

Б. Д. ФЕДОРОВ

МАРКШЕЙДЕРСКО-
ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ
ПРИБОРЫ
И ИНСТРУМЕНТЫ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального
образования СССР в качестве учебника
для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Маркшейдерское дело»*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «Н Е Д Р А»
Москва 1971

Маркшейдерско-геодезические приборы и инструменты. Федоров Б. Д.
М., изд-во «Недра», 1971 г., стр. 288.

В книге изложены основные положения геометрической оптики, необходимые для изучения принципов работы современных оптико-механических приборов и инструментов, используемых при маркшейдерских и геодезических работах.

Описаны современные отечественные и зарубежные геодезические и маркшейдерские приборы, их особенности (свойства оптических деталей, отсчетные приспособления, уровни и механические устройства), методы исследования, проверки и уход за инструментами.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело», а также может быть использована инженерами-маркшейдерами и геодезистами.

Таблиц 17, иллюстраций 188, библиография — 24 названия.

Рецензенты: кафедра Маркшейдерского дела и геодезии ВЗПИ
и проф. И. Г. Лисица.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ПРЕДМЕТ И СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

Курс «Маркшейдерско-геодезические приборы и инструменты», который изучается студентами, обучающимися по специальности «Маркшейдерское дело», имеет большое значение для формирования профессионального инженера-маркшейдера.

Маркшейдерско-геодезические приборы относятся к точным оптико-механическим приборам, так как при работе с ними основные измерительные операции выполняются одновременно оптическими системами (наведение креста сетки нитей на визирные цели, взятие отсчетов по рейкам и т. д.) и механическими устройствами, обеспечивающими повороты вокруг осей, отсчеты по лимбам, установку прибора в горизонтальное и вертикальное положение по уровням и т. д.

В соответствии с этим в курсе излагаются основы геометрической оптики и приводятся описания конструкций приборов и инструментов в пределах, необходимых для уяснения принципов работы и правильного их применения. Правильное применение заключается в умении выбрать инструмент для данных измерений, исследовать его и работать с ним.

Автор учитывает, что многие вопросы, связанные с изучением маркшейдерско-геодезических инструментов и их применением, рассматриваются в курсах инженерной геодезии, маркшейдерского дела и высшей геодезии. Поэтому в учебнике не сообщаются сведения, известные студентам из ранее изучавшихся курсов (описания точных поверок инструментов и способов измерений).

В последнее время в маркшейдерско-геодезическом приборостроении произошли коренные изменения. Конструкции современных

приборов характеризуются применением стеклянных лимбов и оптических компенсаторов, позволяющих упростить и облегчить работу с приборами, значительно уменьшить их габариты и вес при высокой точности измерений. В настоящее время в конструкции маркшейдерских и геодезических приборов включаются устройства, работающие по принципам прикладной электроники, радиотехники и последних достижений физики. В связи с этим возникла необходимость введения в нашей стране новых государственных стандартов на маркшейдерские и геодезические приборы. С введением новых стандартов прекратится выпуск старых конструкций, что позволит в ближайшее время вооружить производство совершенными маркшейдерскими и геодезическими инструментами.

Основные задачи курса «Маркшейдерско-геодезические приборы и инструменты»:

изучение теории оптических систем маркшейдерских и геодезических приборов;

изучение механических устройств приборов;

изучение типов и конструкций современных приборов;

изучение методов исследования приборов.

Г Л А В А I

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

§ 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Построение оптических систем современных геодезических и маркшейдерских приборов основывается на принципах геометрической и физической оптики. Основой законов геометрической оптики являются понятия о светящейся точке, как о бесконечно малом источнике излучения световой энергии, и о пучке лучей, исходящих из светящейся точки, вдоль которых происходит распространение световой энергии в пространстве. Такое представление является отклонением от действительности, так как в этом случае объемная плотность энергии в светящейся точке должна быть равна бесконечности, что противоречит физическим представлениям. Распространяющаяся вдоль луча энергия также должна занимать некоторый объем. Следовательно, световая точка и световой луч есть понятия геометрические.

Согласно волновой теории точечному излучателю соответствует волновая поверхность, которая распространяется от источника света в виде электромагнитных колебаний. Распространение световой энергии происходит по нормальям к волновой поверхности, т. е. вдоль лучей геометрической оптики.

В однородной среде лучи света распространяются по прямым линиям. Вокруг светящейся точки лучи идут во все стороны, образуя неограниченный пучок. Поставив на пути такого пучка диафрагму — непрозрачную пластину с отверстием, получим ограниченный пучок лучей (рис. 1).

Если лучи пучка имеют общую точку пересечения, то пучок называют гомоцентрическим, а точку пересечения центром этого пучка. Если лучи расходятся от центра — пучок называется расходящимся гомоцентрическим (рис. 1). В однородной среде такому пучку соответствует волновая поверхность сферической

формы. Если же свет движется к центру пучка, то такой пучок называется сходящимся гомоцентрическим. Пучок лучей, центр которого удален в бесконечность, называется пучком параллельных лучей.

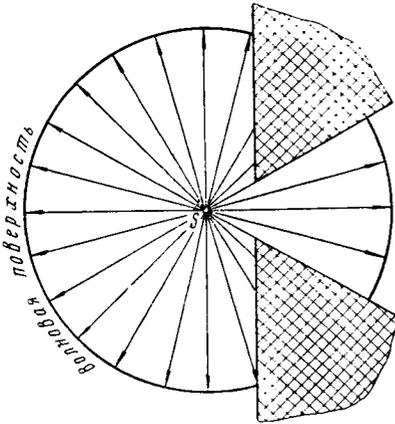


Рис. 1. Светящаяся точка, лучи и волновая поверхность

Оптическая система путем отражений и преломлений трансформирует один гомоцентрический пучок лучей в другой. Центр S пучка, входящего в оптическую систему, называется предметом, а центр S' пучка, выходящего из оптической системы, — изображением (рис. 2, а).

Если после трансформирования гомоцентричность выходящего пучка лучей сохраняется, то предмет изображается точкой.

Такие изображения называют точечными или стигматическими (рис. 2, а). Изображение можно считать источником (предметом), а источник — изображением, если рассматривать обратный ход лучей. Поэтому при стигматическом изображении центры пучков

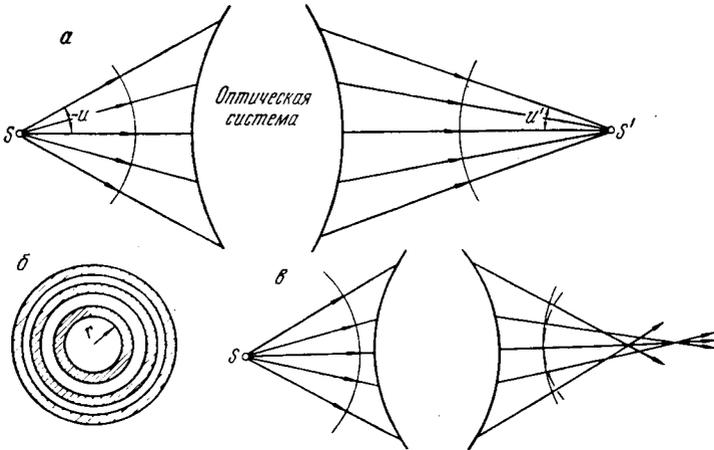


Рис. 2. Стигматическое дифракционное и нестигматическое изображения точки

называются сопряженными точками той оптической системы, в которой происходит преобразование расходящегося гомоцентрического пучка в сходящийся. Соответственно лучи и пучки также называются сопряженными.

