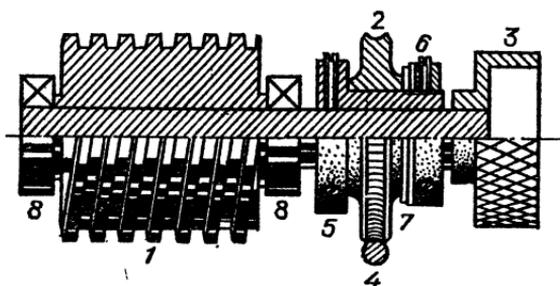


Рис. 125. Фрикционный механизм для коррекции на червяке: 1 — червяк, 2 — малая червячная шестерня, 3 — ручка коррекции, 4 — червяк малой червячной пары, 5 — деталь, поджимающая шестерню 2, 6 — гайка со стопорным винтом, поджимающая малую шестерню 2, 7 — плоская пружина, 8 — подшипники

Здесь корпус двигателя установлен в хомуте 7, который притормаживает корпус, чтобы включенный двигатель не начал вращаться в обратную сторону. У 250-мм и 315-мм рефлекторов Ньютона клуба им. Д. Д. Максудова применяется подобный механизм, но корпус маршевого двигателя вращается не рукой, а другим реверсивным мотором, управляемым с пульта (рис. 124).

Фрикционную связь можно сделать между редуктором двигателя и валом червяка (рис. 125). Во время хода телескопа двигатель ведет шестерню 2, фрикционно установленную на валу червяка 1. Так как усилие пружинного кольца 7 достаточно, вал вращается с нужной скоростью. Но когда нужно сделать коррекцию хода, наблюдатель поворачивает ручку 3, жестко скрепленную с валом. Во время этого поворота фрикцион шестерни проскальзывает на валу. После коррекции шестерня снова ведет вал с постоянной скоростью.

Наконец, возможно и немеханическое решение. Синхронный двигатель питается не от сети, а от генератора частоты, имеющего основную частоту 50 Гц и две частоты для коррекции: 25 и 75 Гц. Для коррекции наблюдатель нажимает одну из двух кнопок на ручном пульте. Такая коррекция хороша для тонких движений при гидировании длинно-

фокусного фотографического телескопа, но она может оказаться слишком тонкой для наведения телескопа на объект.

Это решение интересно еще и тем, что упрощает механическую часть и делает управление телескопом более комфортным и практически полностью исключает вибрацию телескопа во время корректирования.

§ 22. КООРДИНАТНЫЕ КРУГИ

Если телескоп установлен стационарно, имеет смысл снабдить его координатными кругами на обеих осях, впрочем и транспортабельному телескопу круги не мешают. С их помощью значительно проще находить объекты, особенно, когда они слабы и не могут быть видны в искатель.

Круг 1 (рис. 126) устанавливается жестко на оси 2, а на корпусе 3 оси устанавливают указатель (индикатор) 4. Можно и наоборот: круг на корпусе, индикатор на оси. Главное в том, чтобы ночью при слабом освещении отсчет на круге можно было видеть с максимальным комфортом.

Круг склонений должен быть разделен от 0° до 90° и от 0° до -90° . Когда телескоп направлен на полюс мира, индикатор должен показывать 90° .

Установку индикатора делаем так. Сначала точно выставляем полярную ось по высоте и азимуту (см.

§ 24 этой главы). После завершения выбираем звезду с хорошо известным склонением, направляем на нее телескоп и при сильном увеличении приводим звезду в центр поля зрения. После этого устанавливаем индикатор так, чтобы он указывал на круге склонение звезды. Эту процедуру нужно проделать несколько раз, уточняя положение индикатора. В конце при слабом окуляре попробуем отыскать объект по его склонению.

Для того, чтобы можно было уточнять положение индикатора, важно, чтобы было предусмотрено небольшое смещение круга или индикатора. После точной установки индикатор должен быть жестко закреплен. Нужно помнить,

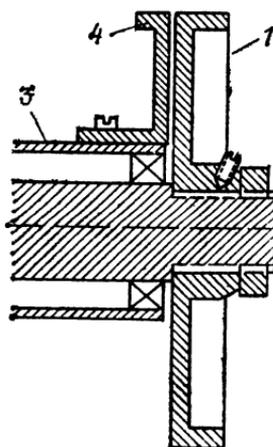


Рис. 126. Крепление координатного круга к оси: 1 — координатный круг, 2 — ось, 3 — корпус оси, 4 — указатель

что во время юстировки зеркал телескопа оптическая ось может слегка сместиться, поэтому после юстировки нужно проверить положение индикатора.

Круг часовых углов (рис. 127) делится на 24 часа, а мелкие его деления обычно соответствуют 4—5 минутам времени. Мы помним, что часовой угол выражается в единицах времени. Для установки индикатора на «ноль» воспользуемся плотницким уровнем. С его помощью выставим

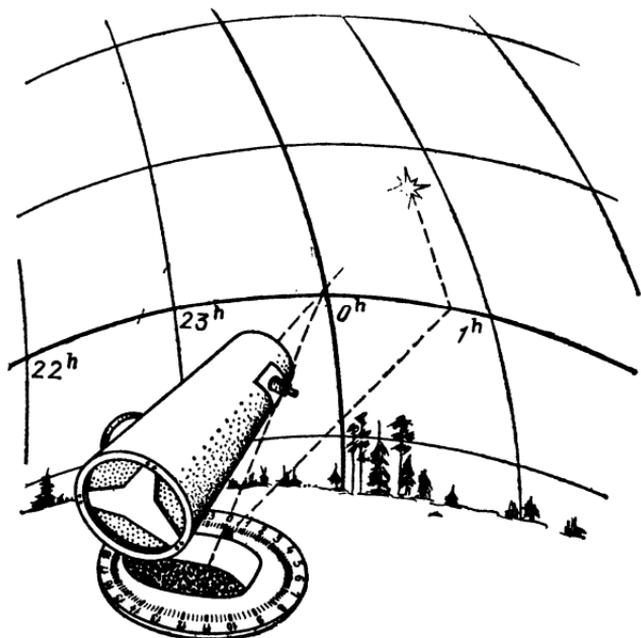


Рис. 127. Круг часовых углов

ось склонений строго горизонтально. Отсчет круга в этот момент должен быть «0». При повороте телескопа на 15° к западу индикатор должен показывать «1», при повороте еще на 15° — «2», при повороте к востоку на 15° — «23» и т. д. Круг должен быть установлен неподвижно (быть связанным с основанием монтировки), а индикатор двигаться вместе с осью склонений или вилкой. Он должен действовать и при работе наблюдателя ключами тонких движений.

Если телескоп снабжен часовым механизмом, можно поступить иначе — сделать координатный круг полярной оси подвижным. Тогда он должен легко поворачиваться на

полярной оси на 360° , а в случае необходимости легко закрепляться на ней. Иначе говоря в этом случае круг связан с полярной осью и участвует в суточном вращении телескопа. В начале наблюдений нужно направить телескоп на объект с хорошо известным прямым восхождением (α), установить индикатор на показания, равные прямому восхождению светила, и скрепить круг с полярной осью. Теперь, пока работает часовой механизм телескопа, круг

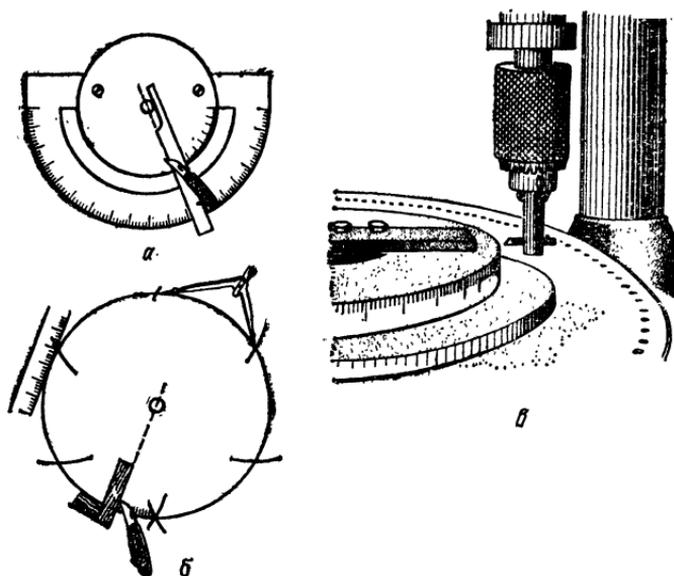


Рис. 128. Разметка координатных кругов: а — с помощью транспортира, б — с помощью циркуля и линейки, в — на сверлильном станке

движется и показания его не меняются. При переходе к другому объекту круг продолжает двигаться с осью, а поворачивается вилка или корпус оси склонений с индикатором. Очевидно, что это значительно удобнее, так как не требуется каждый раз при наведении вычислять часовой угол. Правда, это дается некоторым усложнением конструкции. Очень важно отметить, что в первом случае с неподвижным кругом разметка часовых углов ведется по часовой стрелке, если смотреть на круг с северного конца полярной оси, во втором случае разметка прямых восхождений ведется в обратном направлении, против часовой стрелки.

Как разметить круги? В простейшем случае по ободу круга можно наклеить полоску миллиметровки. Если выбрать масштаб 1° в 1 мм, то длина полоски составит 360° . В этом случае диаметр круга должен быть 114,6 мм, но если учесть толщину бумажки и слоя клея, то диаметр нужно взять 114,3 мм.

Удвоив диаметр, мы можем удвоить и масштаб до 1° в 2 мм. Это удобнее для наблюдений.

На мягком алюминиевом (или пластмассовом) круге деления можно нанести вручную перочинным ножом (рис. 128, а, б). Если же воспользоваться сверлильным станком, как это делал Уилфред Шихен [42], то можно изготовить круги, которые будут мало отличаться от фабричных (рис. 128, в). Технология их изготовления такова: из листового алюминия или другого металла толщиной около 1 мм вырезаем большой круг. Его диаметр выбираем с таким расчетом, чтобы он не задевал за стойку станка, когда установлен так, как показано на рисунке. С помощью большого школьного транспортира размечаем на краю круга градусы или минуты и часы, если это круг часовых углов. Двумя тремя винтами крепим этот круг к выточенному на токарном станке координатному кругу телескопа так, чтобы оба круга оказались строго концентричными. Теперь с помощью винта, пропущенного через центр круга, прикрепляем его к достаточно прочной металлической пластине, чтобы оба круга могли свободно, но без люфтов вращаться вокруг этого винта. Плиту крепим к станине сверлильного станка с помощью струбцины или другим способом. На станине возле края большого вспомогательного круга делаем штрих. Установив напротив этого штриха «нуль» на краю вспомогательного круга, мы подготовились к нарезанию штрихов на круге телескопа. Теперь вставим в патрон штырь со специально заточенным резцом. Шпиндель станка надо надежно закрепить (заклинить). Действуя ручкой сверлильного станка, мы можем опускать и поднимать резец строго вертикально.

Подводим резец к краю координатного круга и примеряем его. Если нужно, устанавливаем все приспособление относительно резца точнее. Наконец, проверив положение «нуля» на вспомогательном круге относительно штриха на станине, проводим первый штрих; его длина должна быть около 10 мм. После этого поворачиваем вспомогательный круг на 1° и проводим следующий штрих длиной около 7 мм. Длину 7 мм имеют «рядовые» штрихи, а 10 мм — каждый 5-й и 10-й.

В идеале можно было бы воспользоваться делительной головкой или поворотным столом для разметки. В этом случае весь процесс очень прост.

После того как штрихи будут нарезаны полностью, снимаем координатный круг с вспомогательного и наносим цифры. Их можно написать нитроэмалью, но нужно помнить, что для того чтобы краска держалась хорошо, ее надо наносить на металл, нагретый до 80—100°. Так как писать кистью на нагретой поверхности сложно, можно написать на металле при комнатной температуре, а потом сразу же нагреть. Лучше, однако, отдать круги граверу. (Они работают, например, в отделах или магазинах сувениров.)

§ 23. ИСКАТЕЛИ И ГИДЫ

Поле зрения телескопа относительно небольшое. Даже при минимальном увеличении оно обычно не превышает 1,5—2°. Поэтому довольно трудно навести телескоп на объект, когда этот объект неяркий и ничем не выделяется среди других. Особенно тяжело искать слабые туманности и скопления, отдельные (например, переменные) звезды или слабые планеты: Уран, Нептун и астероиды. Чтобы облегчить задачу, телескопы снабжаются искателями.

В простейшем случае это может быть диоптр — (рис. 129). Визирная линия, соединяющая центры кружков диоптра, может несколько наклоняться относительно оси телескопа. Это нужно потому, что при юстировке телескопа его ось может немного смещаться. Поэтому после каждой юстировки необходимо проверять точность установки диоптра по достаточно удаленным предметам.

Лучше, однако, сделать искатель в виде небольшой зрительной трубы (рис. 129, б).

В качестве объектива лучше употребить ахроматический объектив от зрительной трубы, теодолита или бинокля. Впрочем, можно обойтись сравнительно короткофокусной очковой линзой. Ее оптическая сила должна быть в пределах 3—5 диоптрий. Для удобства наблюдений искатель можно снабдить 90-градусной призмой. На рис. 129, в, г, д показаны простые оправы для призм.

Интересный искатель независимо друг от друга предложили до войны М. Паркс и Е. Лойд Маккарти *). На

*) Искатель Лойда Маккарти изображен (без ссылки на автора) на рис. 72 (с. 230) книги М. С. Навашина «Самодельный телескоп-рефлектор» (М.: Гостехиздат, 1953).

рис. 129, *е* изображен несколько измененный искатель Паркса и Маккарти, разработанный автором для телескопа «Алькор-М» приборостроительного завода им. В. И. Ленина. Здесь трубка с объективом и диагональным зеркалом

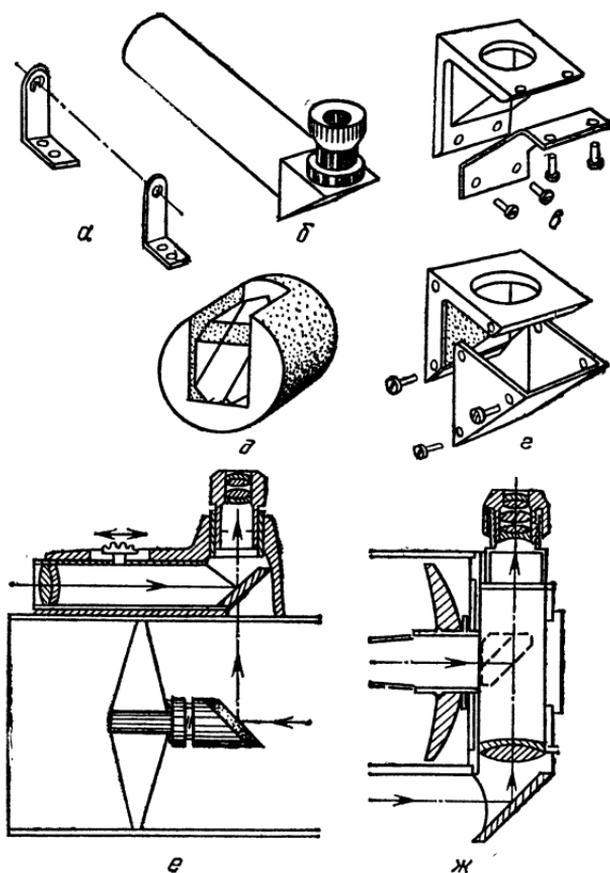


Рис. 129. Искатели: *а* — диоптр, *б* — оптический искатель с 90-градусной (зенитной) призмой, *в*, *г* — оправы для призмы, *д* — оправы для призмы Амичи (с крышкой) из очень плотного пенопласта, *е* — искатель Паркса и Маккарти, *ж* — искатель серийного менискового телескопа «Куэстар» (США)

движется внутри другой трубки. Когда трубка вдвигается, наблюдатель видит большое поле в искатель. Выдвинув трубку искателя вперед, наблюдатель видит поле зрения в рефлектор.

В менисковом телескопе «Куэстар» (США) также использован искатель с общим окуляром (рис. 129, *ж*). Здесь,

убрав в сторону призму с крышей (см. рис. 67, ж), через которую наблюдают в телескоп, наблюдатель получает возможность видеть объект через объектив искателя и диагональное зеркало перед ним.

Быть может, самый необычный искатель представляет собой карманный фонарь с остро сфокусированным лучом и укрепленный на телескопе строго параллельно ему. Темной ночью наблюдатель включает фонарь и направляет хорошо видимый луч на участок неба, где расположен объект. Однако для этого нужно настоящее черное небо за городом.

Увеличение оптического искателя обычно близко к равнозрачковому и равно диаметру объектива, деленному на 4—6 мм.

§-24. КОЛОННЫ, СТАНИНЫ, ФУНДАМЕНТЫ

Назначение станины — удерживать полярную ось телескопа в строго определенном положении без медленных смещений и без вибраций. Для того чтобы предотвратить вибрации, станина или колонна телескопа должна быть достаточно жесткой.

В целом телескоп можно рассматривать как консоль сложной формы с «защемлением» в плоскости опирания станины на фундамент. При равномерно распределенной нагрузке (например, при порывах ветра) изгибающий момент возрастает сверху вниз пропорционально квадрату длины этой консоли (см. рис. 85, а). Поэтому жесткость всех узлов монтажки должна возрастать пропорционально квадрату высоты сверху вниз. Это вынуждает увеличивать сечения деталей

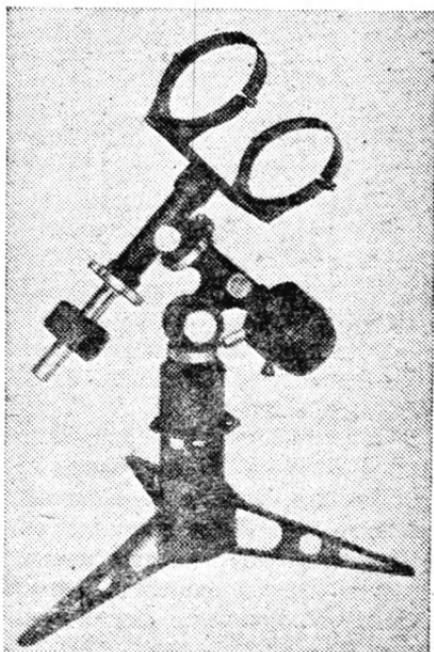


Рис. 130. Связь корпуса полярной оси с колонной

монтажки при переходе от трубы телескопа к оси склонений, к полярной оси, к корпусу полярной оси, к колонне и опорам, или к станине, если телескоп не имеет колонны.

В тех случаях, когда телескоп снабжен приспособлением для регулирования наклона полярной оси в больших пределах, хорошо снабдить его небольшим регулируемым опорным стержнем (рис. 130 и 131, а), который вместе с корпу-

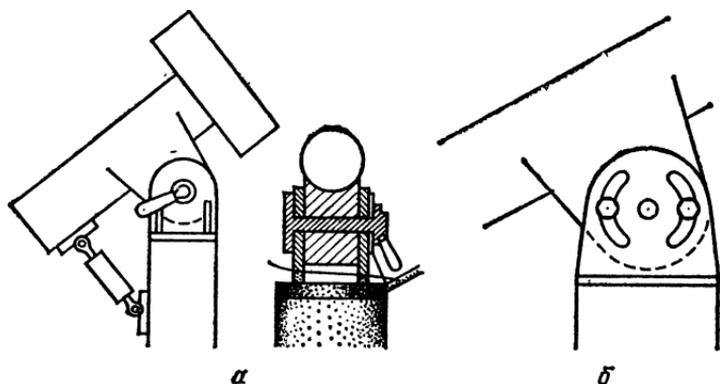


Рис. 131. Узел крепления полярной оси немецкой монтировки к колонне

сом полярной оси и колонны образует треугольник — фигуру, значительно более жесткую, чем просто угол «колонна — корпус оси». Снабдив монтировку этим стержнем, мы добьемся большой жесткости при перемещении оси в плоскости меридиана. Однако жесткость в перпендикулярном направлении, например при порывах западного или восточного ветра, не возрастет. Хороший способ получить достаточную жесткость в этом направлении — резко увеличить толщину пластин, связывающих корпуса полярной оси и колонны.

Для 110-миллиметрового телескопа с фокусным расстоянием 1000—1200 мм толщина этих пластин, отлитых из алюминия, может быть около 12—15 мм, для телескопа диаметром 150 мм, особенно если это фотографический телескоп, толщина пластин должна быть увеличена до 30 мм. Важно также отметить, что жесткость узла возрастает, если уменьшается длина этих пластин.

Для рефлекторов Ньютона диаметром 250—400 мм лучше усложнить конструкцию этого узла, как показано на рис. 131, б. Здесь вместо одного использованы два

винта. Чем дальше они отстоят друг от друга, тем жестче весь узел.

Диаметр стальной трубы колонны также имеет большое значение. Для визуального 110-миллиметрового рефлектора он должен быть около 60—70 мм при толщине стенок 3—5 мм.