В геометрической оптике изображение светящейся точки представляет собой геометрическую точку — центр пересечения лучей, вышедших из оптической системы. В действительности вид изображения точки определяется дифракцией света. Дифракционное изображение светящейся точки показано в увеличенном виде на рис. 2, б. Оно состоит из центрального светлого диска, окруженного темными и светлыми кольцами. Радиус первого темного кольца, ограничивающего центральный диск, вычисляется по формуле

$$r = \frac{0,61\lambda}{n' \sin u'}, \quad (I, 1)$$

где λ — длина световой волны;

n' — показатель преломления последней среды;

u' — угол раствора вышедшего пучка лучей.

В центральном диске сосредоточено 83,8% всей световой энергии изображения.

В оптических системах значение $\sin u'$ составляет 0,03—0,25. Поэтому при длине волны света $\lambda = 600$ нм и показателе преломления $n' = 1$ диаметр центрального диска находится в пределах от 25 000 до 3000 нм. Если принять $\sin u' = 1$, то $2r = 750$ нм. Следовательно, в действительности каждая светящаяся точка изображается кружком конечного размера.

Если оптическая система деформирует волновую поверхность входящего пучка, то волновая поверхность вышедшего пучка не будет сферической и лучи, нормальные к этой поверхности, не пересекутся в одной точке, т. е. нарушится гомоцентричность пучка лучей и стигматичность изображения (рис. 2, в). В этом случае оптическая система имеет aberrации, и изображение светящейся точки получается в виде пятна, превышающего размеры идеального (стигматического) дифракционного изображения точки. При расчете оптических систем стремятся найти такое сочетание линз, сортов стекла и расстояний между линзами, чтобы aberrации были малы, а нерезкости изображений не имели бы практического значения. Рассмотрим основные законы геометрической оптики, установленные непосредственно из наблюдений за оптическими явлениями.

Закон прямолинейного распространения света. В однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно, за исключением случаев, когда он проходит сквозь небольшие отверстия и узкие щели, а также когда на пути пучка лучей находится малая непрозрачная преграда. В этих случаях наблюдается дифракция, при которой свет проникает в области геометрической тени. Геометрическая оптика не учитывает явление дифракции.

Закон независимости световых пучков. В сложном световом потоке отдельные пучки распространяются независимо от других пучков. Действия пучков, сходящихся в одной точке, складываются. Исключение составляет явление интерференции, когда два пучка, выйдя из общего центра излучения и пройдя разные пути, приходят в данную точку в разных фазах.

Закон отражения света. От полированной границы двух сред свет отражается по закону, сущность которого состоит в следующем: падающий луч S , нормаль к границе сред и отраженный луч S' лежат в одной плоскости; угол падения i равен углу отражения i' по абсолютному значению, но противоположен по знаку, так как лучи S и S' располагаются по разные стороны от нормали,

$$i = -i'.$$

Положительным считается угол, образованный движением от нормали к лучу по часовой стрелке, и отрицательным — угол, образованный движением от нормали к лучу против часовой стрелки (рис. 3, а).

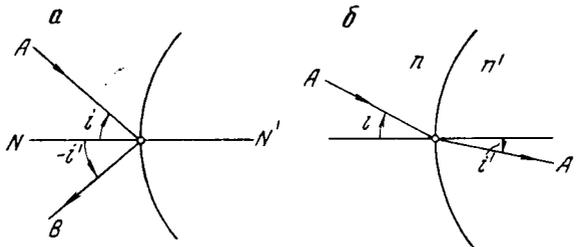


Рис. 3. Отражение и преломление лучей

Закон преломления света. Если луч света проходит через поверхность, разделяющую две среды с показателями преломления n и n' (рис. 3, б), то падающий луч образует с нормалью угол падения i , а луч преломленный образует с той же нормалью угол преломления i' . Закон преломления гласит, что падающий луч S , нормаль к поверхности в точке падения и преломленный луч S' лежат в одной плоскости и что произведение показателя преломления на синус угла, составленного с нормалью в одной среде, равно такому же произведению во второй среде, т. е.

$$n \sin i = n' \sin i'.$$

Преломляющие поверхности в оптических системах бывают двух видов: поверхности, разграничивающие воздух и стекло, и поверхности склейки двух оптических деталей. В оптическом приборостроении показатели преломления определяют относительно воздуха, показатель преломления которого принимается равным единице.

Различные марки (сорта) оптического силикатного стекла характеризуются показателем преломления n_D для длины волны $\lambda_D = 589,8 \text{ нм}$ (желтая линия D натрия); дисперсией, определяемой как разность показателей преломления данного стекла $n_F - n_C$ для двух длин волн: $\lambda_F = 486,1 \text{ нм}$ (зелено-голубая линия F водорода)

и $\lambda_C = 656,3 \text{ нм}$ (красная линия C водорода); коэффициентом дисперсии ν :

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (I,2)$$

Марки стекла, имеющие малую дисперсию, называются кронами, имеющие большую дисперсию — флинтами.

§ 3. ПЛОСКИЕ ЗЕРКАЛА

Плоское зеркало — оптическая система, способная строить стигматическое (точечное) изображение точки, как угодно расположенной в пространстве перед ним.

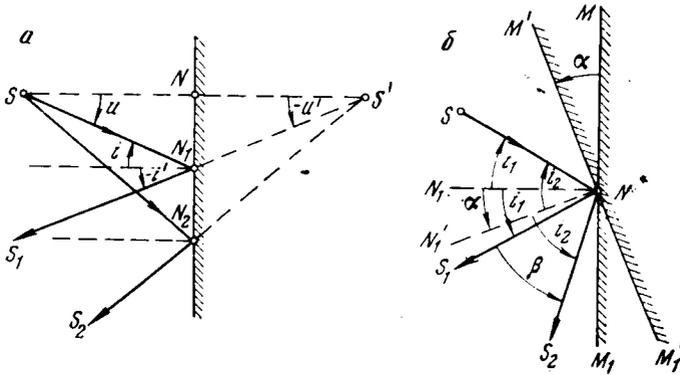


Рис. 4. Плоское зеркало

Пусть на зеркало NN_2 (рис. 4, a) падает гомоцентрический пучок лучей с центром в точке S . После отражения эти лучи образуют новый гомоцентрический пучок с центром в точке S' , лежащим на нормали к плоскости зеркала SN , причем $S'N = SN$. Следовательно, S' есть стигматическое изображение точки. Изображение предмета получается мнимым и полуобращенным, так как в нем одно из взаимно перпендикулярных направлений изменяется на противоположное. При повороте плоского зеркала на угол α отраженный луч отклоняется на угол $\beta = 2\alpha$ (рис. 4, b).

Пусть луч SN отражается от плоского зеркала MM_1 , образуя с нормалью NN_1 углы падения и отражения $i_1 = SNN_1 = N_1NS_1$. Если зеркало повернуть на угол $\alpha = MNM'$ в положение $M'M_1$, то, очевидно, и нормаль повернется на угол α . При этом она займет положение NN'_1 , и углы падения и отражения станут равными $i_2 = SNN'_1 = N'_1NS_2$. Из рис. 4, b находим

$$(i_2 - i_1 = \alpha,)$$

$$(\beta = 2(i_2 - i_1),)$$

откуда

$$(\beta = 2\alpha.)$$

$$(I,3)$$

Рассмотрим отражение луча SN от двух параллельных зеркал N и N_1 (рис. 5). Нормали NE и N_1A к зеркалам параллельны и поэтому углы падения и отражения луча в точках N и N_1 будут равны i_1 . В результате луч N_1S_1 будет параллелен лучу SN , но окажется смещенным на величину $l = NB$. Если расстояние между зеркалами N и N_1 равно $h = AN_1$, то из треугольника NN_1A

$$NN_1 = \frac{h}{\cos i_1}, \quad (I,4)$$

а из треугольника NN_1B

$$l = NB = NN_1 \sin 2i_1. \quad (I,5)$$

Подставляя выражение (I,4) в формулу (I,5), получим

$$l = 2h \sin i_1. \quad (I,6)$$

Допустим, что плоскость зеркала N_1D составляет с плоскостью зеркала ND угол α . Луч SN , отразившись от зеркала ND , пойдет по направлению NN_1 и составит с нормалью N_1E угол падения i_2 .

После отражения от зеркала N_1D он получит направление N_1S_2 и составит с нормалью угол отражения i_2 .

Из треугольника NDN_1

$$\alpha = 180^\circ - (90^\circ - i_1) - (90^\circ - i_2) = i_1 + i_2. \quad (I,7)$$

Из треугольника NN_1C находим, что внешний угол β у точки C

$$\beta = 2(i_1 + i_2). \quad (I,8)$$

Сопоставляя выражения (I,7) и (I,8), получим

$$\beta = 2\alpha. \quad (I,9)$$

Величина угла β зависит только от угла α и не зависит от углов i_1 и i_2 . Поэтому при повороте обоих зеркал как системы угол β остается неизменным. Это свойство используется, например, в двухзеркальном экскере.

§ 4. ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА

Плоско-параллельная пластинка имеет две плоские параллельные полированные грани. Плоско-параллельные пластинки широко применяются в оптических системах маркшейдерско-геодезических приборов в качестве защитных стекол, светофильтров, сеток нитей и т. д. Важное свойство плоско-параллельной пластинки — способность смещать лучи света, проходящие через нее под некоторым углом к параллельным граням.

Пусть луч SN составляет с нормалью в точке падения N угол i_1 (рис. 6). После преломления под углом i'_1 на границе «воздух — стекло» он пойдет по направлению NN_1 и, вновь преломившись в точке N_1 на границе «стекло — воздух», получит направление N_1S_1 , составив с нормалью угол i'_2 .

Ход луча SN от точки N подчиняется закону преломления:

$$\left. \begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin i'_1; \\ n \sin i_2 &= \sin i'_2. \end{aligned} \right\} \quad (I,10)$$

Из рис. 6 очевидно, что

$$i'_1 = i_2.$$

Тогда из выражения (I,10) получим

$$i_1 = i'_2,$$

т. е. выходящий луч N_1S_1 параллелен входящему лучу SN , но смещен относительно него на величину h .

Из треугольника NAN_1 определяем длину отрезка NN_1 :

$$NN_1 = \frac{d}{\cos i'_1},$$

а из треугольника NN_1B — величину смещения луча

$$h = \frac{d}{\cos i'_1} \sin (i_1 - i'_1). \quad (I,11)$$

Если допустить, что $i_1 = i'_2$ и что углы эти малы, то $\cos i'_1 \approx 1$, а $\sin (i_1 - i'_1) \approx i_1 - i'_1$, тогда выражения (I,11) и (I,10) примут вид

$$h = d (i_1 - i'_1);$$

$$i_1 = n i'_1$$

или

$$i'_1 = \frac{i_1}{n}.$$

Окончательно

$$h = d \frac{(n-1)}{n} i_1. \quad (I,12)$$

Приведем значения h , вычисленные по формуле (I,12), для плоско-параллельной стеклянной пластинки толщиной 20 мм с показателем преломления 1,65.

Угол наклона i_1 , град	0	5	10	15	20
h , мм	0,00	0,69	1,38	2,07	2,76

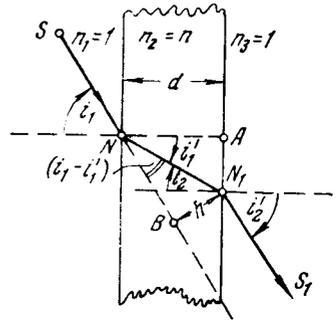


Рис. 6. Ход луча в плоско-параллельной пластинке

§ 5. ПРИЗМЫ

Призмы, применяемые в маркшейдерских и геодезических приборах, бывают преломляющие и полного внутреннего отражения.

Преломляющая призма имеет две полированные, пересекающиеся под углом σ плоские грани. Линия пересечения граней называется преломляющим ребром, а угол σ — преломляющим углом. Преломляющая призма с малым преломляющим углом ($\sigma \leq 6^\circ$) называется **оптическим клином**.

На рис. 7, а изображена преломляющая призма из стекла, показатель преломления которой $n_2 = n$. Пусть углы падения и преломления луча $i_1 = ANB$, $i'_1 = BNN_1$, $i_2 = NN_1B$ и $i'_2 = AN_1B$. Нужно определить угол отклонения луча ε .

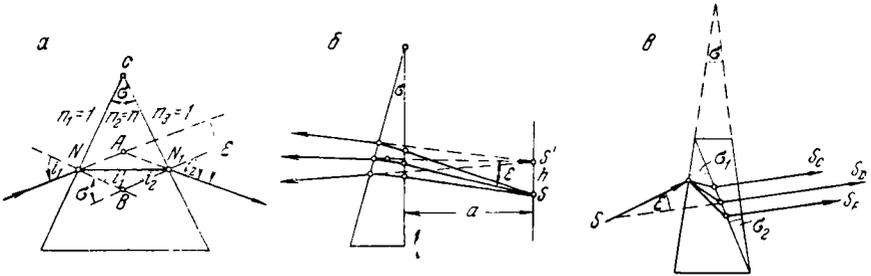


Рис. 7. Преломление луча призмой и оптическим клином

В треугольнике NAN_1

$$\angle ANN_1 = i_1 - i'_1; \quad \angle AN_1N = i'_2 - i_2.$$

Угол ε — внешний угол треугольника NAN_1 и равен сумме не смежных с ним углов ANN_1 и AN_1N :

$$\varepsilon = i_1 - i'_1 + i'_2 - i_2. \quad (I,13)$$

Призма находится в воздухе, поэтому в соответствии с законом преломления напишем

$$\left. \begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin i'_1; \\ \sin i'_2 &= n \sin i_2. \end{aligned} \right\} \quad (I,14)$$

Если углы, входящие в выражение (I,14), малы, то это выражение можно переписать в виде

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= n i'_1; \\ i'_2 &= n i_2. \end{aligned} \right\} \quad (I,15)$$

Подставляя выражение (I,15) в (I,13), получим

$$\varepsilon = (n - 1) (i'_1 + i_2). \quad (I,16)$$

Из треугольника NN_1B

$$\sigma = (i'_1 + i_2),$$

поэтому окончательно

$$\varepsilon = (n - 1) \sigma. \quad (I,17)$$

Рассматривая точку S через оптический клин (рис. 7, б), мы увидим ее изображение в точке S' смещенным на величину h :

$$h = a\varepsilon = a(n - 1) \sigma. \quad (I,18)$$

Сложный луч S при преломлении призмой разлагается на составные цвета (см. § 2). Для сохранения резкости изображений предметов, рассматриваемых через оптические клинья, возникла необходимость в создании ахроматических оптических клиньев.