Для фотографического рефлектора диаметром 150 мм диаметр стальной трубы — колонны должен быть увеличен

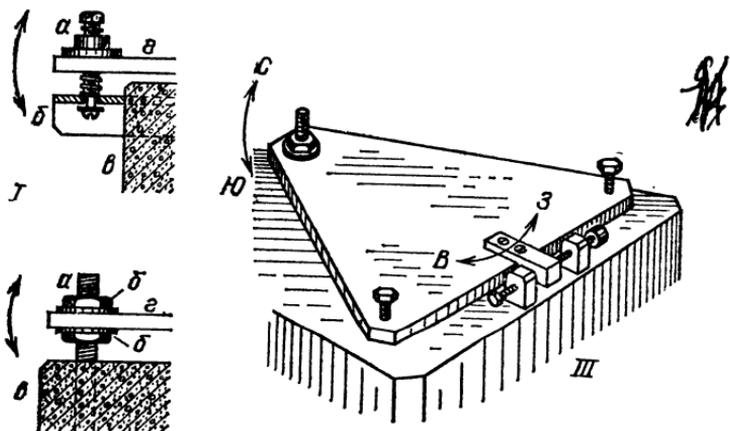


Рис. 132. Регулировочные винты для установки полярной оси: I — южный опорный винт 315-миллиметрового рефлектора автора; а — винт, б — консоль (швеллер), заделанная в бетонный фундамент, в — фундамент, г — основание монтировки; II — южный винт 150-миллиметрового рефлектора автора; а — винт, заделанный в бетонный фундамент, б — гайки, в — фундамент, г — основание монтировки; III — основание монтировки 150-рефлектора автора

до 120 мм. В обоих случаях имеется ввиду, что высота колонны составляет примерно 700—800 мм. При увеличении высоты колонны надо увеличить и ее диаметр приблизительно пропорционально корню квадратному из увеличения высоты. Например, при увеличении высоты колонны в 2 раза, ее диаметр нужно увеличить в 1,4 раза.

Особо опасный узел — место крепления ног колонны к собственно колонне. Ноги обычно представляют собой консоли с большим сечением возле колонны. Здесь надо помнить как об изгибе при простом наклоне колонны, так и при кручении колонны вокруг ее оси. Эта деформация возникает, например, в тех случаях, когда сила (прикосновение наблюдателя или порыв ветра) действует горизонтально на трубу телескопа, направленную под небольшим углом к горизонту.

Однако для телескопов Ньютона более 150 мм в диаметре желательно исключить колонну, установив корпус полярной оси прямо на основание (рис. 133). Это полезно для увеличения жесткости, а также и потому, что окулярный узел, расположенный на верхнем конце сравнительно длинной трубы, становится трудно доступным, когда телескоп направлен в зенит.

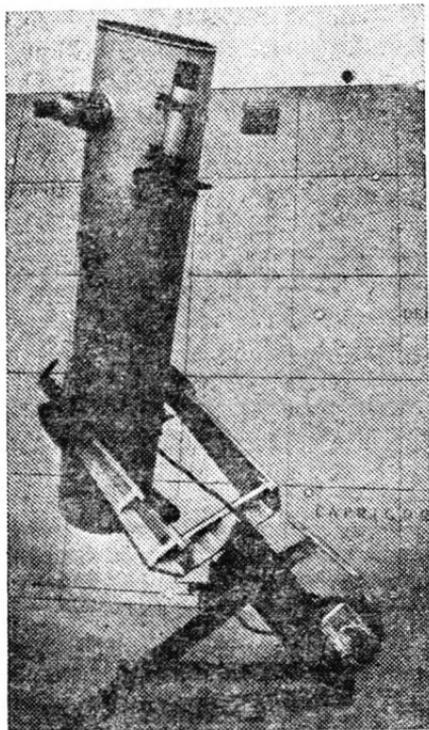


Рис. 133. 250-миллиметровый рефлектор Ньютона. Автор А. Б. Зайцев

Очевидно, что в этом случае регулировка наклона полярной оси может быть выполнена в пределах нескольких градусов. Устройство наклона представляет собой один опорный винт, расположенный на южном конце монтировки. Вращая этот винт, мы изменяем высоту наклона полярной оси (рис. 132).

Для установки полярной оси в плоскости меридиана станину нужно слегка поворачивать по азимуту. Для этого на северном ее крае устанавливается небольшая консоль длиной 30—50 мм. На фундаменте бетонируются две металличе-

ские пластины толщиной приблизительно 10 мм и шириной около 30 мм. Эти пластины имеют два отверстия с резьбой, в которые ввернуты два винта М10—М12. Консоль оказывается между этими винтами. Далее, вращая винты в ту или иную сторону, мы поворачиваем станину к западу или востоку и затем надежно фиксируем ее (рис. 132, III).

Телескоп на экваториальной монтировке должен быть точно установлен с таким расчетом, чтобы полярная ось была строго параллельна земной оси и была направлена точно на полюс мира. Это особенно важно, если на нем

ведутся фотографические наблюдения и если он снабжен кругами.

Наиболее простой способ следующий. Сначала ось устанавливается по высоте. Для этого, предварительно уставив на глаз полярную ось, наблюдаем на востоке звезду. Приведем ее на перекрестье и ведем телескоп вручную или включаем часовой привод. Если ось установлена неточно, то звезда будет постепенно дрейфовать по склонению к северу или к югу. Поправляя трубу ключом тонких движений по склонению, замечаем куда движется верхний конец трубы во время коррекции. Если кверху (к северу), то северный конец полярной оси нужно опустить. Если верхний конец трубы приходится все время опускать, то северный конец полярной оси нужно приподнять. Если во время слежения телескопа за звездой она не смещается с перекрестия в течение 10—15 минут, полярная ось установлена по высоте достаточно точно, показания круга склонений также будут точными.

Устанавливая ось по азимуту, наблюдаем звезду на юге вблизи меридиана и экватора. Если звезда дрейфует с перекрестия так, что верхний конец трубы приходится поднимать, то северный конец полярной оси нужно сместить к востоку. Если верхний конец смещается книзу, то северный конец полярной оси нужно сместить к западу. Если звезда в течение 10—15 минут остается на перекрестии, ось выставлена правильно.

Точная установка оси может занять 1—2 часа. Поэтому портативный телескоп можно снабдить искателем полюса. Он представляет собой трубку вроде искателя, которая может регулироваться шестью винтами. В центре поля должна быть сетка, с помощью которой наблюдатель наводит всю монтировку на полюс. К сожалению, полюс не отмечен сколько-нибудь яркой звездой. Полярная имеет склонение $\delta = +89^\circ 02'$, т. е. смещена относительно полюса на $58'$. Ее прямое восхождение $\alpha = 1^{\text{h}}48,8^{\text{m}}$. Наша задача так сместить с центра поля зрения перекрестие, чтобы при наведении перекрестия на Полярную визирная ось искателя оказалась наведенной на полюс.

Зная фокусное расстояние f' объектива искателя, мы можем вычислить, на сколько нужно сместить перекрестие с центра:

$$r = f' \sin 58'.$$

Предположим, что фокусное расстояние объектива 200 мм, тогда перекрестие придется сместить на $\Delta l = 200 \sin 58' = 3,4$ мм.

Полярная участвует в суточном вращении неба, и в верхней кульминации она бывает в $1^{\text{ч}}48,8^{\text{м}}$ местного звездного времени. У нас должна быть возможность в любое время суток так повернуть трубку-искатель вокруг ее оси, чтобы положение перекрестия соответствовало положению Полярной на небе. Для этого трубка снабжается часовым кругом и индикатором (рис. 134), стрелка которого направлена точно в том направлении, куда смещено перекрестие.

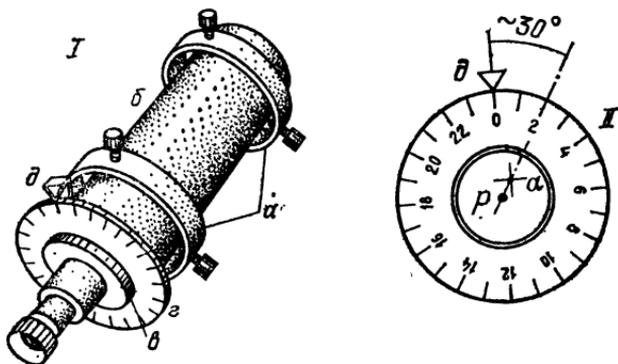


Рис. 134. Искатель полюса: I — устройство; а — кольца, жестко скрепленные с монтировкой, б — регулируемая неподвижная трубка, в — внутренняя вращающаяся с трением трубка, г — разделенный круг, вращающийся вместе с трубкой в, д — индикатор; II — разделенный круг, вид в поле зрения полюса и Полярной звезды (α) (положение для $0^{\text{ч}}$ звездного времени)

Как точно установить искатель полюса? Сначала устанавливаем полярную ось по дрейфам звезд, как было описано выше. Затем на круге часовых углов искателя выставляем часовой угол Полярной для данного момента местного звездного времени. После этого регулировочными винтами в кольцах устанавливаем искатель так, чтобы Полярная оказалась на смещенном в сторону перекрестии. Чтобы проверить правильность установки искателя полюса, полярную ось нужно немного сдвинуть и после этого установить заново, но уже с помощью искателя полюса. Если после этого звезды в поле зрения телескопа остаются на перекрестии в течение 10—15 минут без дрейфа, значит искатель установлен точно.

Последнее звено между телескопом и грунтом, на котором он стоит, — фундамент. Для небольшого телескопа на колонне достаточно забетонировать или выложить кирпичом небольшую площадку, на которую во время наблюдений ставится телескоп.

Диаметр фундамента для телескопа, м

Высота фундамента, м	Фотографирование с окулярным увеличением		Визуальные наблюдения		Фотографирование в ньютоновском фокусе	
	150 мм	300 мм	150 мм	300 мм	150 мм	300 мм
1	0,20	0,25	0,16	0,20	0,12	0,15
2	0,40	0,50	0,32	0,40	0,25	0,30
3	0,60	0,75	0,50	0,60	0,36	0,45
4	0,80	1,00	0,64	0,80	0,50	0,60
6	1,20	1,50	0,96	1,20	0,72	0,90
10	2,00	2,50	1,60	2,00	1,20	1,50

Для больших, особенно фотографических телескопов фундамент совершенно необходим. Диаметр фундамента зависит прежде всего от высоты его вершины над уровнем земли. Не вдаваясь в подробности, приведем таблицу с примерными значениями диаметра круглого в сечении фундамента (в метрах) в зависимости от его высоты и требований к жесткости телескопа в целом, которая в свою очередь зависит от действующего диаметра зеркала и назначения телескопа (табл. 23). Под высотой понимается разница в отметках между верхней площадкой фундамента и поверхностью грунта.

Лучший материал для фундамента — бетон или кирпичная кладка. Для невысоких фундаментов с малыми диаметрами можно с успехом применять круглые асбоцементные или стальные трубы. После установки трубы на место ее нужно заполнить щебнем или кирпичным боем, заливая через каждые 25—30 см цементно-песчаный раствор в пропорции 1 : 4.

Глубина закладки фундамента зависит от состава и состояния грунта. На скальных грунтах фундамент можно устанавливать прямо на поверхности, сняв только слой дерна. На песчаных, супесчаных, суглинистых и глинистых грунтах глубина заложения фундамента принимается на 10 см ниже глубины промерзания грунта. Так, в районе Новосибирска она составляет 2,2 м и 2,0 м в городе и сельской местности соответственно; в Москве глубина промерзания грунта составляет 1,4 м. Особенно важно это условие выполнять, если грунты влажные, глинистые (так называемые пучинистые). В сухих грунтах, особенно песчаных и

Соппротивление грунта, кГ/см²

Наименование грунта	Состояние грунта	
	твердое	пластичное
Щебень кристаллических пород	5	—
Щебень осадочных пород	3	—
Пески крупные	4	—
Пески мелкие	2,5	1,5
Пески пылеватые	1,5	1,0
Супесь	2,5	2,0
Суглинок	2,0	1,0
Глина	2,5	1,0

супесчаных, возможна меньшая глубина заложения фундамента (в соответствии с многолетним опытом местного строительства). Для того чтобы предотвратить неравномерное оседание грунта под тяжестью фундамента, нужно, чтобы нагрузка на грунт не превышала допустимую. Чтобы узнать удельную нагрузку на каждый квадратный сантиметр грунта, надо вес фундамента с телескопом разделить на площадь основания фундамента. Например, телескоп весит 50 кг, фундамент телескопа имеет высоту 4 м при диаметре 0,6 м. Объем фундамента 1,13 м³. При объемном весе бетона 1,6 т/м³ вес фундамента составит 1,8 т. Очевидно, что при таком массивном фундаменте весом телескопа можно пренебречь. Разделив вес фундамента на площадь его основания получаем давление на грунт, оно равно 0,64 кГ/см². Такое давление допустимо при самом слабом грунте. Одна из самых неприятных проблем — проблема микровибраций грунта. У 150-миллиметрового телескопа, установленного на жесткой подставке высотой 50 см над поверхностью Земли на расстоянии 200 м от Транссибирской магистрали, вибрация, вызванная проходящими поездами, была не более 2—3". Тот же телескоп, установленный на полу 4 этажа у самой стены, где вибрации пола сведены к минимуму, имел вибрацию 20—30" от поездов, проходящих на расстоянии 1 км. К сожалению, волнение приземных слоев воздуха сильно портит изображения, и это заставляет поднимать телескоп на высоту хотя бы 2—3 м от поверхности Земли. Таким образом, в выборе высоты фундамента телескопа любителю всегда приходится идти на компромисс.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ С ВИЗУАЛЬНЫМИ
И ФОТОГРАФИЧЕСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ

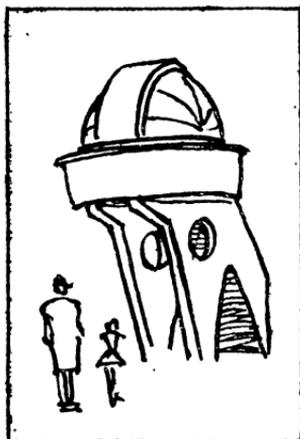
§ 1. АТМОСФЕРА — ТЕЛЕСКОП — НАБЛЮДАТЕЛЬ

Воздух — оптическая среда, хотя и значительно менее плотная, чем стекло, но все-таки достаточно плотная, чтобы зачастую сильно мешать наблюдениям. Свет, проходя через атмосферу, испытывает преломление, особенно, если лучи идут под небольшим углом к горизонту. В результате искривления луча объект виден несколько выше над горизонтом, чем на самом деле. Это явление называют *атмосферной рефракцией*. У самого горизонта рефракция так сильна, что восходящие или заходящие диски Солнца и Луны кажутся сплюснутыми. Лучи разных цветов, как и в стекле, преломляются под разными углами — синие больше, красные меньше. Поэтому у горизонта звезды переливаются всеми цветами радуги. Автору приходилось наблюдать Венеру на высоте 1° над горизонтом. В поле зрения «Алькора» был виден вертикальный спектрик, длина которого в несколько раз превышала размер серпа планеты. Рефракция зависит от многих факторов и в том числе от высоты над горизонтом, температуры и влажности воздуха и даже от цвета звезд. На уровне моря при температуре 10°C рефракция для белой звезды с солнечным спектром по формуле Г. Беннетта равна

$$R = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(h + \frac{7,31}{h+4,4}\right)} \text{ (мин. дуги),}$$

где h — высота светила над горизонтом в градусах.

На высоте 1° смещение светила в результате рефракции составляет $24'$, на высоте 5° — $10'$, на высоте 45° — $1'$, в зените рефракция равна 0.



За день различные участки земли нагреваются по-разному, поэтому ночью поднимаются струи теплого воздуха разной плотности. Изменения плотности воздуха приводят к изменению его оптической плотности.

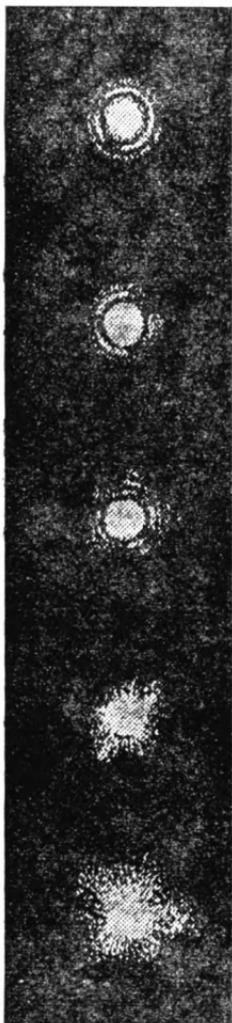


Рис. 135. Шкала Данжона и Куде. Качество дифракционного изображения оценивается от 1 (внизу) до 10 (вверху) баллов. Показано пять градаций

Неоднородности в воздухе можно рассматривать как быстро возникающие и исчезающие линзы и призмы. В турбулентном потоке на пути луча может оказаться много таких линз и призм. Все они переносятся по горизонтали, и картина непрерывно меняется.

Чаще всего средний размер «линз» равен 20—30 см. Небольшой телескоп диаметром до 15—20 см одновременно перекрывается такой линзой. Отклонение луча происходит одновременно для всего пучка света, прошедшего через объектив. Поэтому чаще всего в небольшие телескопы звезда видна в телескоп резко, но постоянно смещается на доли секунды или несколько секунд от своего среднего положения. Это приводит к дрожанию звезды и быстрым перемещениям фокуса вдоль оси. Звезда видна резким дрожанием дифракционным диском.

На зеркало большого диаметра упадет одновременно несколько по-разному отклоненных пучков света и это приведет к размыванию дифракционного диска. Часто вместо диска видно трепещущее нерезкое пятнышко света. Степень размытости дифракционного диска называют качеством изображения. Оценить его можно по шкале Данжона и Куде (рис. 135).

До сих пор еще встречаются утверждения, что планеты лучше наблюдать в телескопы небольших диаметров. Действительно, при наблюдениях с малыми телескопами изображения чаще всего хорошие, а с большими оно тем хуже, чем крупнее телескоп. Какие же выгоды дает крупный планетный телескоп? Дело в том, что в каждом пункте на-

блюдений рано или поздно наступает момент, когда атмосферная турбулентность становится малой и качество изображений повышается. В такие ночи большой телескоп, действующий на пределе его возможностей, покажет несравненно больше подробностей на поверхности планет или Луны, чем маленький.

Рассеяние пучка света иногда настолько сильно, что звезда буквально на долю секунды гаснет, чтобы в следующее мгновение снова вспыхнуть. Это явление называется *мерцанием*. Оно больше заметно для малых инструментов, а особенно для невооруженного глаза. Небольшое мерцание, видимое практически каждую ночь, мало сказывается на качестве изображений, и только сильное мерцание указывает на плохие телескопические изображения.

Турбулентность — не единственный враг астрономов. В воздушном океане плавают дымка и облака, которые поглощают свет, особенно у горизонта. Очень неприятны легкие слоистые облака, которые незначительно поглощают свет в зените, но у горизонта образуют совершенно непрозрачную мглу. Поэтому стараются не наблюдать слабые объекты у горизонта.

Даже высоко в горах небо не совершенно черное. Существуют три естественных источника свечения ночного неба. Это — свечение атмосферы под действием солнечных корпускул, свечение межпланетной пыли и свечение слабых звезд и неразрешимых на отдельные объекты телескопом или глазом галактик. В средних широтах роль этих источников в засветке неба примерно одинакова. В северных широтах вероятность усиления свечения за счет полярного сияния выше. При отсутствии полярного сияния свечение не зависит от широты.

Естественное свечение неба от солнечных фотонов постоянно. В годы солнечного максимума оно возрастает. Во время работы над фотографическим Паломарским атласом, который снимался 1,2-метровой камерой Шмидта и в котором зарегистрированы звезды до $21,1^m$, Р. Минковский и Дж. Абель писали в 1963 г.: «Это счастье, что обзор должен был быть закончен в период минимума солнечной активности. Достояны внимания потери в предельной звездной величине, что должно быть связано с величиной солнечной активности в течение нескольких лет после 1956 г., когда яркость неба над Паломаром примерно удваивалась». Действительно в годы максимума солнечной активности на той же камере удавалось зарегистрировать только звезды $20,4^m$.

Свечение межпланетной пыли можно видеть по всему небу, но наибольшая яркость его в плоскости эклиптики. Это так называемый *зодиакальный свет*. В южных районах он виден по вечерам, весной на западе и осенью на востоке перед началом сумерек.

Суммарный свет звезд более всего заметен в районе галактического экватора — вдоль полосы Млечного Пути. Здесь яркость света далеких звезд примерно в 10 раз сильнее, чем у галактических полюсов. К свету собственно звезд нужно добавить свет пылевых и газовых туманностей, а также свет многочисленных галактик, неразрешимых даже в самые крупные телескопы.

Яркость неба, как и слабых протяженных объектов, можно выражать в канделах с квадратного метра ($\text{кд}/\text{м}^2$) или в звездных величинах с квадратной секунды. Первая величина применяется в обычных фотометрических расчетах в том числе и в расчетах выдержки в астрофотографии, а вторая используется только в астрофизике. Она соответствует той яркости, которая получится, если блеск звезды «размазать» по площадке в 1 квадратную секунду дуги. Например, если блеск такой звезды равен 10^m , то это значит, что яркость участка неба равна 10^m с кв. секунды.

Чтобы яркость, выраженную в $\text{кд}/\text{м}^2$, перевести в астрофизическую величину, можно воспользоваться формулой

$$m = 12,4^m - 2,5 \lg B,$$

где B — яркость, выраженная в $\text{кд}/\text{м}^2$. Например, яркость туманности в $0,0005 \text{ кд}/\text{м}^2$ равна $20,6^m$ с кв. секунды.

Среди наземных обсерваторий наиболее темное небо на обсерватории Мауна Кеа на Гавайских островах. Обсерватория расположена на высоте 4700 м. Там яркость неба равна 23^m с кв. секунды или $0,000058$ ($5,8 \cdot 10^{-5}$) $\text{кд}/\text{м}^2$. На большинстве обсерваторий яркость неба в $22,5^m$ с кв. секунды ($10^{-4} \text{ кд}/\text{м}^2$) считается превосходной. Яркость рукавов галактики Андромеды М 31, которые еще получают на обычных фотографиях, равна примерно $22,8^m$ с кв. секунды, или $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ кд}/\text{м}^2$. Если эту яркость сложить с яркостью неба, суммарная яркость окажется выше $M_c = 10^{-4} + 6,9 \cdot 10^{-5} = 16,9 \cdot 10^{-5} \text{ кд}/\text{м}^2$, или $21,8^m$ с кв. секунды. Поэтому хотя яркость рукавов всего $22,8^m$ с кв. секунды, она еще заметна на достаточно темном небе.