Ахроматический клин (рис. 7, в) состоит обычно из двух клиньев — одного из крона, другого из флинта. Клинья склеиваются так, чтобы их преломляющие ребра были параллельны, а углы преломления σ_1 и σ_2 обращены в противоположные стороны. Показатели преломления и величины углов σ_1 и σ_2 подбираются с таким расчетом, чтобы два цветных луча (например, оранжевый S_C и голубой S_F), пройдя через систему, были параллельны.

Ахроматический клин, угол преломления которого σ , отклоняет луч S к основанию на угол ε без разложения его на составные цвета.

Оптические клинья широко применяются в маркшейдерских и геодезических дальномерах двойного изображения и оптических микрометрах.

Призмы полного внутреннего отражения представляют собой прозрачные многогранники с полированными гранями. Их применяют для изменения направления лучей, смещения их, оборачивания изображений и четкого разделения поля зрения. Отражение света призмами основано на явлении полного внутреннего отражения. Для усиления эффекта отражения отражающие грани иногда серебруют.

Трехгранная призма дает такое же изображение, как и одно зеркало, если отражение происходит от гипотенузной грани (рис. 8, а), и как система двух зеркал с углом 90° между ними, если отражение происходит от граней-катетов (рис. 8, б).

Вращение призмы вокруг ребра с прямым углом в первом случае приводит к смещению изображения на удвоенный угол поворота призмы; во втором случае изображение остается без изменений.

Система призм Порро I рода состоит из двух прямоугольных трехгранных призм, ребра с прямыми углами которых взаимно перпендикулярны (рис. 8, в). Лучи в системе отражаются от катетных граней. Каждая призма дает полуобращенное изображение, а вся система — изображение, повернутое на 180° .

Система Порро I рода применяется в биноклях. В сочетании с объективом зрительной трубы она дает прямое изображение.

Ромбическая призма (рис. 8, а) дает эффект, подобный системе параллельных зеркал. Она смещает лучи без изменения их направления.

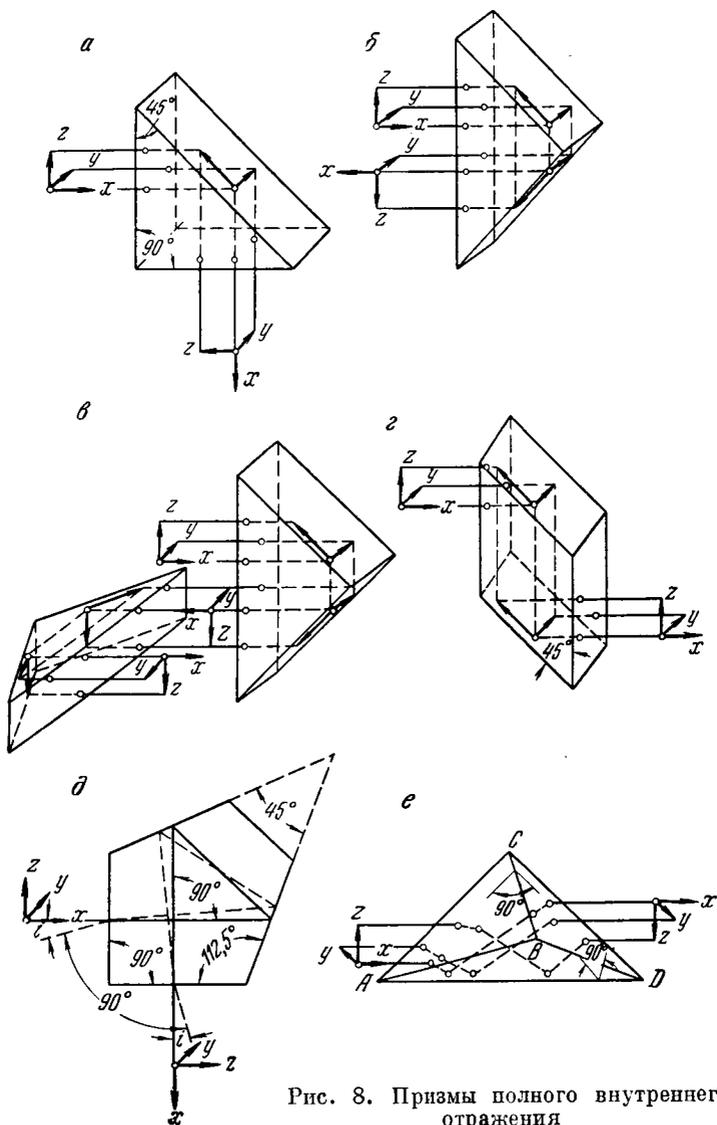


Рис. 8. Призмы полного внутреннего отражения

Пентапризма (рис. 8, д) дает эффект, аналогичный системе из двух зеркал, установленных под углом 45° . Она изменяет направление лучей на 90° независимо от угла их падения на входную грань.

Крышеобразная призма (рис. 8, е) имеет форму тетраэдра, грани которого ABD и ACD и грани ABC и DBC составляют друг с другом попарно углы по 90° . Эти же пары граней составляют углы 45° соответственно с ребрами CB и AD . Лучи, проходящие через призму, претерпевают два преломления и два отражения. Призма дает полное обращение изображения. Крышеобразная призма применяется в системах отсчетных микроскопов и в оптических компенсаторах нивелиров.

§ 6. ЦЕНТРИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Особенно важную роль в геодезических и маркшейдерских приборах играют центрированные оптические системы со сферическими преломляющими и отражающими поверхностями. Центрированной оптической системой называется система, центры всех поверхностей которой располагаются на одной прямой. Эта прямая носит название оптической оси системы.

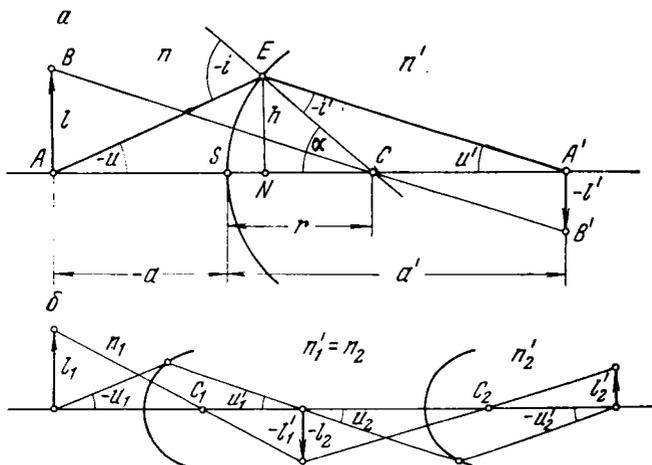


Рис. 9. Преломление лучей сферической поверхностью

Рассмотрим преломление параксиальных лучей (т. е. лучей, проходящих бесконечно близко около оптической оси) одной сферической поверхностью. В случае, когда имеется одна сферическая поверхность, оптической осью может быть любая прямая, проходящая через центр поверхности. Примем за ось системы линию, проходящую через точки S и C .

Пусть сферическая поверхность S радиусом r разделяет среды с показателями преломления n и n' (рис. 9, а).

Предмет расположен в точке A на расстоянии $-a$ от поверхности, а его изображение в точке A' на расстоянии a' от той же

поверхности. Луч света направлен из точки A в точку E под углом $-u$ к оптической оси. Лучи падающий и преломленный составляют с радиусом поверхности EC соответственно углы $-i$ и $-i'$. Высота точки E падения луча на поверхность равна h . Преломленный луч составляет с оптической осью угол u' .

При малых значениях углов i и i' закон преломления для точки E выразится формулой

$$ni = n'i'. \quad (I,19)$$

Поскольку углы $-i$ и $-i'$ малы, то и углы $-u$ и u' тоже малы.

Обозначим угол ECB буквой α . Угол $-i$ является внешним углом треугольника AEC . Поэтому с учетом знаков углов

$$i = u - \alpha. \quad (I,20)$$

Угол α является внешним углом треугольника ECA' , поэтому

$$i' = u' - \alpha. \quad (I,21)$$

Подставляя в выражение (I,19) значения углов i и i' , получим

$$n'(u' - \alpha) = n(u - \alpha). \quad (I,22)$$

При малом значении угла α из треугольника NEC находим

$$\alpha = \frac{h}{r}. \quad (I,23)$$

Пренебрегая отрезком SN ввиду его малости, из треугольника ANE находим

$$u = \frac{h}{a} \quad (I,24)$$

и аналогично из треугольника NEA'

$$u' = \frac{h}{a'}. \quad (I,25)$$

Подставляя в выражение (I,22) значения углов α , u и u' из равенств (I,23), (I,24) и (I,25), получим окончательную формулу

$$n' \left(\frac{1}{a'} - \frac{1}{r} \right) = n \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right), \quad (I,26)$$

которая называется формулой Аббе.

Из уравнения (I,26) можно найти фокусные расстояния (см. § 8) одной поверхности. Допустим, что из пространства предметов луч идет параллельно оптической оси, тогда $a = -\infty$, а $a' = f'$. После подстановки в формулу (I,26) получим

$$-\frac{n}{r} = n' \left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{r} \right)$$

или заднее фокусное расстояние

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (I,27)$$

Если же положить $a' = \infty$, то $a = f$. Тогда после подстановки в формулу (I,26) для переднего фокусного расстояния получим формулу

$$f = -\frac{nr}{n' - n}. \quad (I,28)$$

Из формул (I,27) и (I,28) получим отношение фокусных расстояний преломляющей поверхности

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (I,29)$$

Для определения величины изображения из точки B направим луч на поверхность по радиусу. Этот луч пройдет ее без преломления и в точке B' даст изображение точки B .

Из подобия треугольников ABC и $A'B'C$ следует:

$$-\frac{l'}{l} = \frac{a' - r}{r - a}$$

или

$$\frac{l'}{l} = \frac{r - a'}{r - a}. \quad (I,30)$$

Перепишем уравнение (I,26), приведя выражение в скобках к общему знаменателю и сократив обе части на $1/r$:

$$n \left(\frac{a - r}{a} \right) = n' \left(\frac{a' - r}{a'} \right)$$

или

$$\frac{a' - r}{a - r} = \frac{na'}{n'a}. \quad (I,31)$$

Тогда из равенств (I,31) с учетом выражений (I,30) получим

$$\frac{l'}{l} = \frac{na'}{n'a}, \quad (I,32)$$

где

$$a = \frac{h}{u} \quad \text{и} \quad a' = \frac{h}{u'}.$$

Подставляя значения a и a' в формулу (I,32) и сокращая на h , получим уравнение Лагранжа — Гельмгольца

$$nlu = n'l'u'. \quad (I,33)$$

Уравнение (I,33) показывает, что для лучей параксимальной области произведение показателя преломления n , величины предмета l и угла u , составленного лучом с осью в пространстве предметов, равно произведению соответственных величин в пространстве изображений. Уравнение (I,33) является инвариантом, т. е. справедливо для всех поверхностей центрированной системы и носит название закона Лагранжа — Гельмгольца.

Действительно, для сложной системы (рис. 9, б)

$$l'_1 = l_2 \dots l'_{k-1} = l_k; \quad n'_1 = n_2 \dots n'_{k-1} = n_k$$

и

$$u'_1 = u_2 \dots u'_{k-1} = u_k,$$

поэтому можно написать

$$n_1 l_1 u_1 = n_2 l_2 u_2 = \dots = n_{k+1} l_{k+1} u_{k+1}. \quad (I,34)$$

В-7 § 7. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Изучение свойств центрированной оптической системы, состоящей из сферических поверхностей, показывает, что стигматичность изображения сохраняется только в узкой области, расположенной около оптической оси. Для практических целей необходимы оптические системы, строящие стигматические изображения на большой части пространства при помощи широких гомоцентрических пучков лучей.

Сочетая линзы различной кривизны и разных сортов оптического стекла, а также используя несферические преломляющие поверхности, можно построить реальную оптическую систему, имеющую малые aberrации и строящую практически резкие изображения светящихся точек, находящихся на значительных расстояниях от оптической оси.

Для оценки качества реальных оптических систем их сравнивают с идеальной оптической системой. Теория этой системы основывается на следующих положениях:

каждая точка в пространстве предметов должна изображаться только одной точкой в пространстве изображений, обе такие точки называются сопряженными;

каждая прямая линия в пространстве предметов должна изображаться только одной прямой линией в пространстве изображений; обе такие линии называются сопряженными;

если какая-либо точка в пространстве предметов лежит на прямой, то сопряженная с ней точка в пространстве изображений должна лежать на прямой, сопряженной с первой прямой в пространстве предметов.

Из этих положений следует, что идеальная оптическая система, преобразуя широкий гомоцентрический пучок лучей в пространстве предметов, сохраняет гомоцентричность сопряженного с ним пучка лучей в пространстве изображений и что любая плоскость пространства предметов изображается только одной сопряженной с ней плоскостью в пространстве изображений.

Оптическая ось идеальной центрированной системы является ее осью симметрии. Плоскость, проходящая через оптическую ось системы, называется меридиональной. Если луч, входящий в идеальную оптическую систему, лежит в меридиональной плоскости, то, в соответствии с законами преломления и отражения, проходя через систему, он всегда остается в этой плоскости. Оптиче-

ская ось центрированной системы является линией пересечения всех меридиональных плоскостей, следовательно, луч, входящий в систему вдоль оптической оси, будет идти вдоль нее и по выходе из системы.

При теоретических исследованиях свойств оптических систем направление движения света принимают слева направо. При выборе знака руководствуются следующими положениями:

линейные отрезки, расположенные вдоль оптической оси, считаются положительными, если их направление совпадает с направлением движения света, и отрицательными, если они направлены в противоположную сторону;

радиус кривизны поверхности положителен, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицателен, если он находится слева от нее;

толщины линз и воздушные промежутки между ними всегда положительны;

все вертикальные отрезки в меридиональной плоскости, направленные вверх от оптической оси, положительны, а направленные вниз — отрицательны;

углы, образованные лучами света с оптической осью или с нормалью к поверхности, считаются положительными, если для совмещения с лучами ось или нормаль нужно поворачивать по направлению часовой стрелки, и отрицательными, если ее нужно поворачивать против часовой стрелки.