Но естественная засветка не идет ни в какое сравнение с искусственной. Световое загрязнение ночного неба прячет от нас сотни и тысячи объектов, еще доступных любительскому телескопу, даже величине самых ярких галактик, ту-

манностей и скоплений теряется в городе. Еще 50 лет назад большинство людей знали, как выглядит Млечный Путь. Теперь же выросло два-три поколения, которые даже не догадываются, что такое настоящее небо. Давно уже стали по сути дела музеями Пулковская обсерватория, Московская обсерватория ГАИШ. Уже не работает 2,5-метровый рефлектор обсерватории Маунт Вилсон, часть телескопов Лийкской обсерватории отдана посетителям, так как многие работы там уже невозможны. Даже в небольших поселках сейчас ночное освещение обычно интенсивно. Если это можно, лучше близлежащие фонари снабдить колпаками, которые будут закрывать верхнюю полусферу. Но зимой эта мера недостаточно эффективна, так как белый снег, освещенный фонарем, сильно засвечивает небо (точнее близлежащий воздух).

Из всего сказанного ясно, что любительскую обсерваторию лучше всего располагать подальше от города на вершине холма, который доминировал бы над окружающей местностью. Надо избегать строительства обсерваторий в долинах. Важно, чтобы в горной местности обсерватория не оказалась в ветровой тени для доминирующего направления ветра в течение года.

Любители-южане находятся в более выгодном положении. Во-первых от того, что полюс мира расположен ниже, а экватор с эклипстикой, вблизи которого располагаются Солнце, Луна и планеты, выше над горизонтом. Поэтому изображения этих объектов много спокойнее, чем в средних и северных широтах. Высоко располагается и центр Галактики, где находится большое число туманностей и скоплений. Во-вторых, сумерки на юге короче, а летние ночи темны. В средних же и северных широтах «одна заря сменить другую спешит, дав ночи полчаса».

Качество изображения меняется от ночи к ночи, трудно дать однозначные рекомендации относительно прогноза на ночь. Ясные ночи с высокой прозрачностью наступают во время антициклонов вскоре после прохождения фронта. Замечательные по прозрачности ночи наступают в Сибири в период «бабьего лета» в сентябре или октябре в промежутках между обложными дождями. Такие же ночи возможны и после вечерней грозы. К сожалению, сразу после грозы качество изображения обычно невысокое из-за большой влажности и турбулентности воздуха.

Для наблюдений планет и Луны нужна спокойная атмосфера, которая наступает во время длительного антициклона с высоким атмосферным давлением. Атмосфера спо-

койна, если установился холодный фронт, она остается спокойной еще несколько дней после ухода фронта. Изображение улучшается, если есть легкие облака или дымка, которые замедляют охлаждение земли ночью. В Новосибирске, например, прекрасными для планетных наблюдений бывают зимние морозные ночи, когда устанавливается устойчивый антициклон. Воздух у поверхности и на большой высоте совершенно спокоен, от чего в городе ощущается запах подгоревшего подсолнечного масла — смог. Прозрачность в такие ночи невелика, но это не мешает наблюдениям Луны и планет. Изображения обычно спокойны, если перепад температуры от дня к ночи не превышает $10\text{--}15^\circ\text{C}$.

Для наблюдений слабых протяженных объектов: туманностей, галактик, комет важно, чтобы глаза адаптировались к темноте. На это требуется $15\text{--}30$ мин. Нужно помнить, что чувствительность к яркости центральной части сетчатки снижена. Поэтому при наблюдениях самые слабые объекты «пропадают» в центре поля зрения. Наивысшей чувствительностью к яркости обладают районы сетчатки в виде кольца с внутренним радиусом 10° и наружным 20° . Это значит, что для наблюдений объектов на пределе глаза нужно отводить в сторону примерно на 15° . Это так называемое *боковое зрение*.

Если изображение падает на одну и ту же часть сетчатки в течение нескольких минут, она теряет чувствительность. В этом легко убедиться, если в течение минуты неподвижно смотреть на ярко освещенный белый квадрат. Если потом перевести взгляд на белую стену, на ней виден темный квадрат. Это результат того, что участки, на которые падало изображение квадрата, на некоторое время «ослепли». Поэтому, когда нужно обнаружить самые слабые объекты, полезно слегка покачивать телескоп, чтобы изображение объекта смещалось на сетчатке.

§ 2. ИСПЫТАНИЕ ТЕЛЕСКОПА

Вновь построенный телескоп требует сравнительно длительных испытаний, чтобы его хозяин мог выявить его реальные возможности. Рассмотрим испытания оптических качеств телескопа. Из всего того, что было сказано о качестве оптики и качестве атмосферных изображений, ясно, что нам придется испытать телескоп на разрешающую силу и проникающую способность как для точечных, так и протя-

женных объектов с большой и предельно малой поверхностной яркостью.

Простейшее испытание разрешающей способности телескопа можно сделать с помощью миры (рис. 7).

Чаще, однако, разрешающую силу телескопа оценивают по двойным звездам. Для этого наблюдают тесные пары с расстояниями, равными или чуть больше предельного угла разрешения, о котором можно прочесть в главе первой. Ясно, что атмосферные условия должны быть очень хорошими. Для того, чтобы их оценить, воспользуемся шкалой Данжона и Куде. Работать можно при качестве 8—10 баллов. Мы помним, что предельное разрешение зависит не только от объективных причин, но и от опыта и навыков наблюдателя. Будем считать, что если разрешаются двойные звезды примерно одинакового блеска в расстоянии

$$\rho = \frac{120}{D} \div \frac{140}{D}$$
, то телескоп хорош и удовлетворяет самым

жестким требованиям. Если же наблюдатель в состоянии различить с тем же телескопом еще более тесные пары, то это значит, что его зрение выше всяких похвал. Эти испытания нужно проводить только по звездам вблизи зенита.

Наиболее жесткие испытания оптики телескопа можно сделать теньевым методом по звездам. Для этого при включенном часовом механизме наводим телескоп на сравнительно яркую звезду 1—3^m. Вместо окуляра устанавливаем нож и с помощью фокусирующего устройства добиваемся плоского рельефа на зеркале. В наиболее благоприятном положении ножа на зеркале будет виден плоский или более или менее сложный рельеф. Читатель, самостоятельно отполировавший зеркало, сможет оценить его качество по звезде. Нужно помнить, что при таких испытаниях на параболическом зеркале будет виден не «бублик», а плоский рельеф. На сферическом — «подвернутый край». Эти испытания удобнее всего проводить по Полярной, так как она расположена рядом с полюсом и ее скорость в суточном движении минимальна. Кроме того, в наших широтах она расположена сравнительно высоко над горизонтом, и атмосферные помехи не слишком велики. Край ножа лучше располагать вдоль суточной параллели. Тогда даже с плоским часовым приводом или вообще без него звезда долго остается на краю ножа.

Проницающую способность телескопа для слабых протяженных объектов можно определить по некоторым слабым туманностям, шаровым скоплениям и галактикам. Этот тест интересен как для слабых так и для достаточно силь-

ных любительских телескопов. Нужно не забывать, что эти испытания интересны только при незасвеченном небе и что если туманность имеет не только большой блеск, но и большие видимые размеры, ее поверхностная яркость низка. Поэтому здесь результаты испытаний часто неоднозначны. Они должны проводиться часто и по многим объектам, чтобы наблюдатель со временем мог легче ориентироваться в этом сложном вопросе.

§ 3. КОМЕТОИСКАТЕЛИ

Кометоискателем может быть любой телескоп с большим полем зрения и имеющий окуляры для выходных зрачков примерно от 4 до 8 мм. Одна из сложных дилемм, стоящих перед любителем — наблюдателем комет и объектов каталога Мессье, — выбор диаметра телескопа. Дело в том, что инструменты малого диаметра при равнзрачковом увеличении имеют большое поле, но малую проникающую способность. Телескопы с большими зеркалами имеют малое поле. Например, 100-миллиметровый рефлектор при выходном зрачке 6,7 мм имеет увеличение $15\times$. С окуляром, имеющим субъективное поле зрения 45° , такой рефлектор будет обладать полем в пространстве предметов в 3° . Это хорошо. Но проникающая способность этого телескопа для звезд составит (для зрачка 6,7 мм и увеличение $15\times$) $9,5^m$. Рефлектор же с зеркалом 300 мм при зрачке 6,7 мм будет обладать увеличением $45\times$, полем (с тем же окуляром) 1° и проникающей силой 12^m . Вероятность заметить слабую комету будет в 9 раз больше, чем у 100-миллиметрового телескопа. Но при этом его поле зрения (по площади) будет в те же 9 раз меньше. Значит, для того, чтобы осмотреть один и тот же участок неба, потребуется в 9 раз больше времени.

Замечено [55], что чаще всего кометы открывают с 250-миллиметровыми рефлекторами. В действительности это означает только то, что диаметр 250 мм в наше время самый распространенный у любителей, особенно за рубежом. Оптимальными же по целому ряду причин следует считать диаметры рефлекторов от 100 до 250 мм. За рубежом такие телескопы называются «рич-филд» — «телескопы с богатым полем зрения». Имеется в виду не только большое поле, но и максимальное число звезд, которые видны в поле зрения за одну установку телескопа.

Рассмотрим некоторые примеры механического решения кометоискателей. Как правило, строители этих теле-

скопов максимальное внимание уделяют удобству наблюдателя во время утомительных поисков кометы или объектов каталога Мессье. На рис. 136 показан телескоп, у которого фокус Ньютона выведен в горизонтальную ось азимутальной монтировки. При любом положении телескопа

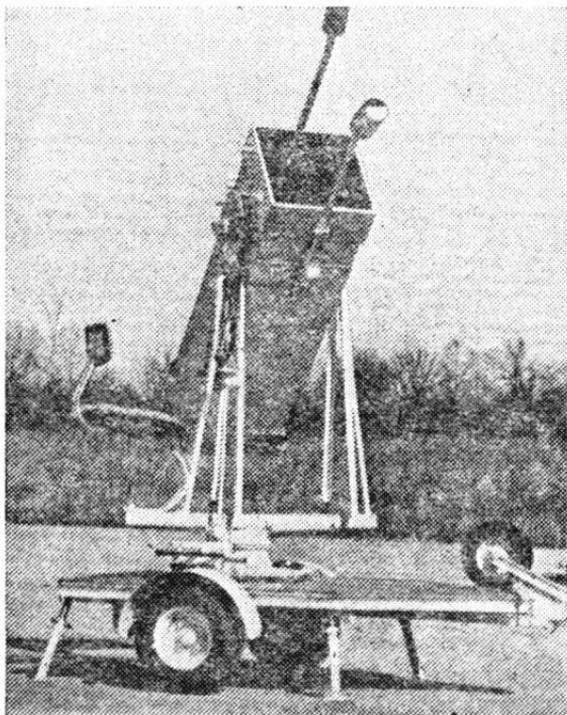


Рис. 136. Телескоп Ньютона с окуляром, выведенным в горизонтальную ось. Сиденье для наблюдателя укреплено на продолжении траверзы вилки

наблюдатель всегда в одном и том же положении. Один из самых авторитетных любителей мира Лесли Пелтиер ранние свои работы вел на обсерватории, изображенной на рис. 137. Рисунок этот настолько подробен, что предоставим читателю рассмотреть его самым внимательным образом.

Но вот один из самых знаменитых любителей наших дней Уильям Брэдфилд, открывший уже 13 комет, наблюдает с самым примитивным телескопом. Этот кометоискатель построен Ральфом Сэнгстером. Его объектив — старый фотографический объектив Пецваля диаметром 150 мм с

фокусным расстоянием 840 мм. Фокусное расстояние окуляра 32 мм, который при увеличении $26\times$ дает поле 2° .

В заключение кратко опишем четыре кометоскателя клуба им. Д. Д. Максудова. Первый из них сделан на базе телевизионного объектива «ТО-750» (рис. 138). Это 130-миллиметровый рефрактор с корректором комы на окулярном

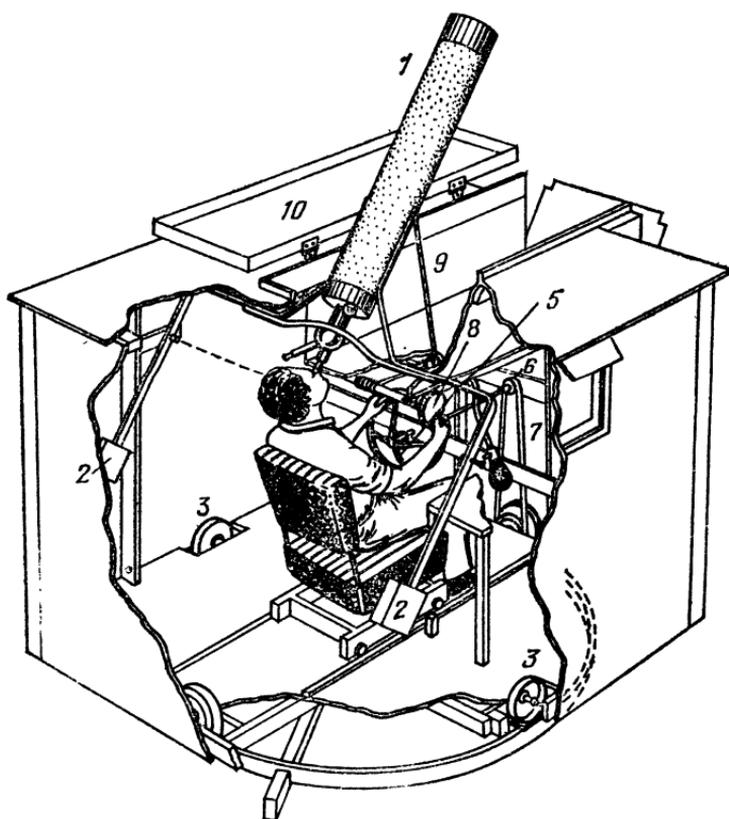


Рис. 137. Обсерватория Л. Пельтера: 1 — телескоп, 2 — противовесы, 3 — ролики, 4 — кольцевой «рельс», 5 — штурвал поворота по азимуту, 6 — шкив, 7 — ремень, 8 — штурвальчик подъема по высоте, 9 — трос подъема по высоте, 10 — створка

конце. Его фокусное расстояние 750 мм. Для сокращения размеров объектива он содержит в схеме два плоских зеркала. При увеличении $22\times$ он имеет поле $2^\circ 40'$. Второй аналогичный телескоп диаметром 160 мм с фокусным расстоянием 1000 мм при увеличении $27\times$ его поле $2^\circ 12'$.

Второй вариант кометоискателя изображен на рис. 117. Это два телескопа Ньютона на монтировке Добсона. Первый из них 150/525 мм при увеличении $25\times$ имеет поле $2^{\circ}20'$, второй — «ньютон» 250/1530 мм при увеличении $40\times$ дает поле $1,5^{\circ}$, а при увеличении $77\times$ имеет поле $48'$. Если рефракторы «ТО-750» и «ТО-1000», особенно второй, страдают



Рис. 138, 130-миллиметровый кометоискатель клуба им. Д. Д. Макутова

заметным хроматизмом, то наблюдения объектов Мессье с «ньютонами» оставляют неизгладимое впечатление в темные незасвеченные ночи на обсерватории автора в селе Горн под Новосибирском.

При наблюдениях предельно слабых объектов очень важен вопрос о потерях света в телескопе. На непросветленном двухлинзовом объективе-ахромате на каждой из четырех его поверхностей теряется по 4% света (0,04). Суммарное пропускание составляет $(1-L)^n$, где L — потеря на одной поверхности, а n — число поверхностей. Для непросветленного ахромата это составит 0,85, или 85%. Просветленный

объектив пропускает света больше, так как потери на одной поверхности составляют 0,5 %, или 0,005. В этом случае объектив пропускает 98 %. К этому нужно добавить, что малые объективы склеиваются, и потери на двух внутренних (склеенных) поверхностях практически равны нулю. Тогда пропускание объектива равно 99 %.

Однослойное алюминиевое покрытие зеркала отражает 88 % или 0,88 видимого света. Кроме того, практически все системы рефлекторов снабжены вторичными зеркалами, которые экранируют в среднем 0,06 светового пучка по площади. Обозначив потери на экранирование буквой T , а коэффициент отражения буквой k , получим величину пропускания $(1-T)k^n$. Для двухзеркального ньютоновского телескопа пропускание составит 73%. К этому надо добавить, что алюминиевый слой слегка рассеивает свет, и поэтому фон неба в рефлекторе чуть светлее, чем в рефракторе. Но существует простой способ резко повысить эффективность рефлектора. Для этого достаточно увеличить диаметр зеркала. Это сравнительно просто сделать. Для того, чтобы эффективность рефлектора уравнилась с эффективностью 100-миллиметрового рефрактора, достаточно взять зеркало диаметром 135 мм. Можно увеличить размер зеркала до 150 мм. Правда, несложный расчет покажет нам, что у 100-миллиметрового рефрактора при равнозрачковом увеличении будет $2^{\circ}40'$ (имеется в виду, что поле окуляра 45°). У 150-миллиметрового рефлектора с подобным окуляром и при равнозрачковом увеличении поле будет равно $1^{\circ}50'$. По площади это в два раза меньше, и значит, во столько же раз медленнее будет идти осмотр неба.

Обычно не придают большого значения конструкции окуляра и качеству его поверхностей. Напомним, что на поверхностях линз окуляра теряется столько же света, как и линзах объектива. Большинство окуляров имеет 4 поверхности, граничащие с воздухом. Поэтому очень важно, чтобы окуляр был просветленным. Кроме того, погоня за сверхширокоугольными окулярами приводит к тому, что мы выбираем окуляр с еще большим числом поверхностей. Некоторые любители поступают просто — они устанавливают на своих телескопах простые окуляры Рамсдена с минимальными потерями. Некоторое ухудшение качества изображения при малых увеличениях не играет большой роли.

§ 4. РЕФЛЕКТОРЫ-БИНОКУЛЯРЫ

Зрение двумя глазами не только комфортно, но и острее. В этом легко убедиться, рассматривая в бинокль небесный объект сначала одним глазом (не замуриваясь, а прикрыв рукой один из объективов), а потом двумя. Замечено, что при наблюдении двумя глазами разрешающая сила и проникающая способность возрастает на 20—30%. Некоторые любители строят себе бинокляры из двух небольших

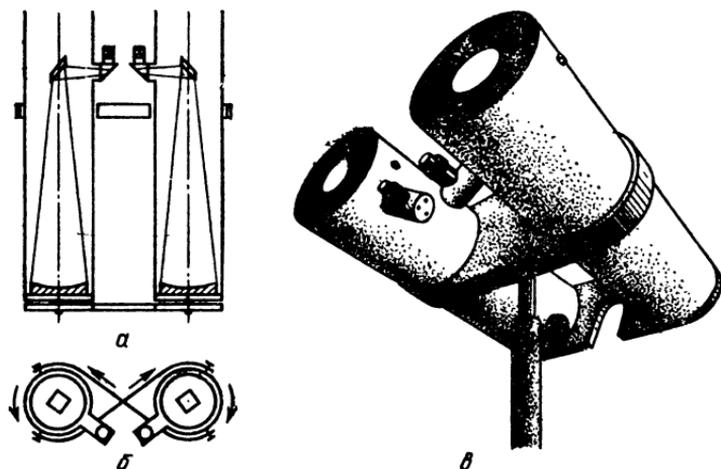


Рис. 139. Рефлектор-бинокляр: *а* — принципиальная схема, *б* — механизм изменения межцентрового расстояния, *в* — общий вид

телескопов, например из школьных 60- или 80-миллиметровых рефракторов. Однако интереснее построить бинокляр с большим отверстием и с высоким качеством изображения. Для этой цели более всего подходит схема Ньютона (рис. 139).

Обе трубы монтируются параллельно.

В зеркальном (ньютоновском) бинокляре необходимо ввести еще одно зеркало или призму для того, чтобы направить пучок света параллельно главной трубе. Из-за этого возникает еще одно отражение, и изображение становится неконгруэнтным — зеркальным. С этим можно мириться. Но если нужно, тогда можно установить не обычную 90-градусную призму, а призму с крышей (см. рис. 67, *б*). Изображение в этом случае станет не только конгруэнтным, но и прямым («вниз ногами»).

Наблюдатель стоит к объекту спиной. Но если расположить трубы подальше друг от друга, чтобы голова наблюдателя свободно входила между ними, то можно наблюдать и лицом вперед.

Для того, чтобы менять межцентровое расстояние (расстояние между окулярами), обе трубы должны поворачиваться вокруг своих осей, но не свободно, а с некоторым трением. Рис. 143 показывает основную идею и некоторые подробности.

§ 5. АСТРОГРАФЫ

Строго говоря, любой фотографический телескоп, предназначенный для фотографирования звезд, туманностей, скоплений, комет, астероидов, может называться астрографом. Но исторически сложилось так, что обычно имеется в виду линзовый или зеркально-линзовый инструмент с полем зрения не менее нескольких градусов. Относительные отверстия астрографов в наше время могут быть от $1/8$ — $1/6$ до $1/2$, $1/1$ и даже больше.