Вследствие круговой симметрии центрированной системы плоскость, перпендикулярная оптической оси, изображается также плоскостью, перпендикулярной этой оси.

Пусть P и P' — две такие сопряженные плоскости (рис. 10). Любому отрезку прямой в плоскости P будет соответствовать сопряженный с ним отрезок в плоскости P' . Рассмотрим два сопряженных отрезка l и l' .

Отношение величины изображения к величине предмета

$$\frac{l'}{l} = \beta \quad (1,35)$$

называется **линейным увеличением**. Линейное увеличение для данной пары сопряженных, перпендикулярных оптической оси плоскостей, есть величина постоянная, не зависящая от величины и направления отрезка. Поэтому изображение всякой плоской фигуры, расположенной в плоскости, перпендикулярной оптической оси, геометрически подобно этой фигуре.

При переходе от одной пары сопряженных плоскостей к другой линейное увеличение меняется.

Если $\beta > 0$, то изображение будет прямым. Если же $\beta < 0$, то изображение будет обратным.

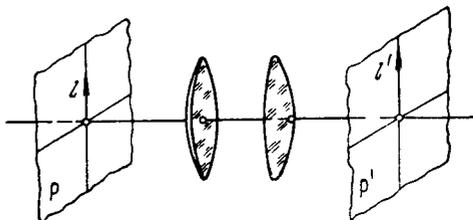


Рис. 10. Линейное увеличение

В-10

§ 8. ГЛАВНЫЕ ТОЧКИ, ПЛОСКОСТИ И ФОКУСНЫЕ РАССТОЯНИЯ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Центрированные оптические системы обладают способностью собирать в одну точку лучи, параллельные оптической оси.

На рис. 11 показаны первая и последняя сферические поверхности центрированной системы с оптической осью FF' . Пусть в систему в точках B , D и O входят лучи AB , CD и FO , параллельные оптической оси. Как пойдут лучи внутри системы, нас пока не интересует, но мы можем проследить (экспериментально), что лучи, выйдя из системы, пойдут в пространстве изображений по линиям H_1F' , H_2F' и $H'F'$, сопряженным с линиями AB , CD и FO , и пересекутся в точке F' . Точка F' — это изображение точки пересечения лучей AB , CD и FO .

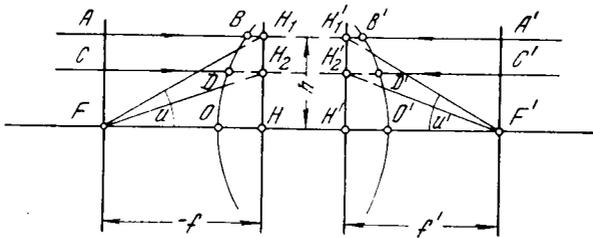


Рис. 11. Главные и фокальные плоскости и кардинальные точки

Но лучи AB , CD и FO параллельны между собой, следовательно, точка, сопряженная с точкой F' , удалена в бесконечность. Точка F' , сопряженная с точкой, лежащей на оптической оси в пространстве предметов и удаленной в бесконечность от системы, называется **задним фокусом**. По аналогии для лучей $A'B'$, $C'D'$ и $F'O'$, входящих в систему из пространства изображений параллельно оптической оси, точкой схода сопряженных с ними лучей H_1F , H_2F и HF будет точка F , которая называется **передним фокусом**. Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической оси, называются **фокальными**. Фокальные плоскости — это геометрические места точек схода параллельных пучков лучей, проходящих через систему.

Действие всех преломляющих поверхностей, составляющих идеальную оптическую систему, на лучи, входящие из пространства предметов, можно заменить действием одной воображаемой плоскости. Для того чтобы найти положение этой плоскости, продолжим входящие лучи AB и CD до пересечения с продолжениями выходящих лучей $F'H_1$ и $F'H_2$ и в пересечении сопряженных лучей получим точки H_1 и H_2 . В этих точках направления сопряженных с ними лучей изменяются на направления сопряженных с ними лучей. Точки H_1 и H_2 лежат в одной плоскости, перпендикулярной оптической

оси в точке H' . Рассматривая ход лучей $A'B'$ и $C'D'$, идущих из пространства изображений, можно найти другую плоскость. Действие этой плоскости заменяет действие поверхностей, составляющих систему, в которой будут находиться точки H_1 , H_2 и H .

Легко показать, что точки H_1 и H'_1 , а также точки H_2 и H'_2 являются сопряженными (т. е. точки H'_1 и H'_2 есть изображения точек соответственно H_1 и H_2). Действительно H_1 — это точка пересечения лучей AB и FH_1 , с которыми сопряжены лучи соответственно H'_1F и $B'A'$. В пересечении лучей H'_1F' и $B'A'$ находится точка H'_1 . Аналогично можно показать, что H_2 и H'_2 также сопряженные точки.

Точки H_1 и H'_1 отстоят от оптической оси на одинаковом расстоянии h ($H_1H = H'_1H'$), т. е. линейное увеличение

$$\beta = \frac{H'_1H'}{H_1H} = +1.$$

Рассуждая аналогично, можно показать, что точки H_2 и H'_2 и любые другие сопряженные точки плоскостей, проходящих через точки H и H' перпендикулярно оптической оси FF' , отстоят от нее на одинаковых расстояниях.

Следовательно, такие плоскости являются сопряженными, изображающими взаимно друг друга в натуральную величину без поворотов изображений в пространстве. Эти плоскости называются главными плоскостями системы. Точки H и H' главных плоскостей, лежащие на оптической оси, называются соответственно передней и задней главными точками системы.

Расстояние HF , отсчитываемое от передней главной точки H по направлению к переднему фокусу F , называется передним фокусным расстоянием. Расстояние $H'F'$, отсчитываемое от задней главной точки H' по направлению к заднему фокусу F' , называется задним фокусным расстоянием. Если обозначить углы, составленные лучами FH_1 и $F'H'_1$ с оптической осью, соответственно буквами u и u' , то:

$$f = \frac{h}{\operatorname{tg} u}; \quad f' = \frac{h}{\operatorname{tg} u'}. \quad (\text{I,36})$$

Главные точки H и H' и фокусы F и F' называются кардинальными точками оптической системы.

В-11 § 9. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СОПРЯЖЕННЫХ ТОЧЕК ОТНОСИТЕЛЬНО ФОКУСОВ И ГЛАВНЫХ ТОЧЕК

Пусть оптическая система задана кардинальными точками — передней и задней главными точками H и H' (рис. 12) и передним и задним фокусами F и F' . Возьмем произвольный отрезок AB , перпендикулярный оптической оси в пространстве предметов.

Выведем формулы для определения координат концов этого отрезка координат концов сопряженного отрезка $A'B'$, принимая за начала координат фокусы и главные точки системы.

Если за ось x принять направление оптической оси, а за ось y — направление отрезка AB , то координаты точек A и B относительно переднего фокуса F будут:

$$x_A = -x; \quad y_A = 0;$$

$$x_B = -x; \quad y_B = l.$$

Для построения сопряженного отрезка $A'B'$ проведем луч через точку B параллельно оптической оси до пересечения с задней главной плоскостью в точке C' и направим его через задний фокус F' .