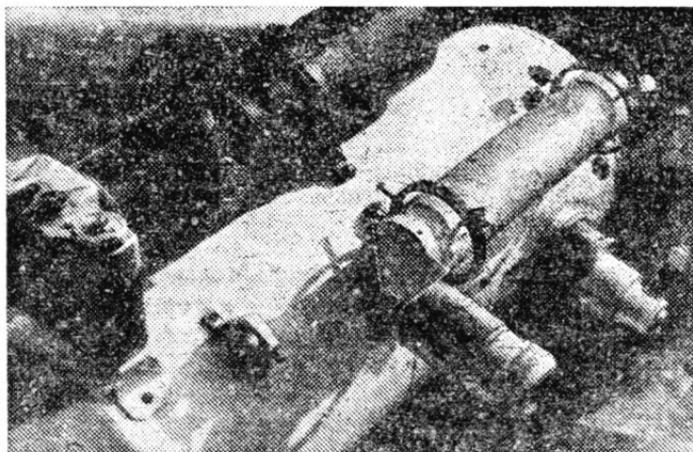


Рис. 140. Объектив «Таир-3» в качестве астрографа. Установлен на 150-миллиметровом рефлекторе автора

Здесь мы кратко рассмотрим конструкции нескольких астрографов с серийными фотообъективами. Обычный фотоаппарат, даже малоформатный, у любителей — астрограф. Часто он устанавливается на телескопе параллельно главной трубе (рис. 140). Здесь показано крепление аппарата

«Зенит» с объективом «Таир-3» на 150-миллиметровом ньютоновском рефлекторе автора. У серийного «Мицара» для тех же целей есть площадка, укрепляемая на продолжении оси склонений со стороны противовеса. Небольшой вес малоформатных и среднеформатных камер не вызывает особых трудностей при установке на телескопе (рис. 141).

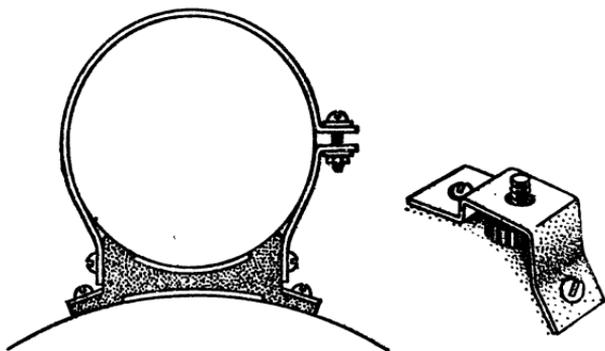


Рис. 141. Способ крепления объектива и камеры: *а* — хомут, удерживающий объектив, *б* — винт для крепления к телескопу малоформатной камеры

При фокусном расстоянии свыше 200—250 мм и при формате от 6×9 см и 9×12 см обычные «павильонные» или «дорожные» камеры с мехом (гармошкой) слишком ненадежны с точки зрения жесткости. Поэтому приходится делать достаточно жесткий корпус самому.

Любители обычно используют объективы от старых камер, от аэрофотокамер, от диапроекторов и т. д. Они, как правило, не содержат в оправе механизм фокусировки. Это значит, что и его придется изготовить самому. Проще всего выточить пару трубок, которые на резьбе наворачиваются одна на другую. К первой трубке на резьбе крепится объектив. Вторая трубка с помощью трех винтов крепится к передней стенке камеры. Это нужно, чтобы установить ось объектива перпендикулярно пластинке.

Обычное относительное отверстие современных объективов крупноформатных камер около $1/3$ — $1/4$, а кружок рассеяния (абберационный кружок) примерно 0,1 мм. Это значит, что смещение пластинки вдоль оси на величину 0,3—0,4 мм приведет к нерезкости. Это касается наклона пластинки к оси объектива. Поэтому нужно предусмотреть приспособление для регулирования наклона кассеты к оптической оси. Это можно сделать, например, с помощью трех

пар юстировочных винтов наподобие того, как это делается на оправе главного зеркала рефлектора.

Корпус можно сделать из многослойной фанеры на каркасе из алюминиевого или стального уголка. Для камеры 9×12 см с фокусным расстоянием 210 мм в клубе им.

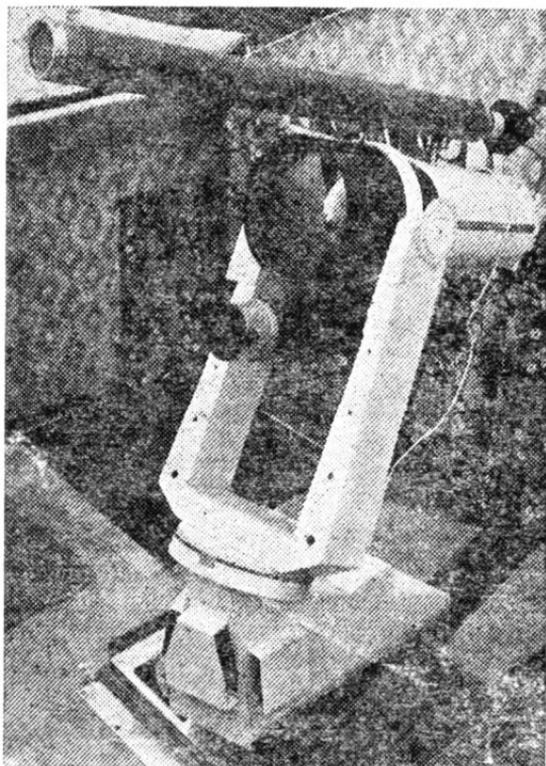


Рис. 142. Астрограф с объективом «Уран-12», построенный рижским любителем Г. Селевичем

Д. Д. Максutowa с успехом использована трехмиллиметровая фанера (см. рис. 110). Возможен корпус из листового металла, из стеклоткани на эпоксидной смоле. В последнем случае имеется возможность, если это нужно, придать корпусу самую сложную форму. Кроме того, этот материал имеет малый коэффициент температурного расширения. Это благоприятно при резких перепадах температур. Возможны и круглые трубы из стеклоткани или бумаги на эпоксидной смоле или из металла. Внутри корпуса важно установить несколько тонких диафрагм. Их назначение — сре-

зять свет, отраженный от стенок камеры, к тому же они придают дополнительную жесткость корпусу. Форма диафрагм около объектива круглая, а около кассеты — прямоугольник. Промежуточные диафрагмы — прямоугольники с закругленными углами.

Крупные камеры устанавливаются не на телескопе, а самостоятельно на отдельной монтировке (рис. 142). Они снабжаются небольшим гидом обычно диаметром от 50 до 100 мм. Монтировки могут двигаться по прямому восхождению вручную или часовым приводом, который может быть устроен как обычно. Но так как фокусное расстояние астрографа относительно мало, а абберационное пятно объектива велико, можно вести инструмент небольшими толчками. В двойном 200-миллиметровом астрографе на базе объективов «Уран-12» клуба им. Д. Д. Максудова Б. Смертин сконструировал простое приспособление. В основе — генератор импульсов для детского конструктора-часов. Генератор дает один импульс в секунду. Сигнал усиливается, а напряжение поднимается до 12 В. Этот импульс подается на реле с храповым механизмом. В результате редуктор движется скачками. Но это не страшно, так как, во-первых, деформации деталей механизма приводят к сглаживанию толчков, а во-вторых, даже при большой жесткости механизма за 1 с камера «смещается» на $15''$. В 500-миллиметровом фокусе камер это соответствует 0,036 мм. Это меньше, чем пятно рассеяния объектива «Уран-12». Кроме того, только 0,5 секунды камера неподвижна, а на толчок уходит тоже 0,5 секунды.

Простой умножитель частоты заставляет работать храповое устройство с частотой 2 толчка в секунду. Это нужно для коррекции хода, если звезду надо «догнать». В противном случае генератор отключается от реле, механизм на несколько секунд останавливается, и звезда «догоняет» перекрестие гида за счет суточного движения неба. Подобное устройство независимо предложено и построено А. С. Курцманом для 250-миллиметрового рефлектора Кассегрена. Там генератор подает 5 импульсов в секунду [47].

§ 6. ОКУЛЯРНАЯ КАМЕРА

Фокусное расстояние обычного телескопа слишком мало, чтобы с его помощью можно было фотографировать детали поверхности Луны и планет. Например, диаметр Юпитера в фокусе одного из телескопов автора ($f=960$ мм) равен 0,17—0,23 мм. На таком негативе ничего нельзя рассмотреть.

В то же время яркость Луны и планет достаточна для того, чтобы тем или иным способом увеличить эквивалентное фокусное расстояние, не беспокоясь за падение относительного отверстия.

Существует несколько способов увеличить эквивалентное фокусное расстояние (рис. 143). Во-первых, можно воспользоваться выпуклым кассегреневским зеркалом с большим фактором увеличения (см. § 1 главы третьей).

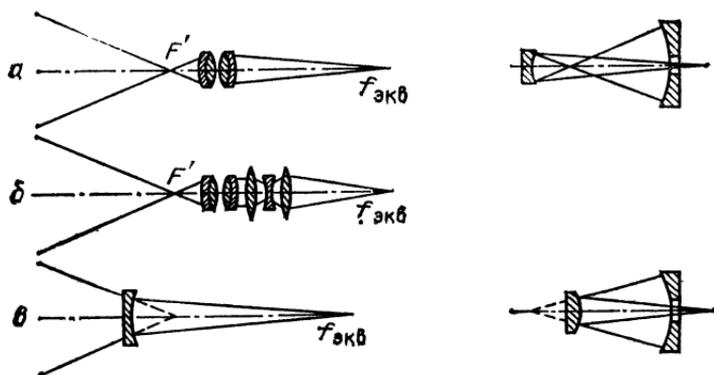


Рис. 143. Способы увеличения фокусного расстояния телескопа: *а* — проекционный объектив, *б* — к окуляру приставлен объектив фотоаппарата, *в* — линза Барлоу

Нередко телескоп снабжается несколькими кассегреневскими зеркалами с различными факторами увеличения. Для лунно-планетной фотографии обычно выбирают относительное отверстие в пределах от $1/50$ до $1/120$.

Более простой, но не менее эффективный способ заключается в применении линзы Барлоу. Несколько меняя расстояние между главным зеркалом и линзой Барлоу, можно изменить в больших пределах фокусное расстояние системы (см. § 4 главы первой).

В-третьих, можно использовать то, что из окуляра визуального телескопа выходит параллельный пучок света. Значит, расположив сразу за окуляром малоформатный фотоаппарат со штатным объективом, сфокусированным на бесконечность, мы получим на пленке резкое изображение объекта. Фотоаппарат крепится к трубе с помощью кронштейна или устанавливается на отдельном штативе. В последнем случае вибрации от работы затвора и зеркала зеркальных камер практически сводятся к нулю. Увеличение фокусного расстояния штатного объектива пропорционально

увеличению телескопа с выбранным окуляром $f_{экр} = f_{фот} \times \Gamma_{тел}$. Например, съемка ведется фотоаппаратом «Зенит» с объективом «Гелиос-44» ($f=58$ мм) с помощью телескопа, имеющего увеличение $100\times$. Эквивалентное фокусное расстояние равно $f=58 \times 100=5800$ мм. Диаметр Юпитера в



Рис. 144. Окулярная камера: *а* — разрез трубки предназначен для затвора-заслонки из черной бумаги или картона, *б* — электро-механический затвор на базе электромагнита от реле, *в* — окулярная камера для фотографирования солнечной фотосферы (телескоп Ньютона установлен на монтировке Холкомба — см. рис. 49, *а* первого издания книги), *г* — окулярная камера, построенная автором; справа видны объектив камеры и электро-механический затвор; для того, чтобы сделать видимыми внутренние детали, применена двойная экспозиция

этом случае будет равен 1,0—1,4 мм в зависимости от его видимых угловых размеров. Печатая негатив с 15-кратным увеличением, можно получить изображения диаметром

15—20 мм. Эквивалентное относительное отверстие вычисляем делением выходного зрачка телескопа с выбранным увеличением на фокусное расстояние объектива фотоаппарата. Предположим, что диаметр зеркала телескопа равен 180 мм. Тогда в предыдущем примере выходной зрачок равен $180 : 100 = 1,8$ мм, а относительное отверстие $A = 1,8 : 58 = 0,0031 = 1/32$. Учитывая большое число поверхностей окуляра и объектива, коэффициент пропускания нужно брать 0,5—0,6.

Еще один способ, самый распространенный. С помощью окуляра ($f = 10—20$ мм), микрообъектива ($8—20\times$) или кинообъектива ($f = 10—20$ мм) проецируем с увеличением изображение из главного фокуса в эквивалентный (см. рис. 147).

Не все окуляры годятся для окулярной проекции. Проецируя изображение волоска маленькой лампочки на стену, сравниваем качество изображения: наличие хроматизма (цветовая кайма), сферической аберрации (бесцветный туманный ореол), рассеяние на линзах (снижение общего контраста) и т. д., мы можем отобрать лучший окуляр или объектив.

Сотрясений телескопа от работы зеркала зеркальной камеры можно избежать, если применить отдельный затвор. В простейшем случае это заслонка из черной бумаги на пути лучей. Она устанавливается позади окуляра или проекционного объектива в районе выходного зрачка. В этом случае не происходит виньетирования (неравномерного освещения кадра). Заслонка вводится в специальную прорезь в трубке окулярной камеры. Можно поступить так: легкий затвор из толстой алюминиевой фольги укрепить на подвижной части небольшого электромагнитного реле на 6—12 В. Управляем затвором с помощью кнопки, включенной в сеть (рис. 144).

Подробнее об окулярной камере и о работе с ней можно прочесть в книге Л. Л. Сикорука и М. Р. Шпольского «Любительская астрофотография».

§ 7. ПРИЗМЕННАЯ КАМЕРА

Возможность получить спектры новых звезд, переменных звезд, комет, метеоров, солнечной хромосферы во время полных затмений очень заманчива. Во время подготовки к наблюдениям полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. в клубе им Д. Д. Максудова была построена призмная камера (рис. 145), с помощью которой был получен цветной спектр хромосферы.

Обычные астрографы призмных камер имеют сравнительно большое поле зрения: ведь главная особенность призмной камеры — возможность получения спектров сразу многих объектов. В любительской практике можно обойтись ради простоты и небольшим полем, чтобы получать спектры одного или двух-трех объектов. В нашем случае астрограф представляет собой ахромат визуальной трубы с фокусным расстоянием 300 мм и диаметром 50 мм.

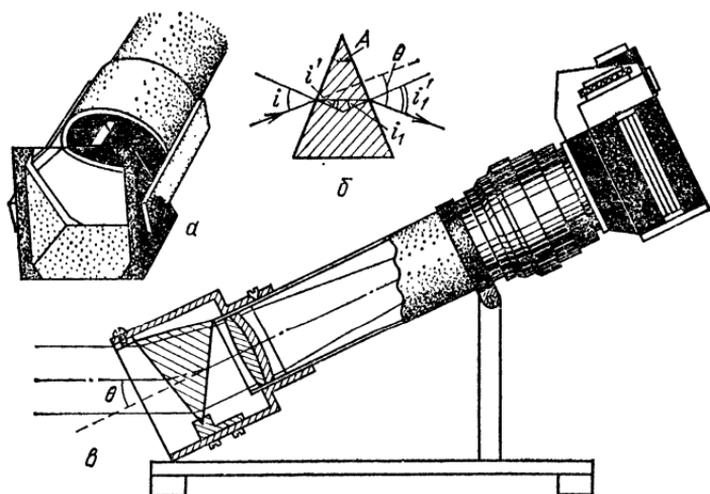


Рис. 145. Призмная камера: *а* — способ подвижного крепления призмы, *б* — преломления луча на призме, *в* — призмная камера, построенная новосибирским школьником А. Щербаковым

Он вставлен в алюминиевую трубку, на противоположном конце которой укреплено фокусирующее устройство объектива «Юпитер-9» с вынутым оптическим блоком.

Перед нашим объективом установлена призма Шмидта «ВкР-45» (см. рис. 69, *о*), но можно использовать любую призму с преломляющим углом $A=30-45^\circ$. Важно, чтобы она перекрывала действующее отверстие объектива.

Угол отклонения призмы равен

$$\theta = i_1 + i_2 + A,$$

где i_1 — угол падения лучей на первую поверхность, i_2 — угол преломления выходящего луча, A — угол при вершине призмы. Для снижения aberrаций, которые вносит призма, ее устанавливают под углом наименьшего отклонения. Это значит, что $i_1 = i_2$. Пользуясь формулой $i_1 = n \sin i$,

(см. § 1 главы первой) и помня, что в данном случае $i_1 = i_2$, мы легко вычислим угол отклонения призмы. В наших расчетах нужно брать n для среднего участка спектра, например для линии D .

Угол наименьшего отклонения можно определить и практически. На какой-нибудь простой подставке установим призму боковой (матовой) гранью. Направим на нее солнечный луч от окна с помощью маленького зеркальца размером 1—2 см и будем наблюдать спектр на белом экране на расстоянии 2—3 м от призмы. Поворачивая призму вокруг ее вертикальной оси, добьемся, чтобы преломленные лучи отклонялись менее всего.

Призменная камера устанавливается на телескопе под углом θ к его оси. Основание призмы должно быть параллельным суточной параллели, а плоскость рабочего угла A призмы должна располагаться вдоль круга скоплений. Иными словами, если астрограф направлен на звезду над точкой юга, то основание призмы горизонтально, а дисперсия (направление, вдоль которого вытянут спектр) направлена вертикально.

Звезды — точки, и спектры вытягиваются в волосяные нити, на которых ничего нельзя рассмотреть. Для удобства обработки спектров их нужно расширить на негативе хотя бы до 0,3—0,5 мм. Для этого спектр снимают без часового привода неподвижным телескопом. Тогда изображение спектра «ползет» по пленке в направлении, перпендикулярном дисперсии. Скорость этого перемещения равна

$$v = f' \operatorname{tg} 15'' \cos \delta = 7 \cdot 10^{-3} f' \cos \delta \text{ [мм/с]},$$

где f' — фокусное расстояние астрографа (камеры), δ — склонение звезды.

Достаточно направить астрограф с призмой на Вегу или Сириус, закрепить его, открыть затвор на 15—20 с, и на пленке чувствительностью 320 ед. ГОСТ получится спектр. Но это самые яркие звезды неба. Для более слабых придется увеличить время экспонирования.

В этом случае поступаем так. Устанавливаем призмную камеру на звезду. Приводим звезду на перекрестие гида. Открываем затвор и даем при неработающем часовом механизме смещаться звезде. Время такого прогона определим, разделив нужную нам ширину спектра на скорость перемещения звезды (точнее ее спектра) на эмульсии. Для нашего астрографа и звезды вблизи экватора оно составляет примерно 20 с. Через 20 с с помощью ключей тонких движений по прямому восхождению возвращаем изобра-

жение звезды на перекрестие и даем звезде снова дрейфовать по эмульсии. Число таких прогонов может достигать десятков и зависит от блеска звезд, спектры которых нужно получить. Так, на пленке 320 ед. ГОСТ нашему астрографу с объективной призмой нужен один прогон для того, чтобы получить спектры звезд -1^m . Для звезд 0^m нужны три прогона, для звезд 1^m-9 и т. д. Каждая последующая по блеску звезда требует увеличения числа прогонов в три раза.

§ 8. КОРОНОГРАФ ЛИО *)

Полные солнечные затмения так редки, а желание ежедневно наблюдать протуберанцы так велико, что за рубежом многие любители строят специальные телескопы-коронаграфы по схеме французского астронома Лио. Корона слишком слаба, чтобы ее наблюдать на этих любительских инструментах, но протуберанцы видны очень хорошо. К сожалению, у нас в стране любители практически не строят коронаграфы.

Яркость хромосферы и протуберанцев примерно равна 10 тыс. кд/м², а яркость ореола вокруг Солнца в среднем около 1 млн кд/м², хотя она и меняется в очень больших пределах. Ясно, что просто заслонив рукой солнечный диск, протуберанцев не увидишь. Но есть благоприятное обстоятельство. Ореол рассеивает весь спектр солнечного света от 380,0 до 700,0 нм. Диапазон составляет 320,0 нм. Протуберанец же, как и вся хромосфера, светится в видимой части спектра только в четырех узких линиях водорода, из которых самая яркая H_{α} содержит примерно половину всей энергии излучения (рис. 146, а). Она самая яркая. Значит, если подобрать узкополосный светофильтр с полушириной пропускания, скажем, 1,0 нм, то яркость излучения протуберанца уменьшится вдвое, а ореола в $320,0 : 1,0 = 320$ раз. Ореол ослабнет в 320 раз, а протуберанец только в 2 раза. Яркость протуберанца по отношению к ореолу возрастает в 160 раз. Видимая яркость протуберанца станет 5000 кд/м², а ореола — 3000 кд/м². Протуберанец будет хорошо заметен на фоне неба.

В дни с особо чистым небом ореол слабее, и можно применять фильтры с полушириной пропускания 10,0—15,0 нм. Если же полуширина полосы пропускания мала, как, на-

*) О солнечных телескопах для наблюдений в белом свете см. [11, 56].

пример, у коронографа клуба им. Д. Д. Максудова 0,6 нм, то протуберанцы видны даже за кучевыми облаками, пока солнечный диск хоть немного просвечивает!

Простейшее устройство для наблюдений протуберанцев изображено на рис. 150, б. В фокусе окуляра устанавливается непрозрачный экран — искусственная луна. Перед

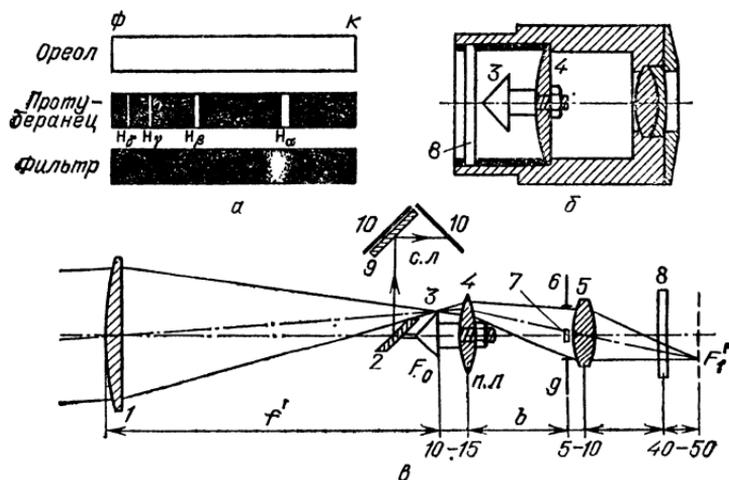


Рис. 146. Протуберанец-телескоп по схеме коронографа Лию: а — спектры солнечного ореола, протуберанца и полоса пропускания интерференционного фильтра, б — окуляр для наблюдений протуберанцев, 1 — коронограф Лию; 1 — объектив, 2 — диагональное зеркало, 3 — искусственная луна, 4 — линза поля, 5 — объектив переноса изображения, 6 — диафрагма, 7 — непрозрачный экранчик, 8 — интерференционный светофильтр, 9 — серый фильтр, 10 — черный бархат

ним размещается интерференционный светофильтр с полусириной пропускания 5 нм или меньше. Диаметр искусственной луны получается умножением фокусного расстояния телескопа на тангенс видимого углового диаметра Солнца. Значение этого диаметра (точнее радиуса) можно взять в таблице «Физические эфемериды Солнца, Луны, Марса, Юпитера и Сатурна» в переменной части «Астрономического календаря». В декабре — январе диаметр равен 32'36", в марте и сентябре 32'19", в июне — июле уменьшается до 31'30". Тангенсы этих углов равны 0,00948, 0,00940 и 0,00916. Для телескопа с фокусным расстоянием 2000 мм диаметры «зимней» и «летней» «луны» равны 19,0 мм и 18,3 мм. В действительности диаметры берут на 2 % больше, чтобы солнечный диск перекрывался с небольшим

ванасом. Тогда в нашем случае диаметры будут равны 19,4 и 18,7 мм. Для небольших телескопов можно остановиться на «зимнем» диаметре и обойтись одной искусственной луной.

Находясь в непосредственной близости от фокуса телескопа, интерференционный фильтр может перегреться и расслоиться или даже лопнуть. Можно задиафрагмировать телескоп, но тогда снизится разрешающая способность телескопа. Можно перед объективом поместить отполированный с оптической точностью «черный» фильтр, но лучше перед интерференционным фильтром установить призму Гершеля (рис. 67, с), которая пропустит более 90 % света и только 7—8 % попадает на фильтр.

Описанный окуляр хорош для визуальных наблюдений, но не годится для фотографирования, так как в фокальной плоскости, где расположена «луна», нельзя разместить фотопластинку. Усложним конструкцию (рис. 146, в). За «луной» и полевой линзой на оптической оси установим дополнительную линзу или объектив, который переносит изображение и «луны» и протуберанцев в общую плоскость. Здесь устанавливается или фотопластинка или окуляр. Ясно, что этот объектив переноса изображения не что иное, как проекционный объектив окулярной камеры. Масштаб чаще всего выбирается 1 : 1, но может быть и другим; например, у малого 80-миллиметрового коронографа клуба им. Д. Д. Максудова масштаб при переносе 1 : 3. Это вызвано малым масштабом изображения Солнца в фокусе школьного 80-миллиметрового рефрактора. При фокусном расстоянии 800 мм диаметр искусственной луны 7,4 мм. После переноса диаметр солнечного изображения и искусственной луны будет 22 мм. Это хороший диаметр для фотографирования на формате 24 × 36 мм. Одновременно относительное отверстие меняется с 1/10 до 1/30, а эквивалентное фокусное расстояние — до 2400 мм.

Для того, чтобы поле зрения было освещено равномерно, нужно, чтобы изображение объектива телескопа, построенное полевой линзой, лежало в непосредственной близости от объектива переноса. Для этого фокусное расстояние полевой линзы должно быть равно

$$f_1 = \frac{f'b}{f' + b},$$

где f' — фокусное расстояние объектива, a — расстояние между полевой линзой и объективом переноса с другой стороны, расстояние b определяется фокусным расстояни-

ем объектива переноса и масштабом в эквивалентном фокусе,

$$f_2 = \frac{m}{m+1} b \text{ или } b = \frac{m+1}{m} f_2,$$

где f_2 — фокусное расстояние объектива переноса, а m — масштаб. Если он равен 1, то b вдвое больше фокусного расстояния.

В плоскости изображения объектива телескопа объективом переноса устанавливается диафрагма, назначение которой — срезать лучи дифракции на главном объективе, которые засвечивают изображение. Для этого диафрагма «прикрывается» и тем больше, чем выше нужен контраст изображения.

Чтобы снизить отражение света от стенок трубы, устанавливается серия диафрагм. Стенки трубы желательно покрыть нетвердеющим вязким лаком. На него оседает пыль. Часто, чтобы сократить общую длину коронографа, сразу за полевой линзой устанавливают две призмы, которые поворачивают ход лучей на 180° (рис. 147).

Так как наблюдения с коронографом ведутся в монохроматическом свете, то главный объектив коронографа может быть одиночной линзой. Чтобы свести к минимуму сферическую aberrацию, желательно, чтобы линза была близка к плоско-выпуклой. Выпуклая ее сторона должна быть обращена к небу. Для снижения комы и астигматизма важно, чтобы применялись линзы с малыми относительными отверстиями. Таким образом вполне возможно весь коронограф сделать из одиночных линз. Особое внимание нужно уделить чистоте поверхностей главного объектива. Малейшая пыль или царапины при наблюдении Солнца дают огромное количество рассеянного света, который засвечивает не очень яркое и малоконтрастное изображение протуберанцев. Такой же чистой должна быть полевая линза, хотя требования к точности ее поверхностей невысоки. Объектив переноса должен быть достаточно точным, но пыль и мелкие дефекты на его поверхностях не слишком мешают. В результате отражений на обеих поверхностях в центре объектива получается яркий блик, видимый со стороны окуляра и засвечивающий изображение. Поэтому в центре диафрагмы около объектива переноса устанавливают небольшой непрозрачный экран, который перекрывает изображение этого блика в выходном зрачке.

В заключение несколько подробностей. Чтобы в выходном зрачке не собиралось слишком много света, нужно, чтобы он был сравнительно большим. Для этого b выби-

рается от $1/4f$ до $1/2f$. Край искусственной луны должен быть без зазубрин и других дефектов, которые будут перенесены вместе с изображением протуберанцев в эквивалентную фокальную плоскость. Для этого «луну» можно отполировать на токарном станке с большой скоростью с помощью

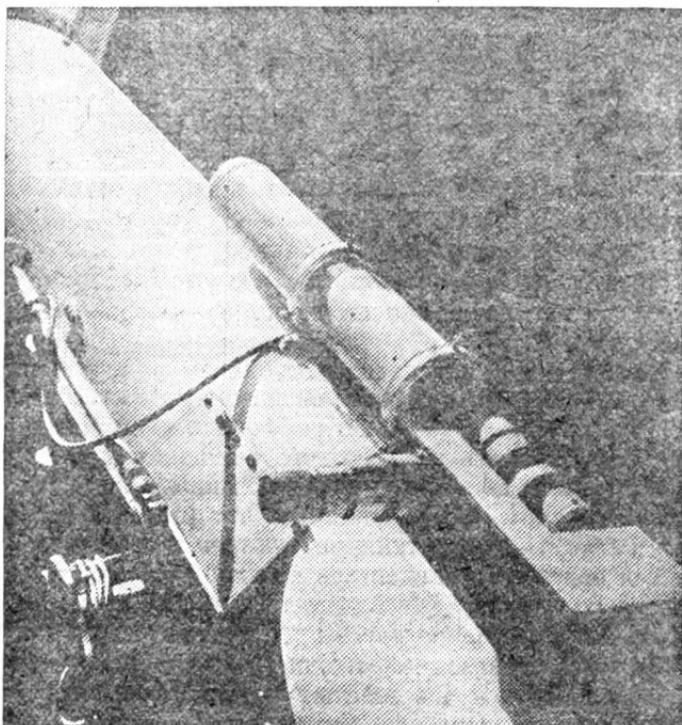


Рис. 147. 80-миллиметровый коронограф, построенный в клубе им. Д. Д. Максудова. Основой коронографа служит 80-миллиметровый школьный рефрактор, эквивалентное фокусное расстояние инструмента 2400 мм. Слева виден окуляр Эрфле с фокусным расстоянием 27 мм, который дает увеличение $90\times$ и поле $43'$ (коронограф установлен на трубе 315-миллиметрового рефлектора)

пасты ГОИ. Для того, чтобы «луна» не перегревалась, перед ней устанавливается диагональное зеркало, диаметр которого немного меньше диаметра «луны». Его качество неважно. Основная часть света отражается в сторону, в отверстие в стенке трубы. Там располагается световой лабиринт: под углом 45° устанавливается темно-серый свето-

фильтр, сзади него — черный бархат. Отраженные 7—8 % света также улавливаются экраном из черного бархата.

Коронграф должен иметь два механизма фокусировки. Один из них перемещает искусственную луну (можно вместе с полевой линзой) вдоль оси для совмещения «луны» с изображением солнечного лимба. Второй механизм фокусирует суммарное изображение в эквивалентной фокальной плоскости.

§ 9. ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Вопросам механики любители до сих пор уделяют очень мало внимания. Проблема рациональной конструкции телескопа оказалась настолько запутанной, а попытки ее решить настолько драматическими, что у нас в стране образовалось два лагеря, и многие оказались «по разные стороны баррикад».

За 40 лет занятий телескопостроением я не раз оказывался то в одном, то в другом лагере. В первом из них полагают, что любитель не может работать в мастерской, и телескоп нужно делать из того, что подвернется под руку. Слова столетней давности, принадлежащие лорду Россу — «столяр и слесарь могут выполнить эту работу с достаточной точностью» — начертаны на знамени этого лагеря, и я готов был под ними подписаться в конце сороковых, начале пятидесятих годов.

Технические решения здесь просто чудовищны. Ступица автомобильного колеса вместо оправы главного зеркала, труба из теса, оси — два толстых шурупа, и все это приводится в движение фантастическим приводом, состоящим из капельницы и шнурка. Нужно ли говорить, какие разочарования приходилось испытывать автору телескопа, пожелавшему взглянуть на небо. Помню, как руководитель астрономического кружка Новосибирской станции юных техников С. С. Войнов в 1962 г. в сердцах сказал: «любительский телескоп — это барахло!» и заказал для своей обсерватории 130-миллиметровый фабричный телескоп АВР-3, который получил... через 13 лет, когда работал уже в другом месте!

Позже я бросился в объятья другого лагеря. Стальная труба со стенками 5—8 мм, ее длина 1,5—2 м, так как сферическое зеркало сделать легче. Интуиция подсказывает, что от малейшего ветерка длинная труба будет трястись, как осиновый лист. Поэтому строим вилку с полярной осью,

которая покоится в подшипниках от железнодорожного вагона. Именно так выглядела полярная ось моего 315-миллиметрового рефлектора 17 лет назад. Когда я с гордостью рассказал об этом Н. Н. Михельсону, он мягко улыбнулся и спросил: «не многовато ли?» Это был приговор!

Болезнью строительства «монстрировок», как их в шутку назвал любитель телескопостроения и прекрасный киноактер А. Н. Болтнев, в разные годы переболел весь мир. Полвека назад Алан Керкэм в одном из писем писал: «Скорость и легкость, с которой некоторые любители собирают свои переносные телескопы, просто поразительны. Процедура обычно выглядит так: сначала мастер звонит полудюжине рослых членов своей группы, и вместе они вытаскивают с чердака или из сарая во двор груды хлама. Орудия разводными ключами, отверткой и кувалдой, они собирают деликатные узлы с такой скоростью и точностью, что, закончив, отваливаются запыхавшись. Но в это время все так устали, и уже так поздно, что не до наблюдений, и телескоп начинают немедленно разбирать».

Об этом же как-то говорил С. И. Сорин. Любители-горожане выезжают за город, монтируют, регулируют, юстируют свои телескопы, а когда через неделю — другую все готово, пора возвращаться в город. Из своего горького опыта добавлю, что по возвращении в город начинается самое грустное — ремонт разбитых в дороге телескопов.

Выход? Грамотно сконструированный 300- и даже 500-миллиметровые телескопы могут еще оставаться транспортабельными. И все-таки серьезному телескопу нужна постоянная обсерватория. Обсерватория — мечта каждого любителя астрономии, но довольно высокая ее стоимость и серьезные хлопоты по строительству многих отпугивают. Каждый решившийся на этот шаг, вынужден тщательно взвешивать все за и против, внимательно рассмотреть свои желания и практические возможности. Рассмотрим здесь несколько вариантов любительских обсерваторий от наиболее простых, доступных многим любителям, до сравнительно сложных и дорогих, доступных практически только кружкам и клубам.

Самое простое — это откидывающийся (рис. 148) или откатывающийся чехол. Первый снабжен противовесами, чтобы облегчить откидывание, второй — роликами, которые катятся по рельсам. Рельсы желательно поднимать над уровнем земли на 20—30 см, чтобы зимой снег не засыпал их. Металлический чехол позволяет спрятать телескоп от непогоды и вандалов.

Желание создать некоторый комфорт и уют во время наблюдений вынуждает многих любителей строить павильон с откатывающейся или откидывающейся крышей (рис. 149, 150). Здесь можно разместить многочисленные принадлежности к телескопу, карты неба, Луны, астрономический

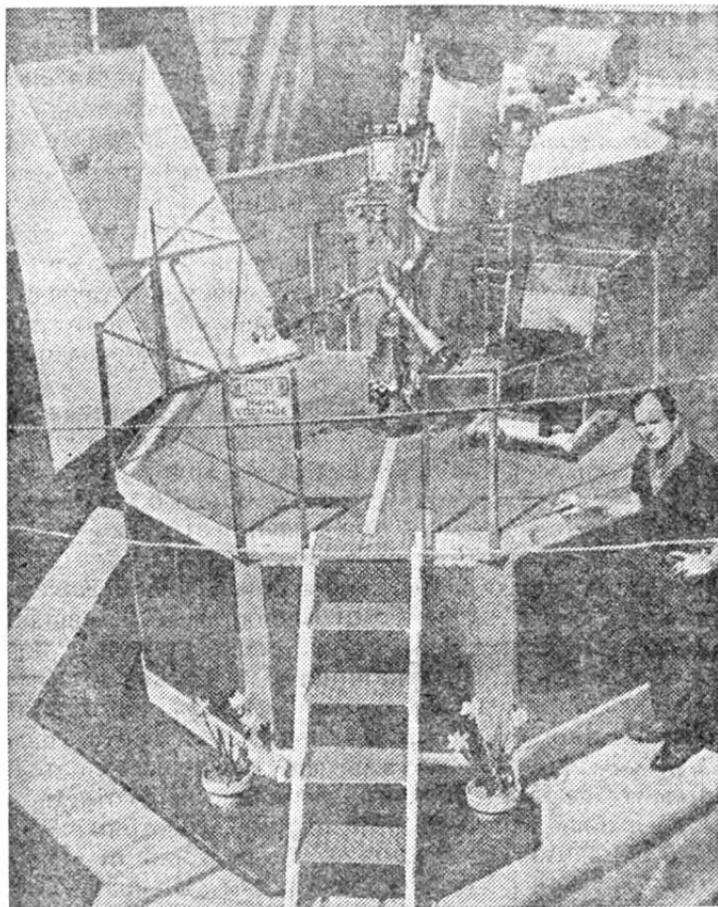


Рис. 148. Металлический чехол для укрытия телескопа

календарь и справочную литературу. Откатные крыши устанавливаются на четырех роликах, которые катятся по швеллеру, уложенному горизонтально желобом вверх. Диаметр роликов желательно брать большим — $80 \div 120$ мм. Это нужно для плавного хода. Хороши обрезиненные ролики. На концах рельсов обязательны ограничители — упоры,

чтобы предотвратить скатывание и падение крыши. Стены павильона могут быть сделаны из дерева, кирпича, бетона, металла

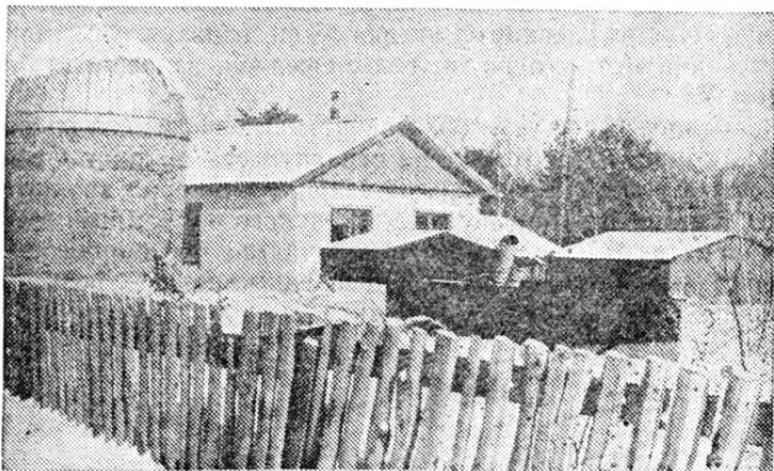


Рис. 149. Любительская обсерватория Горн. Справа павильон клуба им. Д. Д. МаксUTOва, слева башня, построенная автором

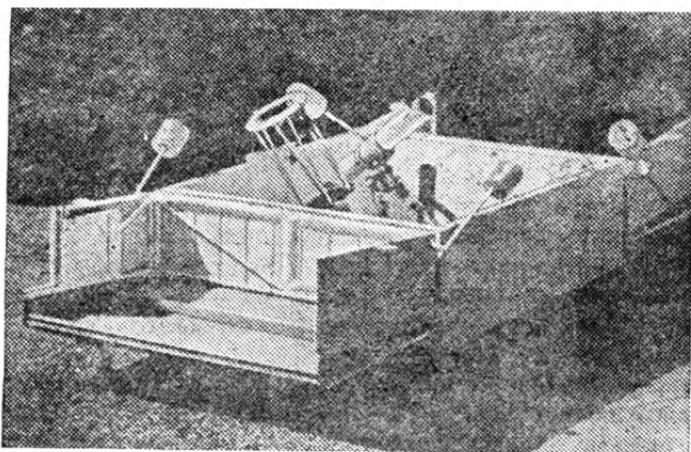


Рис. 150. Откидная крыша павильона

Кирпичная кладка стен ведется с перевязкой швов. По углам через 3—4 ряда желательно укладывать арматуру из проволоки диаметром 5—8 мм с концами длиной по 50—100 см. Хороший материал для стен — бетон и шлакобетон.

Павильон клуба им. Д. Д. Максутова сделан полностью из 1,5-миллиметрового стального листа на каркасе из уголка № 40 (рис. 151). За 16 часов он сварен в городе и смонтирован в селе за 4 часа. Свисающий конец рельса опирается на укосину из уголка № 40, образуя кронштейн, на конце этот уголок и рельс-швеллер закреплены болтом М8.

Вскоре после установки павильона одна из его половинок крыши из-за отсутствия ограничителя на концах рельсов скатилась. Падая, крыша ударилась о концы кронштейна, срезав болты М8. К счастью, никого под крышей в этот момент не было... Сейчас ограничители представляют собой обрезки уголка № 40, укрепленные поперек рельса на конце.

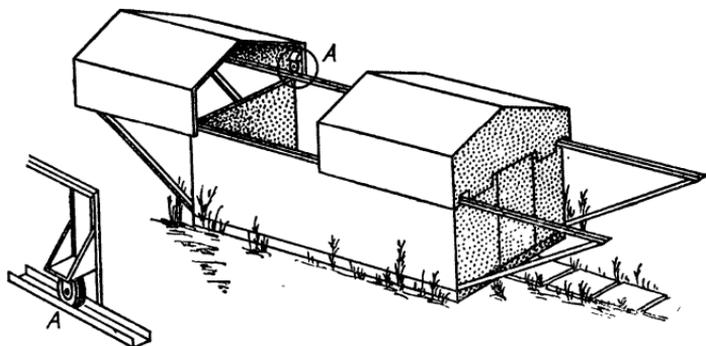


Рис. 151. Откатывающаяся крыша павильона. Обсерватория клуба им. Д. Д. Максутова

Достоинство павильона — малая стоимость и большой обзор. Он удобен для установки астрографов, кометоискателей, метеорных патрулей. Для того, чтобы стены павильона не закрывали небо у горизонта, инструменты устанавливаются как можно выше, чтобы только не задевали крышу.

Нужно обязательно позаботиться о шторм-захватах, удерживающих крышу при ураганных ветрах. Отсутствие шторм-захватов на павильоне обсерватории клуба юных техников (КЮТ) Сибирского отделения АН СССР привело к тому, что во время шторма крышу сбросило с высоты третьего этажа. К счастью, никто не пострадал.

Очень удобен купол. Он закрывает телескоп от порывов ветра и вибраций, защищает глаза наблюдателя от слепящего света близлежащих огней. Конечно, он не может снизить общую засветку неба, но защитить глаза может.

Верхняя поворотная часть не обязательно должна иметь форму купола. Иногда это цилиндры, перекрытые слегка впадушенной кровлей, как это было у большого рефрактора Пулковской обсерватории до Великой отечественной войны, иногда — конус, как это сделано у коронографа обсерватории Сакраменто Пик в США (рис. 152). Такая форма не позволяет скапливаться снегу на ней.