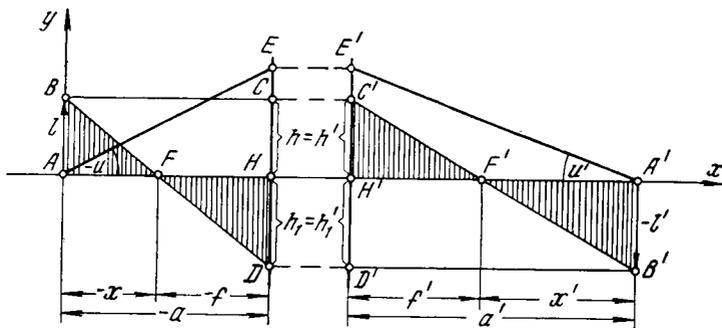


Рис. 12. Схема к выводу уравнения Ньютона

Если другой луч направить из точки B через передний фокус F до пересечения с передней главной плоскостью, то от точки D он пойдет параллельно оптической оси и в точке B' пересечется с лучом $C'B'$. Очевидно, точка B' будет изображением точки B , так как она лежит в пересечении лучей $C'B'$ и $D'B'$, сопряженных соответственно с лучами BC и BD , в пересечении которых находится точка B . Линии AB и $A'B'$, перпендикулярные оптической оси, будут сопряженными отрезками, а точки A и A' — сопряженными точками оптической оси системы.

Координаты точек A' и B' относительно заднего фокуса F' :

$$x_{A'} = x'; \quad y_{A'} = 0;$$

$$x_{B'} = x'; \quad y_{B'} = -l'.$$

Из прямоугольных треугольников ABF , FHD , $C'F'H'$ и $F'A'B'$ найдем

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}, \quad (I,37)$$

откуда получим уравнение Ньютона

$$xx' = ff'. \quad (I,38)$$

Уравнение (I,38) позволяет определить расстояние до плоскости изображения x' , если известны расстояние от переднего фокуса F до предмета x и фокусные расстояния системы.

Если в уравнении (I,38) заменить

$$\left. \begin{aligned} x &= a - f; \\ x' &= a' - f', \end{aligned} \right\} \quad (I,39)$$

то получим формулу, связывающую положения предмета и изображения относительно главных точек,

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1. \quad (I,40)$$

Если принять $-f = f'$, то формулу (I,40) можно переписать в виде

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}. \quad (I,41)$$

Полученное уравнение называется *формулой отрезков*. Из рис. 12 находим

$$HE = H'E' = a \operatorname{tg} u = a' \operatorname{tg} u'.$$

Определяя из выражения (I,39) значения a и a' и подставляя их в предыдущее равенство, получим

$$(x + f) \operatorname{tg} u = (x' + f') \operatorname{tg} u'.$$

На основании уравнения (I,37) можно написать

$$x = -\frac{l}{l'} f; \quad x' = -\frac{l'}{l} f'.$$

Подставляя эти значения в предыдущее уравнение, после преобразований получим

$$lf \operatorname{tg} u = -l' f' \operatorname{tg} u'. \quad (I,42)$$

Для идеальной системы уравнение (I,42) справедливо при любых значениях углов u и u' и сопряженных отрезков l и l' . Следовательно, оно имеет место и при малых углах и малых величинах предметов и изображений, т. е. в пароксиальной области

$$lfu = -l' f' u'. \quad (I,43)$$

В соответствии с уравнением (I,33), справедливым в пароксиальной области для любой системы центрированных сферических поверхностей, у которой показатели преломления первой и последней среды соответственно n и n' , а величины сопряженных отрезков l и l' , можно написать

$$nlu = n'l'u'.$$

Из сопоставления последнего уравнения с уравнением (I,43) получим важнейшее соотношение

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (I,44)$$

Отношение фокусных расстояний любой оптической системы равно отношению показателей преломления крайних сред со знаком минус. Если оптическая система находится в однородной среде, например в воздухе, т. е. $n = n'$, то

$$-f = f', \quad (I,45)$$

т. е. фокусные расстояния равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку.

В практике, как правило, мы встречаемся именно с таким случаем.

§ 10. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Различают три вида увеличений оптической системы: линейное (см. § 8), продольное и угловое.

1. *Линейное увеличение* определяется по формуле (I,37)

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f}.$$

2. *Продольное увеличение* определяется отношением

$$\alpha = \frac{dx'}{dx}.$$

Дифференцируя уравнение (I,38) по x и x' , находим

$$x dx + x' dx' = 0,$$

откуда

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \quad (I,46)$$

Умножая и деля правую часть выражения (I,46) на произведение ff' , получим

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{f'} \cdot \frac{f}{x} \cdot \frac{f'}{f}.$$

Введя в предыдущее выражение β , получим для продольного увеличения формулу

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\beta^2 \frac{f'}{f}. \quad (I,47)$$

3. *Угловым увеличением* называют отношение

$$\gamma = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u}.$$

С учетом уравнения (I,42) можно написать

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta} \quad (\text{I,48})$$

или, подставив значения β из формулы (I,37),

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{x}{f'} = \frac{f}{x'} \quad (\text{I,49})$$

Сопоставление формул (I,37), (I,47) и (I,48) позволяет установить следующие зависимости между увеличениями:

$$\begin{aligned} \alpha &= -\beta^2 \frac{f'}{f}; \\ \gamma\beta &= -\frac{f}{f'}; \\ \alpha\gamma &= \beta. \end{aligned} \quad (\text{I,50})$$

Если система находится в воздухе, то $-f = f'$ и формулы (I,50) примут вид:

$$\alpha = \beta^2; \quad (\text{I,51})$$

$$\beta\gamma = 1. \quad (\text{I,52})$$

Формула (I,51) свидетельствует о невозможности получить изображение, подобное предмету, если предмет имеет значительное протяжение вдоль оси системы.

§ 11. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОПРЯЖЕННЫХ ТОЧЕК И ОТРЕЗКОВ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Если известны положения кардинальных точек на оптической оси и задана точка в пространстве предметов, то легко можно найти графически положение сопряженной точки в пространстве изображений.

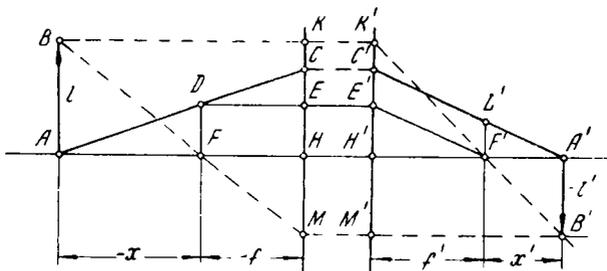


Рис. 13. Построение изображений центрированной системой

Пусть положение точки предмета A относительно переднего фокуса F задано отрезком x (рис. 13). Для построения изображения A' через точку A проведем произвольный луч до пересечения с передней

главной плоскостью в точке C . Затем построим сопряженную с ней точку C' , лежащую на задней главной плоскости на таком же расстоянии от оптической оси, что и точка C . Через точку D пересечения луча AC с передней фокальной плоскостью проводим линию, параллельную оптической оси DE , до пересечения с задней главной плоскостью в точке E' .