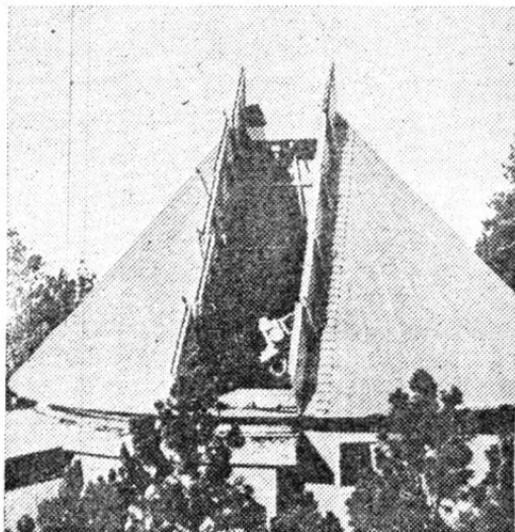


Рис. 152. Конический «купол» обсерватории Сакраменто Пик. В башне укрывается коронограф этой солнечной обсерватории

Башня вместе с куполом может поворачиваться у самого основания, как это было сделано в 1962 г. на обсерватории СЮТ в Новосибирске, или так, как это показано, например, на рис. 153.

Сферический купол любительской обсерватории автора показан на рис. 154. Купол построен В. А. Угодниковым еще в начале 60-х годов и подарен позже автору. Его каркас сделан из реек толщиной 10 мм и шириной 50 мм. Ребра каркаса склеены из шести реек каждое. Ребра сгибались между вкопанными столбиками и смазывались клеем. Прежде чем клей высохал, они сбивались через 20—30 см мелкими гвоздями. Стыки реек в каждом ряду вразбежку со стыками в других рядах. Каркас обшит обрешеткой из дощечек толщиной 20 и шириной 100 мм. Кровля из кровельной стали по обрешетке. Купол диаметром 3,5 м весит не

более 300 кг. На основании купола шурупами закреплен рельс, который представляет собой швеллер № 60. Он согнут в железнодорожном депо и не отклоняется от окружности и от плоскости более чем на 5—8 мм.

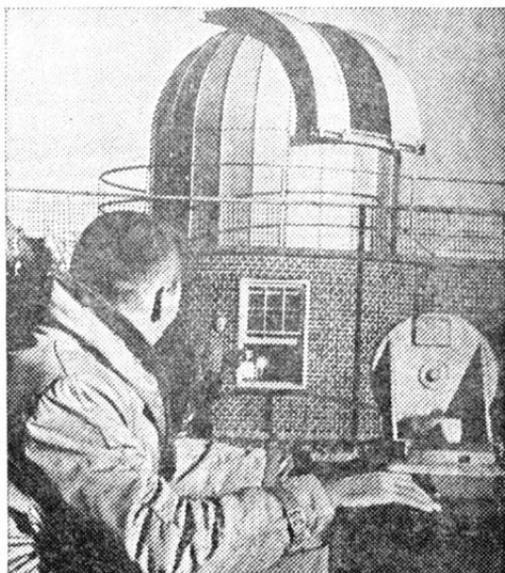


Рис. 153. Башня, поворачивающаяся у основания. На первом плане главное зеркало простейшего солнечного телескопа. См. рис. 79 первого издания книги

Ребра купола могут быть сделаны из теса. Тес сколачивается (лучше со столярным клеем) в два ряда и обрезается по шаблону. Так делаются купола многих фирм, в том числе фирмы Карл Цейс.

Часто купол делают сварным из стали. Ребра изгибаются из 10—16-миллиметровой арматурной стали или тонких труб. Брать больший диаметр прутка или больший номер уголка для каркаса не нужно, так как сваренная из 1,5—2-миллиметровой листовой стали оболочка сама по себе достаточно прочна и жестка. Только основание оболочки и периметр люка должны быть сделаны из более толстых стержней.

В наше время часто купол делают из пластмассы — стеклоткани, склеенной эпоксидной смолой. На специально приготовленной форме размером с одну дольку выклеиваются последовательно все доли, из которых будет собран

купол. После того, как они готовы, их склеивают между собой. Основание купола и периметр люка должны быть усилены согнутыми стержнями.

Люк закрывается шторками на шарнирах (рис. 152), забралом (рис. 155) или откатывающимися створками

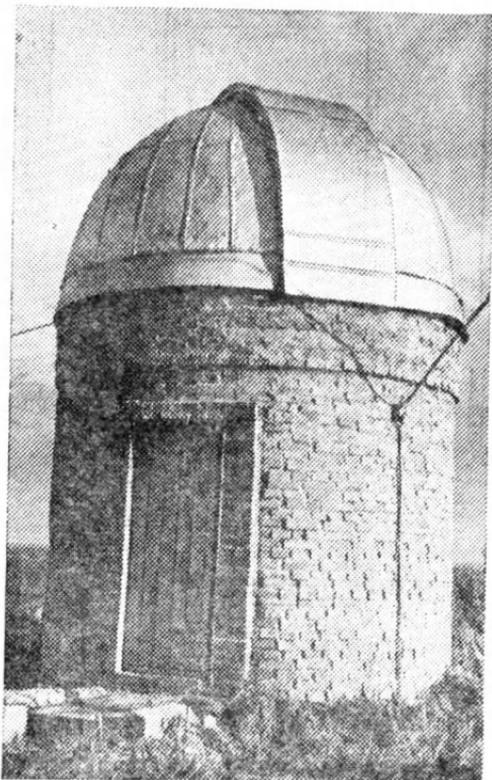


Рис. 154. Забрало обсерватории автора

(рис. 153). Первое проще всего и к тому же позволяет открывать во время наблюдений только часть люка, предохраняя телескоп от порывов ветра, а глаза наблюдателя от постороннего света

Забрала любительских обсерваторий поднимаются и опускаются вручную. Это обычно согнутый из алюминиевого уголка № 30—50 каркас, на который наклепан лист алюминия толщиной 1,5—2 мм (рис. 154 и 155, г). Каркас движется по «рельсам», согнутым из алюминиевого уголка

несколько большего номера, чем каркас забрала. Люк купола охватывает дугу от горизонта и несколько дальше зенита, т. е. более 90° . Откатить его полностью не удастся, так как тыльная сторона купола получается менее 90° .

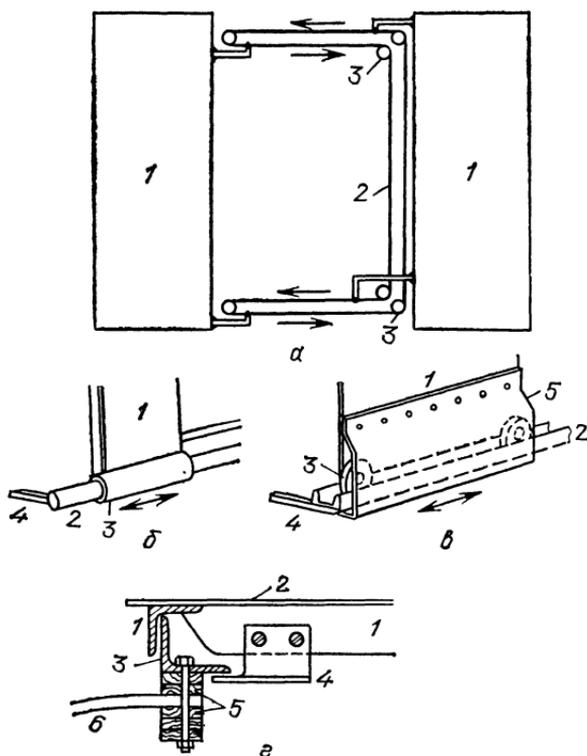


Рис. 155. Конструкция створок и забрала: а — створки; 1 — створки, 2 — тросик, 3 — ролики; б — 1 — створка, 2 — направляющая труба, 3 — труба, скользящая по направляющей, 4 — кронштейн, крепящий направляющую к куполу; в — 1 — створка, 2 — направляющий швеллер, 3 — ролики, 4 — кронштейн, 5 — козырек; г — 1 — каркас забрала, 2 — обшивка забрала, 3 — направляющая в виде уголка, 4 — шторм-захват, 5 — каркас купола, 6 — купол

Поэтому обычно делают две неравные половинки забрала. Меньшая устанавливается внизу, а большая сверху. Это удобно еще и потому, что каждая половинка легче целого и поднимать их проще, а кроме того, открывая только половину люка, мы защищаем телескоп от ветра и наблюдателя от света.

Откатные шторы сдвигаются в стороны от люка по прямолинейным направляющим (рис. 155, а). Это могут быть уголок, швеллер (рис. 155, в), труба (рис. 155, б). Одна из направляющих вверху, вторая внизу. Недостаток откатных шторок в том, что при попытке их отодвинуть они слегка перекашиваются и заклинивают. Чтобы этого избежать, приходится верхний и нижний концы шторки связывать тросами. Чем шире шторка, тем меньше она заклинивает. Поэтому у малых куполов диаметром 3—4 м часто делают одну шторку большой ширины.

Ролики, на которых катится шторка, должны двигаться легко. Их следует устанавливать на шариковых подшипниках и выбирать как можно больший диаметр. Хорошо, если ролики обрезинены, тогда они катятся без грохота.

Особое внимание нужно уделить роликам, по которым катится купол. Все, что сказано только что о роликах шторок, относится в еще большей степени к роликам купола. Их диаметр должен быть 80—120 мм и даже больше. Ролики должны иметь реборды или можно установить несколько дополнительных роликов, которые не дадут куполу скатиться в сторону (рис. 156).

В сильный ураганный ветер купол может сорвать с башни. Поэтому следует предусмотреть шторм-захваты. Это достаточно прочные стержни, установленные на анкерах, заделанных в стену башни. Верхний конец шторм-захвата

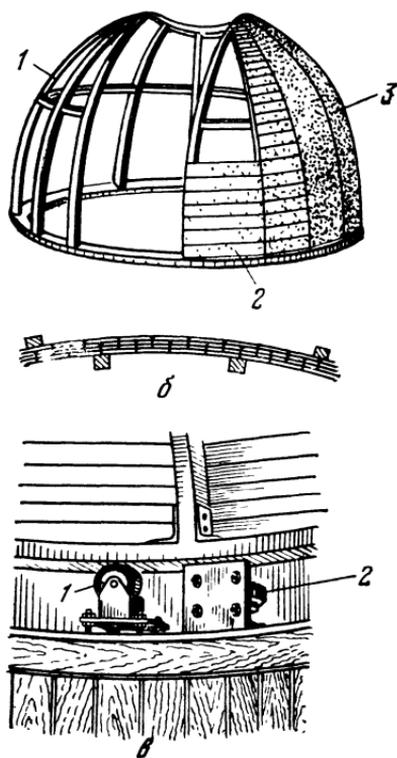


Рис. 156. Купол любительской обсерватории: а — конструкция; 1 — каркас, 2 — деревянная обрешетка, 3 — обшивка кровельной сталью; б — сгибание реек каркаса со склеиванием и сбиванием мелкими гвоздями; в — механизм поворота; 1 — обрезиненный опорный ролик, 2 — обрезиненный радиальный ролик

загнут с таким расчетом, чтобы, не мешая движению рельса, он в то же время мог зацепиться за полку швеллера или рельса, когда купол приподнимается ветром.

Можно поступить иначе: жестко укрепить на нижнем поясе купола 16—20-миллиметровые штыри и после окончания работы с помощью цепей закреплять штыри к горизонтальным анкерам в стене башни.

Каждая обсерватория должна иметь хоть небольшое отапливаемое помещение на случай наблюдений в холодную погоду.

Для большой любительской обсерватории нужен класс, где проводятся теоретические занятия, подготовка к наблюдениям и обработка результатов наблюдений. Обычно площадь этой комнаты 20—50 м². При проектировании народных обсерваторий и обсерваторий дворцов пионеров и клубов юных техников часто забывают о комнате отдыха наблюдателей, где наблюдатели могут отдохнуть остаток ночи после наблюдений. Она снабжена небольшой кухней-нишей, где можно подогреть ужин, вскипятить кофе. Если установить откидные кровати, то комнату отдыха и классную комнату можно объединить.

В век фотографии любая обсерватория должна иметь небольшую фотолабораторию. В городских обсерваториях там можно обрабатывать негативы и печатать с них фотографии. В загородной обсерватории можно оборудовать маленькую отапливаемую комнату для зарядки пластинок и пленки и проявления и сушки негативов.

Очень желательно иметь небольшую мастерскую. В городской обсерватории здесь может работать кружок телескопостроения, а в загородной можно сделать текущий ремонт или изготовить небольшие приспособления для телескопа.

Очень соблазнительно совместить башню (или павильон) с отапливаемым помещением в единый комплекс. Опыт детской обсерватории Новосибирской станции юных техников, спроектированной автором и построенной в 1962 г. под руководством С. С. Войнова, показал, что это не лучшее решение. Дело в том, что зимой отапливаемое помещение излучает тепло и нагревает близлежащие слои воздуха. От этого башни окружены сильно волнующимся воздухом, который портит изображение.

Лучше всего башню установить подальше от теплого помещения, как это сделано на обсерватории автора и клуба им. Д. Д. МаксUTOва. Если это невозможно, например, когда башня строится на крыше отапливаемого здания, то

ее нужно устанавливать с той стороны здания, откуда преимущественно дуют ветры. В Новосибирске это юго-западная часть здания. Тогда теплый воздух сносится ветром на северо-восток и не мешает наблюдениям.

Рассмотрим конкретную обсерваторию в поселке Горн, построенную автором и Новосибирским городским дворцом пионеров.

Обсерватория представляет собой комплекс небольших зданий на площади 600 м². Кроме теплого дома площадью 32 м², построена башня 315-миллиметрового рефлектора Ньютона с камерами Райта (260 мм) и Шмидта (140 мм), укрепленными параллельно главному телескопу. На той же трубе установлен коронограф. Барабан башни сложен из кирпича на фундаменте из бутового камня (рис. 156).

Верхний пояс башни бетонный. В него залиты 10-миллиметровые вертикальные анкеры с резьбой для крепления роликов с ребордами. Диаметр роликов 80 мм. Купол поворачивает один мальчик 10—12 лет вручную. Забрало состоит из двух частей. Оно описано раньше. Поднимается забрало рукой, а наверху — с помощью легкого шеста. Возвращается с помощью прочного капронового шнура, привязанного к задней части верхней половины. Хотя забрало движется по рельсам с некоторым трением и произвольно не падает, все-таки лучше предусмотреть несложное приспособление, которое позволяло бы его фиксировать в любом положении.

Фундамент телескопа — столб размером 100×80 см в нижней части и 70×70 в верхней. Выложен он из бутового камня. Балки пола первого и второго этажей заложены в кладку, и по ним уложен настил из половой рейки. Лестница и небольшой люк позволяют подниматься на второй этаж.

Ниже первого этажа имеется подвальное помещение размером 1,5×2 м. Оно предназначено для фокуса проектируемого солнечного вертикального телескопа.

Южнее башни установлен павильон с откатной крышей размером 3,6×2,4 м. Высота стен 1,4 м. Крыша состоит из двух половин, раздвигаемых на юг и север. Ролики обрешеченные, диаметром 130 мм. Крыша сдвигается очень легко и практически бесшумно.

В этом павильоне, принадлежащем Новосибирскому дворцу пионеров, установлены 150-миллиметровый рефлектор и 200/500-миллиметровый двойной астрограф на базе аэрообъектива «Уран-12». Благодаря универсальности монтажных приспособлений могут также устанавливаться 140-миллиметровая

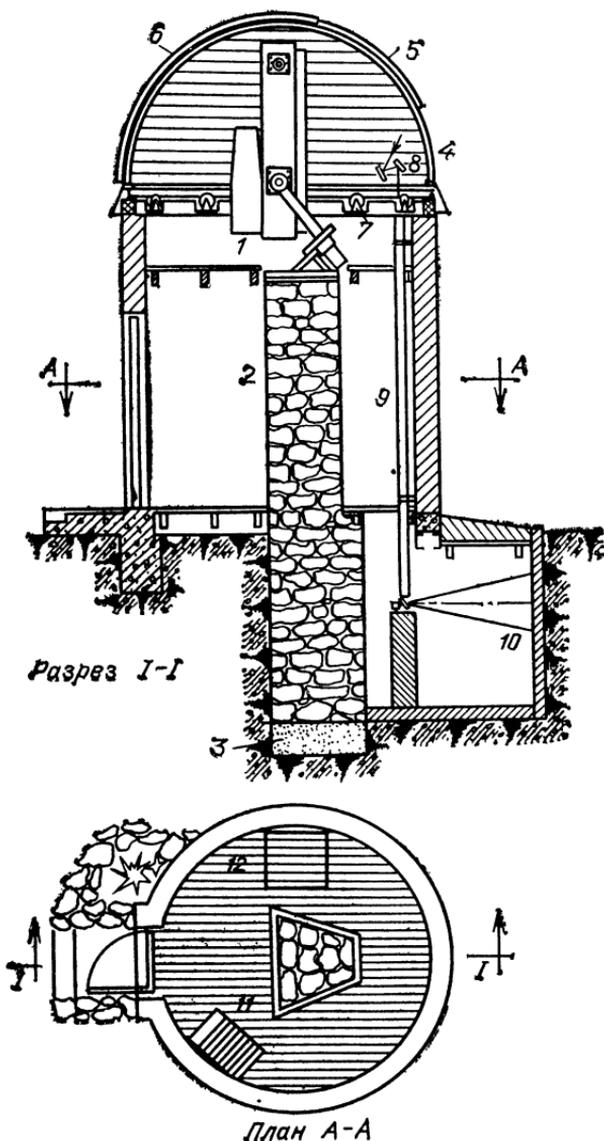


Рис. 157. Разрез башни обсерватории автора: 1 — телескоп, 2 — фундамент, 3 — песчаная подушка, 4 — купол, 5 — искривленный уголок, по которому движется забрало, 6 — забрало, 7 — ролики, по которым катится купол, 8 — целостат проектируемого солнечного телескопа, 9 — вертикальный солнечный телескоп, 10 — экран, 11 — лестница, 12 — люк в подвал солнечного телескопа

камера Шмидта, 47/210-миллиметровый астрограф, «олл-скай»-камера и т. п.

Наконец, на чердаке теплого дома предполагается устроить небольшое помещение для кометоискателя. В крыше будет вырезано отверстие размером $1,4 \times 1,4$ м, которое будет закрываться двумя алюминиевыми створками на шарнирах. Фундамент 250-миллиметрового рефлектора кометоискателя опирается на капитальную стену дома. Так как кометоискатели используются, как правило, с небольшим увеличением, теплые потоки воздуха зимой практически не мешают наблюдениям.

Село Горн, где расположена обсерватория, находится в 100 км от Новосибирска, так что городская засветка исключена. Правда, когда воздух по ночам содержит немного тумана, становится видно небольшое зарево от железнодорожных станций в 3 и 15 км от обсерватории. Ясными осенними ночами автору удается визуально наблюдать не только спиральные рукава туманности Андромеды, но и такие трудные для наблюдений объекты как диффузная туманность Сеть в Лебеде, туманность вокруг звезды Меропы в Плеядах и т. п. Приводимые фотографии, полученные на обсерватории Горн, показывают, что и на равнине на широте 56° в Сибири небо бывает достаточно прозрачным и темным.

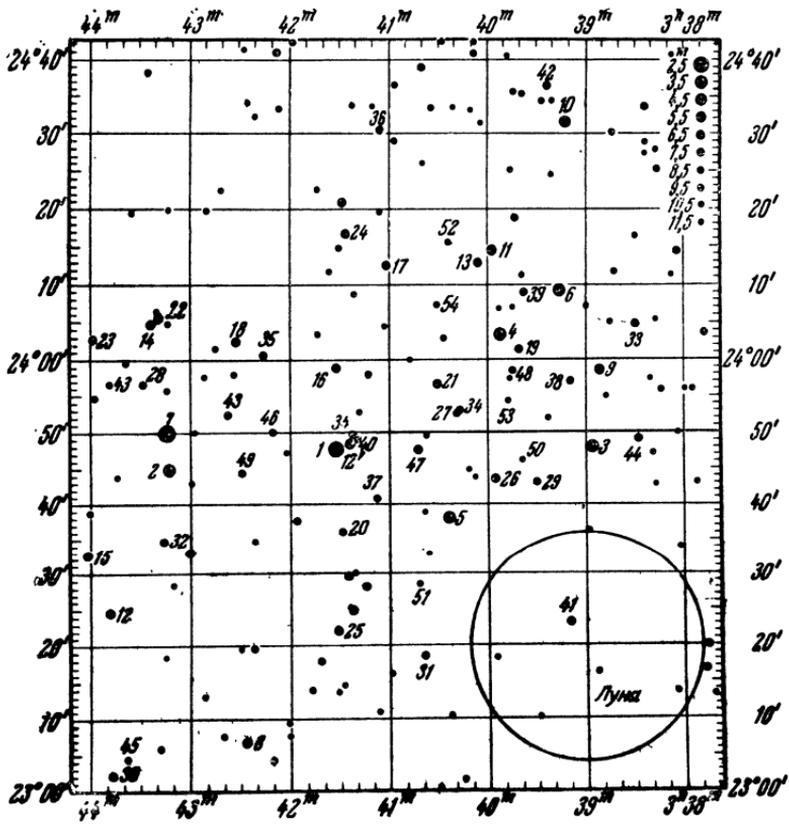
В 1947 г. десятилетним мальчиком, увидев в книге Г. Дмитрова и Д. Бэкера «Телескопы и принадлежности к ним» фотографию строительства любительской обсерватории в Спрингфилде (США), я был потрясен и решил построить со временем свою обсерваторию. Это случилось лишь 37 лет спустя.

Пользуюсь случаем, чтобы выразить благодарность моим друзьям, нашедшим силы и время для того, чтобы помочь мне реализовать мечту детства: известному актеру театра и кино А. Н. Болтневу, инженерам В. А. Прохорову, Г. М. Трейсману, музыкальному работнику А. А. Трейсман, врачу Г. П. Савельеву, школьникам В. Семину, А. Савельеву, С. Макарову, С. Кулакову, В. Васильченко, К. Севрюкову, особенно же моей жене, кандидату медицинских наук Л. Т. Киселевой.

Желаю и вам, дорогой читатель, преодолеть все препятствия и успешно завершить строительство вашего телескопа. Дорогой осилит идущий.

П Р И Л О Ж Е Н И Е
ВИЗУАЛЬНЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ
И СПЕКТРЫ ЧЛЕНОВ СКОПЛЕНИЯ ПЛЕЯД

Номер по карте	Звездная величина	Спектр	Номер по карте	Звездная величина	Спектр
1	2,87	B7III	28	7,97	A2
2	3,64	B8III	29	8,04	A2
3	3,71	B6III	30	8,10	A3
4	3,88	B7III	31	8,11	A0
5	4,18	B6IV	32	8,12	A0
6	4,31	B6V	33	8,17	A5
7	5,09	B8	34	8,25	A3
8	5,45	B8V	35	8,27	A6
9	5,46	B7IV	36	8,28	A4
10	5,65	B8V	37	8,37	A4
11	5,76	B8V	38	8,58	A3
12	6,16	B9V	39	8,60	A6
12	6,29	A0	40	8,69	F5
13	6,43	B9V	41	8,95	F0
14	6,60	A0	42	8,99	F1
15	6,74	A0	43	9,05	F6
16	6,81	B9	44	9,07	F0
17	6,82	B9V	45	9,10	F4
18	6,95	A0	46	9,25	F5
19	7,18	A0	47	9,29	F4
20	7,26	A0	48	9,45	F2
21	7,35	A0	49	10,02	F9
22	7,52	A1	50	10,13	F9
23	7,54	A1	51	10,20	G0
24	7,66	A2	52	10,42	G0
25	7,77	A1	53	10,55	G0
26	7,85	A1	54	11,34	F9
27	7,96	A4			



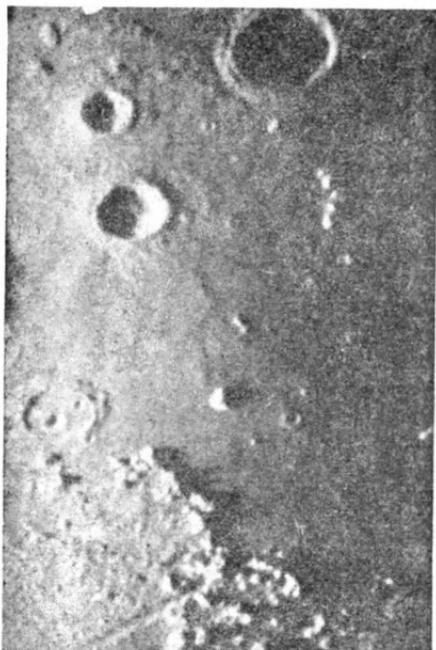


Фото I. Участок лунной поверхности в районе Моря Дождей. Снимок на 315-миллиметровом рефлекторе Ньютона (фото III), $f=2080$ мм, с окулярной камерой (рис. 144, з) при относительном отверстии $1/80$ и $f'=25$ м. Пленка «ФОТО-130», $t=0,5$ с. Снимок автора

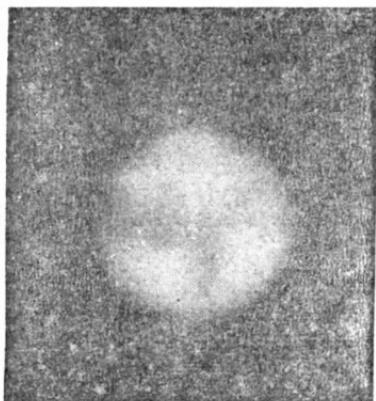


Фото II. Марс в эпоху Великого прогнвостояния. 315-миллиметровый рефлектор с окулярной камерой с $A=1/80$, $f'=25$ м, $t=0,5$ с. Снимок автора 18.10.1988

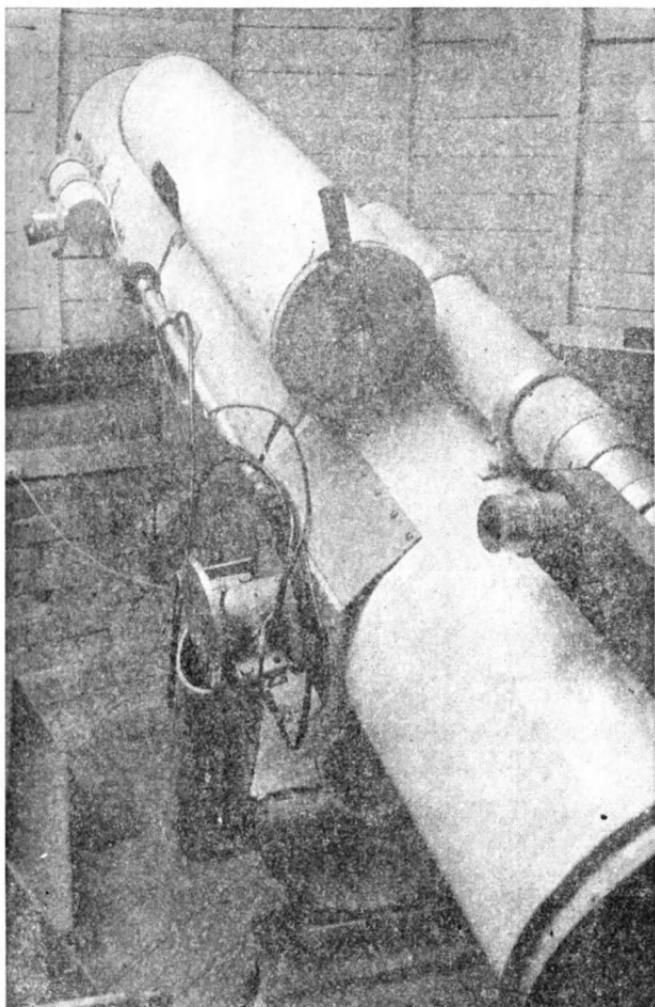


Фото III. 315-миллиметровый рефлектор Ньютона. Телескоп установлен в башне обсерватории автора в поселке Горн под Новосибирском. На трубе телескопа установлена 140-миллиметровая камера Шмидта, справа 80-миллиметровый коронограф с окуляром, дающим увеличение $90\times$

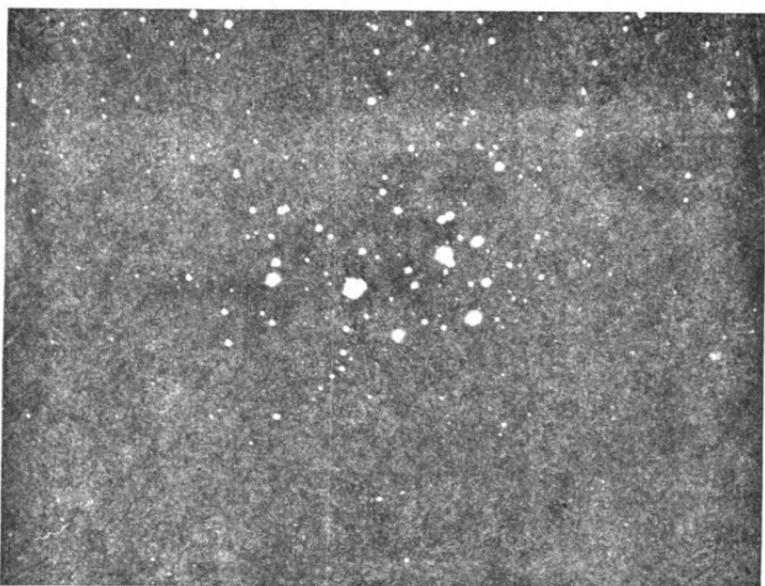


Фото IV. Рассеянное скопление Плеяды, М 45. Снимок на 140-миллиметровой камере Шмидта с фокусным расстоянием 384 мм. Диаметр поля 54 мм (8°). Диаметр изображений слабых звезд на негативе 0,03 мм. Пленка «ФОТО-130», $t=10$ мин



Фото V. Плеяды, М 45. 150-миллиметровый рефлектор, снимок в ньютоновском фокусе. Пленка «А-500», $t=40$ мин



Фото VI. Большая туманность Орiona, М 42 и М 43. 150-миллиметровый рефлектор, $1/6,4$. Пленка «А-500», $t=40$ мин. Фото автора

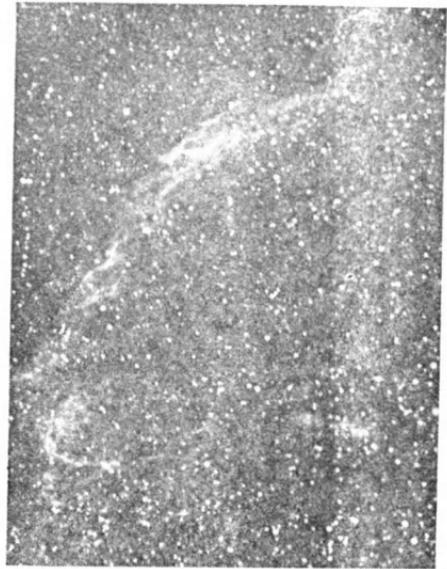


Фото VII. Диффузная туманность «Рыбачья Сеть» в созвездии Лебедя. 150-миллиметровый рефлектор, пленка «А-500», $t=60$ мин. Снимок автора

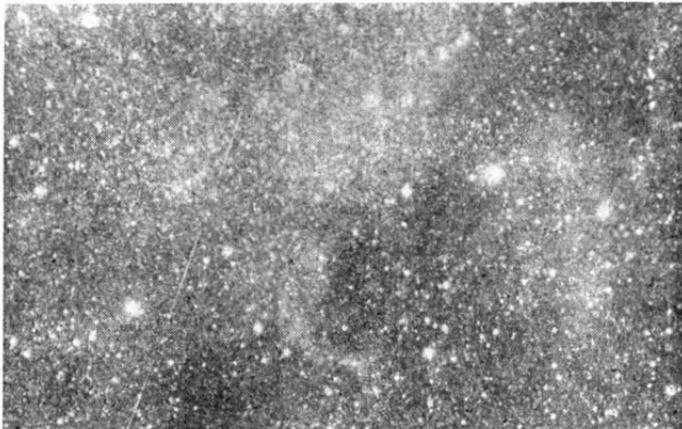


Фото VIII. Туманность «Северная Америка», NGC 7000 в созвездии Лебедя. «Таир-3», $f=300$ мм, $A=1/4,5$. Пленка «Фото-130», $t=60$ мин, Снимок автора

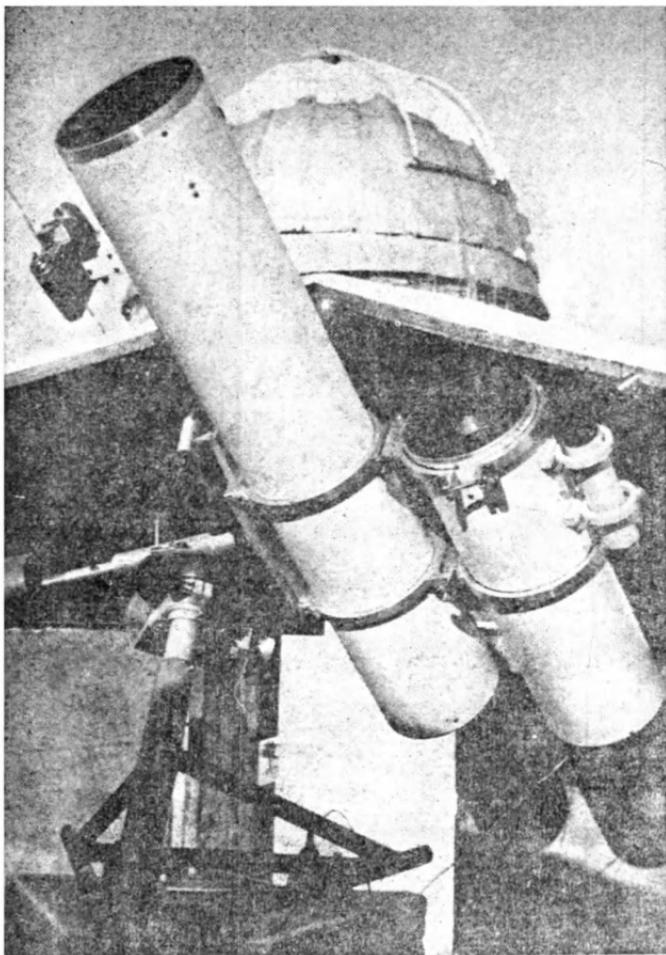


Фото IX. Двойной 150-миллиметровый рефлексор Ньютона, построенный школьником А. Савельевым в течение трех лет. Телескоп имеет тонкие движения, часовой привод, обе трубы могут поворачиваться вокруг своих оптических осей для установки окуляров в удобное положение. Телескоп установлен в павильоне обсерватории Горн. В глубине видна башня 315-миллиметрового рефлексора



Фото X. Галактика «Водоворот», М 51 в созвездии Гончих Псов.
150/1050-миллиметровый рефлектор. Пленка «А-500», $t=40$ мин.
Снимок А. Савельева



Фото XI. «Архипелаг» галактик М 81 и М 82 («Взрывающаяся»)
150/1050-миллиметровый рефлектор. Пленка «А-500», $t=60$ мин.



Фото XII. Протуберанец в августе 1988 г. 80-миллиметровый коронограф на базе школьного рефрактора с фокусным расстоянием 800 мм. Эквивалентное фокусное расстояние 2400 мм

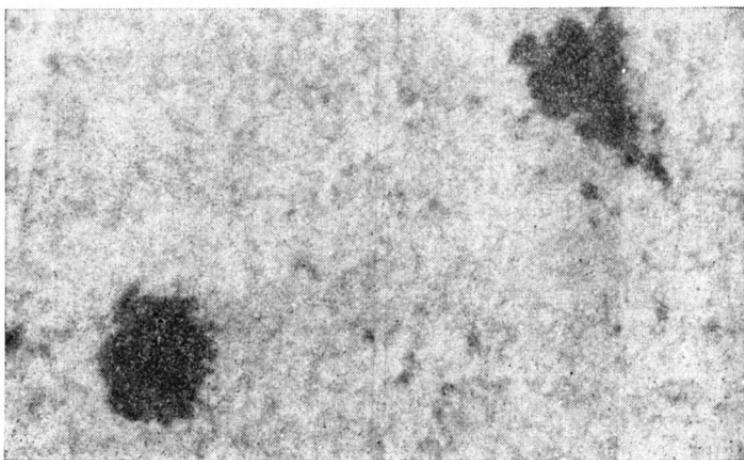


Фото XIII. Пример фотографии солнечной грануляции, полученной Ф. Рувье (Франция) на 210-миллиметровом рефлекторе

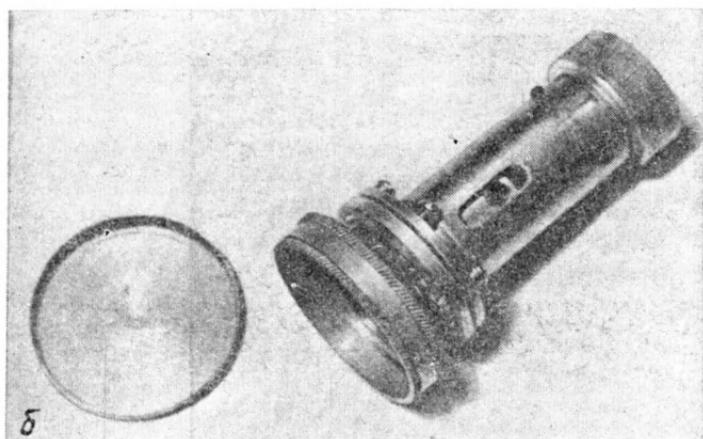
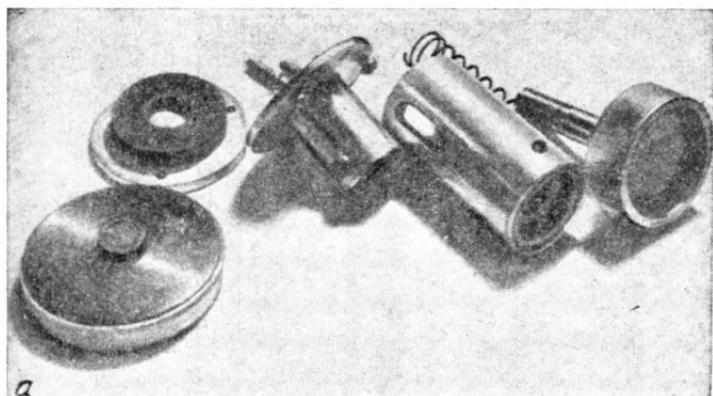


Фото XIV. Детали фокусирующего узла и кассета 140-миллиметровой камеры Шмидта (а), узел в сборке, кассета установлена на место (б)



Фото XV. Полярный телескоп О. Кнэба (США). На первом плане - плоское 250-миллиметровое зеркало. Вверху окулярная часть, расположенная в помещении

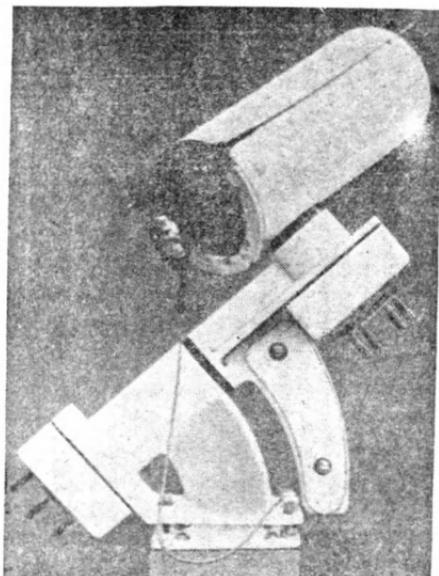


Фото XVI. Модификация монтировки Босиана — Мейнела. 300-миллиметровый рефлектор Кассегрена

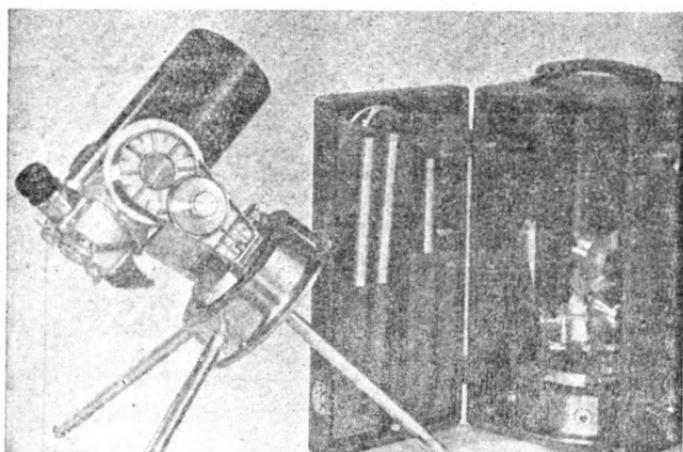


Фото XVII. Популярный серийный телескоп «Куэстар-3,5» — 80-миллиметровый менсковый телескоп, $f=800$ мм. Часовой привод, кофр для переноски. Выпускается также 170-миллиметровый аналог (США)

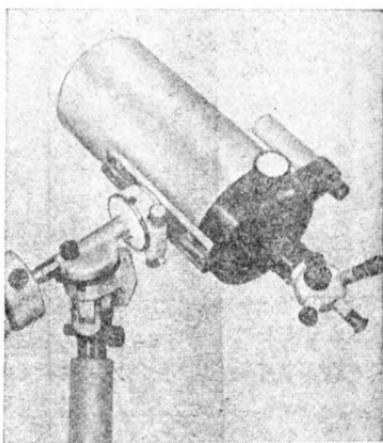
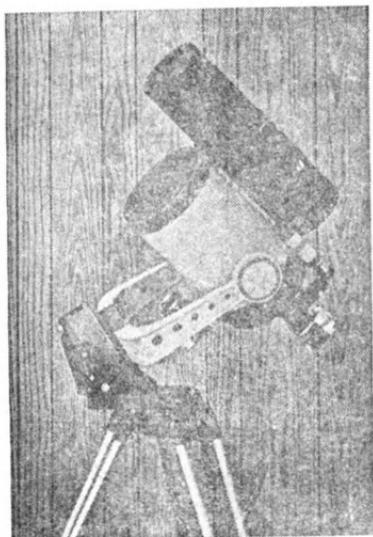


Фото XVIII. Популярный 203-миллиметровый телескоп системы Шмидта — Кассегрена «Силестрон». На телескопе укреплена 127-миллиметровая камера Шмидта, $f=300$ мм. Выпускаются 127- и 360-миллиметровые аналоги системы Шмидта— Кассегрена и 200- и 300-миллиметровые камеры Шмидта (США)

Фото XIX. 180-миллиметровый менисковый телескоп Кассегрена «Меникас-180» (ГДР)

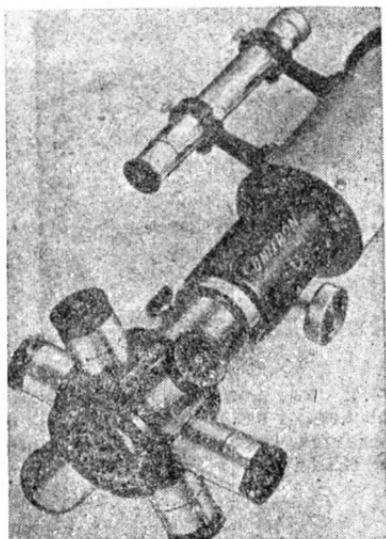


Фото XX. Револьверная головка окулярного узла телескопа-рефрактора «Юнитрон» (США)

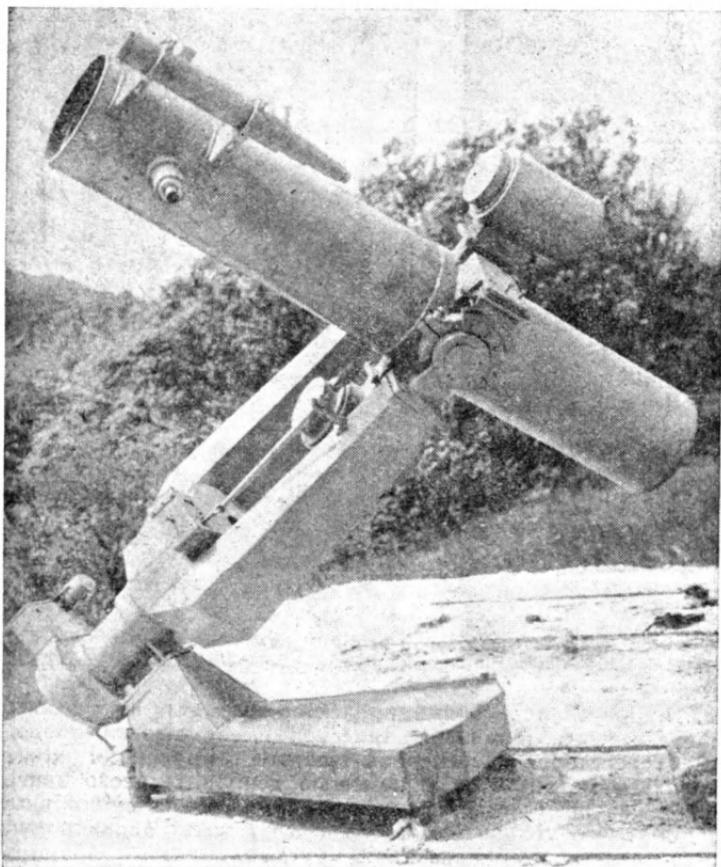


Фото XXI. 250-миллиметровый телескоп Ньютона, построенный в Баку под руководством С. И. Сорина. Обратите внимание на две червячные пары: одна для часового привода, вторая для гонки коррекции по прямому восхождению. На телескопе установлены два астрографа. Справа от телескопа откатывающийся павильон, рядом с базой монтировки видны рельсы

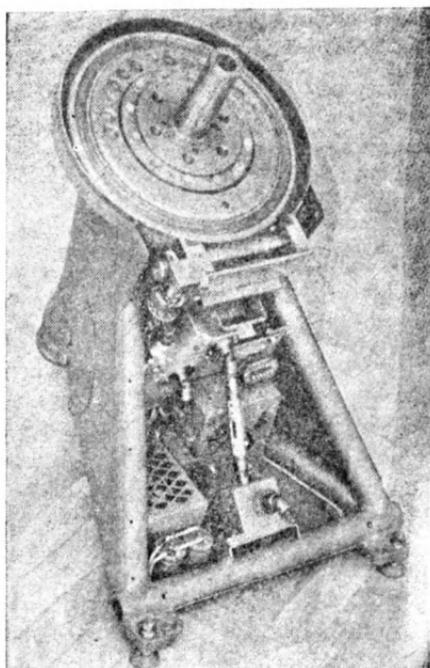
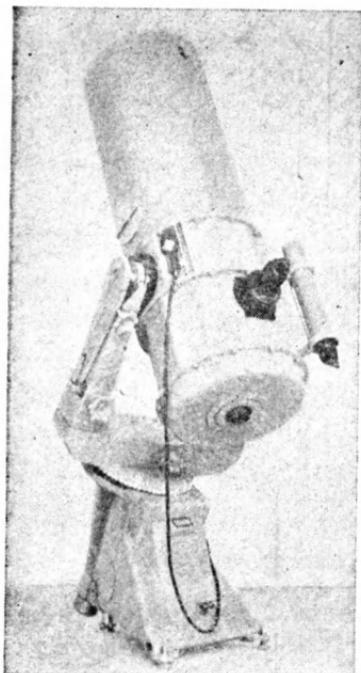


Фото XXII. 340-миллиметровый рефлексор Нэсмита, построенный в Ленинграде А. С. Фоминым. Телескоп имеет часовой привод, питаемый генератором переменной частоты. Коррекция может осуществляться механически с помощью дополнительного двигателя или изменением частоты тока, подаваемого на синхронный двигатель часового механизма. Часовой Круг имеет проекционное устройство, переносящее показания круга на матовый полупрозрачный экранчик, расположенный на базе монтировки ниже круга.

Фото XXIII. Основание монтировки 340-миллиметрового телескопа А. С. Фомина с размещенными в ней полярной осью и червячной парой, электромагнитным тормозом, выпрямителем, генератором частоты и часовым приводом, дифференциалом тонких движений. Управление ведется с выносного пульта, показанного на предыдущей фотографии

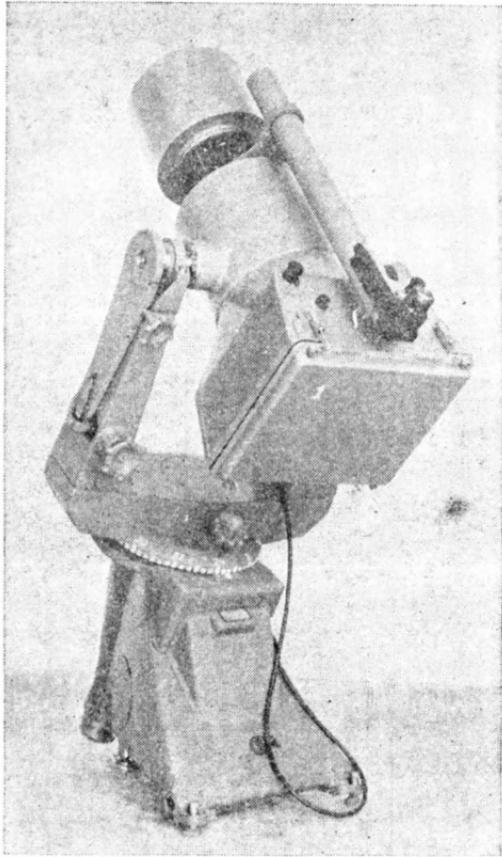


Фото XXIV. Широкоугольный астрограф, установленный на монтировке 340-миллиметрового рефлектора. Действующее отверстие объектива 200 мм, фокусное расстояние 753 мм

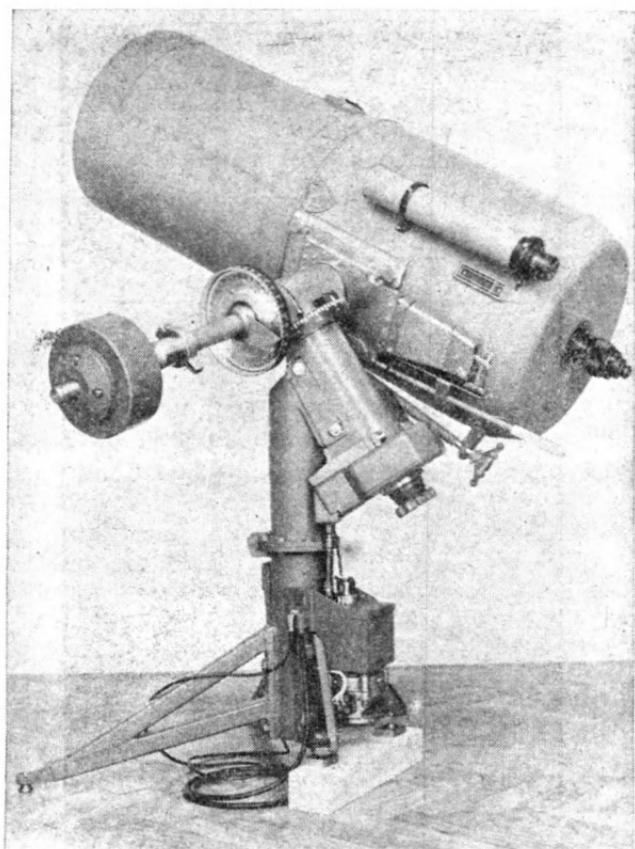


Фото XXV. 310-миллиметровый телескоп Ричи — Креггена, построенный А. С. Фоминим. Главное зеркало имеет относительное отверстие $1/3, 2$, $f=990$ мм, $f_{\text{экв}}=3173$ мм, $A_{\text{экв}}=1/10,2$. Телескоп может устанавливаться на фундаменте или временно на подоконнике. На снимке показан вариант для установки на окне: убрана средняя часть колонны, заменены лапы колонны. В нижней части корпуса колонны размещен редуктор часового привода и механизм тонких движений. Виден двигатель механизма коррекции по прямому восхождению

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михельсон Н. Н.* Оптические телескопы: Теория и конструкция.— М.: Наука, 1976
2. *Максудов Д. Д.* Астрономическая оптика.— М.; Л.: Наука, 1979.
3. *Максудов Д. Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики.— М.: Наука, 1984.
4. *Навашин М. С.* Телескоп астронома-любителя.— 4-е изд.— М.: Наука, 1979.
5. *Наумов Д. А.* Изготовление оптики для любительских телескопов-рефлекторов и ее контроль.— М.: Наука, 1988.
6. *Сикорук Л. Л.* Телескопы для любителей астрономии.— М.: Наука, 1982.
7. Любительское телескопостроение/Сост. М. М. Шемякин; Под ред. М. С. Навашина.— М.: Наука, 1964.
8. Любительское телескопостроение. Вып. 2/Сост. М. М. Шемякин; Под ред. М. С. Навашина.— М.: Наука, 1966.
9. Любительские телескопы/Под ред. М. М. Шемякина.— М.: Наука, 1975.
10. Телескопы/Под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхёрста, пер. с англ.— М.: ИЛ, 1963.
11. *Дмитров Г., Бэйкер Д.* Телескопы и принадлежности к ним: Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1947.
12. *Сулим А. В.* Производство оптических деталей, 2-е изд., дополн.— М.: Высшая школа, 1969.
13. *Белоросова Г. С., Максудов Д. Д., Соснина М. А., Мерман Н. В.* О расчете минископовых систем // Труды ГАО АН СССР, сер. П177, 1969.
14. *Мартинов Д. Я.* Курс практической астрофизики.— М.: Наука, 1977.
15. Amateur Telescope Making: Book one/Ed. A. Ingalls.— Scientific American Inc., 1957.
16. Amateur Telescope Making Advance: Book two/Ed. A. Ingalls.— Munn and Co. Inc., 1952.
17. Amateur Telescope Making: Book three/Ed. A. Ingalls.— Scientific American, Inc. 1953.
18. *Мельников О. А., Слюсарев Г. Г., Марков А. В., Купревич Н. Ф.* Современный телескоп.— М.: Наука, 1968.
19. *Куликовский П. Г.* Справочник астронома-любителя.— 4-е изд.— М.: Наука, 1971.
20. Астрономический календарь: Постоянная часть.— 6-е изд.— М.: Наука, 1973.

21. *Беззубов Д. О., Чарин А. Н., Ольхов Д. Н.* Использование алмазных паст для обработки зеркал // *Земля и Вселенная.* — 1987. — № 4.
22. *Mattewson G.* Constructing an Astronomical Telescope. — Blackie and Son limited, 1947.
23. *Гурков А. В.* История создания телескопа // *Историко-астрономические исследования: Вып. 7115.* — М.: Наука, 1980.
24. *Заруба Ю. Б.* Объектив «МТО-1000» — универсальный телескоп // *Земля и Вселенная.* — 1988. — № 5.
25. *Крылов А. Н.* Портативный телескоп // *Земля и Вселенная.* — 1981 — № 3.
26. *Купто П.* Наблюдение визуально-двойных звезд. — М.: ИЛ, 1982.
27. *Warner B. A* Fagotten 41-inch Refractor // *Sky and Telescope.* — 1975 — V. 50. — № 1.
28. *Стронг Дж.* Техника физического эксперимента. — Ленинградское газетно-журнальное и книжное издательство, 1948.
29. *Magee R.* Pinhole and Knife-Edge — How Far Apart // *Sky and Telescope.* — 1974. — V. 49. — № 3.
30. *Ashbrook I.* Leon Foucault's Heritage to Telescope Making // *Sky and Telescope.* — 1975. — V. 50. — № 1.
31. *Millies-Lacroix A.* A Graphical Approach to Foucault Test // *Sky and Telescope.* — 1976. — V. 51. — № 2.
32. *Мажуга А. В.* Точность измерений продольных аберраций // *Земля и Вселенная.* — 1988. — № 6.
33. *Воропин А. Т.* Графический метод проверки качества параболического зеркала // *Земля и Вселенная.* — 1988. — № 1.
34. *Щеглов П. В.* Проблемы оптической астрономии. — М.: Наука, 1980.
35. *Peters W., Pike R.* The Science of the Newtonian Diagonal // *Sky and Telescope.* — 1977. — V. 53. — № 3.
36. *Технология оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова.* — М.: Машиностроение, 1978.
37. *Наумов Д. А.* Изготовление 400-миллиметрового зеркала // *Земля и Вселенная.* — 1983. — № 2.
38. *Сикорук Л. Л.* Спрингфилдская монтировка (ответы на вопросы читателей) // *Земля и Вселенная.* — 1980. — № 3.
39. *Hamon A.* A Tangent Arm with a Specially cut Cam // *Sky and Telescope.* — 1974. — V. 48. — № 2.
40. *Fagen E.* Same Three Year Sidereal Drive Arrangement // *Sky and Telescope.* — 1967. — V. 34. — № 1.
41. *Richter J.* A Test for Figuring Cassegrain Secondary Mirrors // *Sky and Telescope.* — 1970. — V. 39. — № 1.
42. *Sheehan W.* Setting Circles Made at Home // *Sky and Telescope.* — 1974. — V. 48. — № 2.
43. *Tuthill R.* A Maksutov 11-inch of Newtonian Form // *Sky and Telescope.* — 1964. — V. 27. — № 3
44. *Sigler R.* A High-Performance Maksutov Telescope // *Sky and Telescope.* — 1975. — V. 50. — № 3.
45. *Tichenor C.* Note on Modern Telescope Mounting // *Sky and Telescope.* — 1968. — V. 35. — № 5.
46. *Калинников Н. Д.* Обсерватория Николаевского пединститута // *Земля и Вселенная.* — 1987. — № 2.
47. *Курицман А. С.* Электронно-механический привод телескопа // *Земля и Вселенная.* — 1987. — № 3.
48. *Сикорук Л. Л.* Новосибирский клуб им. Д. Д. Максудова // *Земля и Вселенная.* — 1981. — № 1.

49. *Александров С. Б.* Фотографирование небесных объектов // Земля и Вселенная.— 1983.— № 5.
50. *Сикорук Л. Л.* 150-миллиметровый телескоп-рефлектор // Земля и Вселенная.— 1986.— № 5.
51. *Гришин Ю. А.* Как мы наблюдаем Солнце // Земля и Вселенная.— 1980.— № 5.
52. *Савельев А. Г.* Все началось с «Алькора» // Земля и Вселенная.— 1988.— № 6.
53. *Бекяшев Р. Х.* 400-миллиметровый рефлектор Ньютона — Кассегрена // Земля и Вселенная.— 1989.— № 1.
54. Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов/Под ред. А. Хьюнта; пер. с англ.— М.: Мир, 1983.
55. *Чурюмов К. И.* Кометы и их наблюдения.— М.: Наука, 1980.
56. *Сикорук Л. Д., Шпольский М. Р.* Любительская астрофотография.— М.: Наука, 1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава первая. НЕМНОГО ТЕОРИИ	13
§ 1. Свет, оптические детали и характеристики систем	13
§ 2. Конические сечения. Поверхности вращения	19
§ 3. Как работает телескоп?	22
§ 4. Простейший телескоп.	24
§ 5. Аберрации	27
§ 6. Ахроматические линзы	33
§ 7. Идеальный объектив и тонкая структура изображения	34
§ 8. Разрешающая сила телескопа	40
§ 9. Предельные увеличения телескопа	42
§ 10. Эффективность телескопа.	44
§ 11. Типы телескопов	46
Глава вторая ГЛАВНОЕ ЗЕРКАЛО ТЕЛЕСКОПА-РЕФЛЕКТОРА	51
§ 1. Как мы будем действовать?	51
§ 2. Подробнее о точности главного зеркала	52
§ 3. Заготовка для зеркала	54
§ 4. Изготовление заготовки	56
§ 5. Как испытать заготовку на внутренние напряжения?	58
§ 6. Абразивные материалы	59
§ 7. Шлифовальные станки	63
§ 8. Шлифовальники	68
§ 9. Обдирка зеркала	75
§ 10. Шлифовка	80
§ 11. Объем стекла, снимаемый при шлифовке и полировке	83
§ 12. От чего зависит скорость шлифовки?	84
§ 13. Оценка качества матовой поверхности	86
§ 14. Как избежать царапин?	89
§ 15. Как изменить радиус кривизны?	91
§ 16. Когда заканчивать шлифовку?	92
§ 17. Как приготовить полировочную смолу?	92
§ 18. Как сделать полировальник?	93
§ 19. Полировка	99
§ 20. Что такое геновой метод Фуко?	102
§ 21. Что нужно приготовить для теневых испытаний?	106
§ 22. Предварительная тренировка	107

§ 23.	Теневое испытание	109
§ 24.	Фигуризация сферического зеркала	113
§ 25.	Общие замечания по фигуризации и теневым испытаниям	117
§ 26.	Параболическое зеркало	120
§ 27.	Контроль параболического зеркала по зонам	123
§ 28.	Как усовершенствовать теневой прибор?	126
§ 29.	Точность параболлизации зеркала	131
§ 30.	Графическая интерпретация метода Фуко	133
§ 31.	Вычисление реального профиля зеркала	136
§ 32.	Нуль-тесты для исследования асферических зеркал	139
§ 33.	Астигматизм	147
§ 34.	Об алюминировании и серебрении зеркал	150
Глава третья. ПЕРВЫЙ ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР		156
§ 1.	Телескоп Ньютона	156
§ 2.	Как подобрать диагональное зеркало или призму?	160
§ 3.	Как сделать диагональное зеркало?	163
§ 4.	Как подобрать окуляр?	167
§ 5.	Как сделать линзы для окуляра и линзу Барлоу?	174
Глава четвертая. СЛОЖНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ		180
§ 1.	Рефлекторы Грегори и Кассегрена	180
§ 2.	Изготовление оптики кассегреневских и грегорианских телескопов	183
§ 3.	Испытание вторичного зеркала Грегори	186
§ 4.	Испытание вторичных кассегреневских зеркал	187
§ 5.	Модификации телескопов Кассегрена	192
§ 6.	Камера Шмидта	198
§ 7.	Камера Райта	206
§ 8.	Менисковые телескопы Максудова	208
Глава пятая. МЕХАНИКА ТЕЛЕСКОПА		214
§ 1.	Небесная сфера и системы небесных координат	214
§ 2.	Кое-что о сопрямате	217
§ 3.	Нагрузки и деформации	218
§ 4.	Рациональные поперечные сечения	222
§ 5.	Типы монтировок	225
§ 6.	Как оценивать жесткость узлов монтировки?	230
§ 7.	Конструкция оправы главного зеркала	235
§ 8.	Оправа вспомогательного зеркала	239
§ 9.	Окулярный узел	242
§ 10.	Труба	246
§ 11.	Крепление узлов к трубе	256
§ 12.	Узлы простой монтировки	259
§ 13.	Крепление тяжелой трубы к оси склонений	262
§ 14.	Оси немецкой монтировки	263
§ 15.	Вилка и ее детали	267
§ 16.	Оси других монтировок	273
§ 17.	Тормоза и механизмы тонких движений	275
§ 18.	Механизм А. Гамона	279
§ 19.	Часовой привод с червячной парой	283
§ 20.	Конструкции червячных пар	286
§ 21.	Механизмы тонких движений в часовых приводах	288

§ 22. Координатные круги	291
§ 23. Искатели и гиды	295
§ 24. Колонны, станины, фундаменты	297
Г л а в а ш е с т а я . О С О Б Е Н Н О С Т И Н А Б Л Ю Д Е Н И Й С	
ВИЗУАЛЬНЫМИ И ФОТОГРАФИЧЕСКИМИ ТЕЛЕ-	
СКОПАМИ	
§ 1. Атмосфера — телескоп — наблюдатель	305
§ 2. Испытание телескопа	310
§ 3. Кометоискатели	312
§ 4. Рефлекторы-бинокляры	317
§ 5. Астрограф	318
§ 6. Окулярная камера	321
§ 7. Призменная камера	324
§ 8. Коронограф Лио	327
§ 9. Любительские обсерватории	332
Приложение	346
Список литературы	363

Научно-популярное издание

С и к о р у к Леонид Леонидович

ТЕЛЕСКОПЫ ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЕЙ АСТРОНОМИИ

Серия «Библиотека любителя астрономии».

Редактор *Г. С. Куликов*
 Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
 Технический редактор *Е. В. Морозова*
 Корректор *М. Л. Медведевская*

ИБ № 32721

Сдано в набор 15.03.89. Подписано к печати 16.11.89.
 Т-17269. Формат 84×108/32. Бумага тип. № 2.
 Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 19,32.
 Усл. кр.-отт. 19,74. Уч.-изд. л. 20,14. Тираж 83000 экз.
 Заказ № 0—91 Цена 85 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
 Главная редакция физико-математической литературы
 117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Набрано и сматрицировано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
 Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Государственного
 комитета СССР по печати, 113054, Москва, Валовая, 28

Отпечатано на полиграфкомбинате ЦК ЛКСМ Украины
 «Молодь» ордена Трудового Красного Знамени
 издательско-полиграфического объединения ЦК ВЛКСМ
 «Молодая гвардия», 252119, г. Киев-119 ул. Пархоменко, 38—44.

85 коп.