Линия $E'F'$, сопряженная с линией DE , должна пройти через задний фокус F' . Через точку C' параллельно линии $E'F'$ проводим линию $C'A'$ до пересечения с оптической осью в точке A' . Точка A' является искомым изображением точки A , и ее положение относительно заднего фокуса определяется координатой $x' = F'A'$.

Если это утверждение правильно, то точки A и A' должны удовлетворять уравнению (I,38). Для доказательства рассмотрим рис. 13.

Так как $\triangle ADF \sim \triangle DEC$, а $\triangle H'E'F' \sim \triangle L'F'A'$, можно утверждать, что

$$\frac{EC}{FD} = \frac{DE}{AF}$$

и

$$\frac{L'F'}{FD} = \frac{F'A'}{H'F'}.$$

Учитывая, что $L'F' = E'C' = EC$ (по построению), можно написать

$$\frac{DE}{AF} = \frac{F'A'}{H'F'}.$$

Но $DE = -f$, $AF = -x$, $F'A' = x'$ и $H'F' = f'$, поэтому $xx' = ff'$. Следовательно, точки A и A' действительно сопряженные.

Для построения точки B' , которая является изображением точки B , лежащей вне оптической оси, или для построения отрезка $A'B'$, сопряженного с отрезком AB , производят следующие построения. Через точку B параллельно оптической оси проводят луч BK до пересечения с задней главной плоскостью в точке K' . Сопряженный луч пойдет по линии $K'B'$ через задний фокус F' , на этом луче должно лежать изображение точки B . Из точки B через передний фокус F проведем второй луч BM до пересечения с передней главной плоскостью в точке M . Сопряженный с ним луч пойдет по линии MB' параллельно оптической оси. Изображение точки B должно находиться и на этом луче. Следовательно, точка B' представляет собой изображение точки B , так как лежит в пересечении лучей $K'B'$ и $M'B'$. Отрезок $A'B'$, перпендикулярный оптической оси, является изображением отрезка AB .

Для доказательства рассмотрим треугольники ($\triangle ABF \sim \triangle FHM$ и $\triangle H'K'F' \sim \triangle F'A'B'$), из подобия которых следует

$$\frac{HM}{AB} = \frac{FH}{AF} \quad \text{и} \quad \frac{A'B'}{H'K'} = \frac{F'A'}{H'F'}.$$

построению $AB = H'K' = l$ и $HM = H'M' = -l'$, на основании которого можно написать

$$\frac{FH}{AF} = \frac{F'A'}{H'F'}$$

После замены соответственно $-f$, $-x$, x' и f' получим уравнение ана.

§ 12. СОЧЕТАНИЕ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОБЩЕЙ ОСЬЮ

Если две оптические системы с общей осью заданы своими кардинальными точками, то их совместное действие на проходящие лучи можно свести к действию одной эквивалентной оптической системы и определить положение кардинальных точек этой системы.

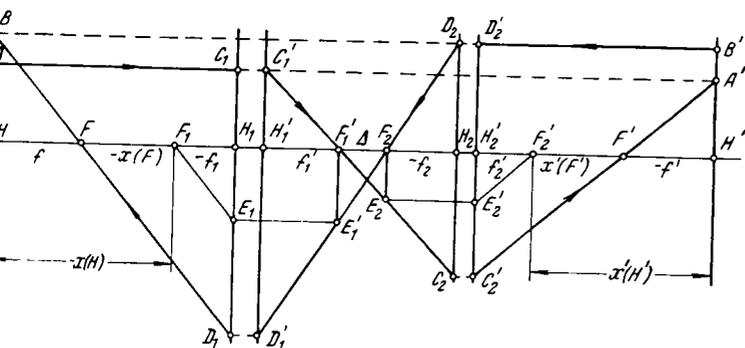


Рис. 14. Сочетание двух центрированных систем

Если две оптические системы заданы кардинальными точками F_1, H_1, F_1' и F_2, H_2, H_2' и F_2' (рис. 14). При этом взаимное положение определяется оптическим интервалом — отрезком $F_1'F_2$ между задним фокусом F_1' первой системы и передним фокусом F_2 второй системы. Знак оптического интервала считается положительным, если F_2 находится справа от F_1' , и отрицательным, если F_2 находится слева от F_1' . На рис. 14 оптический интервал положителен.

Для определения положения кардинальных точек эквивалентной системы решим эту задачу графически и аналитически.

Графическое решение. Направим произвольный луч AC_1 параллельно оптической оси. В точке C_1 задней главной плоскости H_1' первой системы луч изменит направление и пройдет через задний фокус F_1' первой системы и далее до точки C_2 передней главной плоскости H_2 второй системы. Пользуясь построениями $(F_2E_2E_2'F_2')$, найдем точку F' , которая является изображением точки F_1' , как предметной точки для второй системы.

Точка A' , лежащая на продолжении луча с сопряженным с ним лучом C_2A' , будет принадлежать задней плоскости эквивалентной системы $A'H'$, а точка H' есть главная точка этой системы.

Точка F' , сопряженная с точкой, удаленной в бесконечность (луч AC_1 параллелен оптической оси), будет задним фокусом эквивалентной системы.

Аналогичные построения при рассмотрении хода луча позволяют найти положение передней главной плоскости BE эквивалентной системы и переднего фокуса F этой системы.

Аналитическое решение. Обозначим положения фокусов F и F' эквивалентной системы относительно заднего фокуса F_2' первой системы и переднего фокуса F_1 второй системы соответственно $x'(F')$ и $-x(F)$.

Из формулы Ньютона (I,38), составленной для двух пар сопряженных точек F_1, F' и F_2, F , с учетом знаков определяем:

$$x'(F') = -\frac{f_2 f_2'}{\Delta}$$

и

$$x(F) = \frac{f_1 f_1'}{\Delta}.$$

Из подобия треугольников ($\Delta A'H'F' \sim \Delta E_2'H_2'F_2'$ и $\Delta C_1'F_1' \sim \Delta E_2'F_2'F_1'$) следует:

$$\frac{A'H'}{H_2'E_2'} = \frac{F'H'}{H_2'F_2'}$$

и

$$\frac{C_1'H_1'}{E_2'F_2'} = \frac{H_1'F_1'}{F_1'F_2'}.$$

По построению $A'H' = C_1'H_1'$ и $H_2'E_2' = F_2'E_2'$, поэтому

$$\frac{F'H'}{H_2'F_2'} = \frac{H_1'F_1'}{F_1'F_2'}.$$

Заменив обозначения отрезков соответствующими буквами обозначениями (см. рис. 14), получим

$$\frac{-f'}{f_2'} = \frac{f_1'}{\Delta},$$

откуда

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}.$$

Рассматривая треугольники ($\Delta BHF \sim \Delta F_1'H_1'E_1$ и $\Delta D_2' \sim \Delta F_2'F_1'E_1'$), после аналогичных соображений можем написать

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}.$$

По вычисленным значениям $x'(F')$, $x(F)$, f' и f можно найти положения фокусов и главных точек эквивалентной системы.

Определим положения главных точек H и H' относительно фокусов F_1 и F'_2 , обозначив отрезки F_1H и F'_2H' соответственно через $x(H)$ и $x'(H')$. Учитывая, что $x(H) < 0$ и $x'(H') > 0$,

$$\left. \begin{aligned} x(H) &= x(F) - f; \\ x'(H') &= x'(F') - f'. \end{aligned} \right\} \quad (I,57)$$

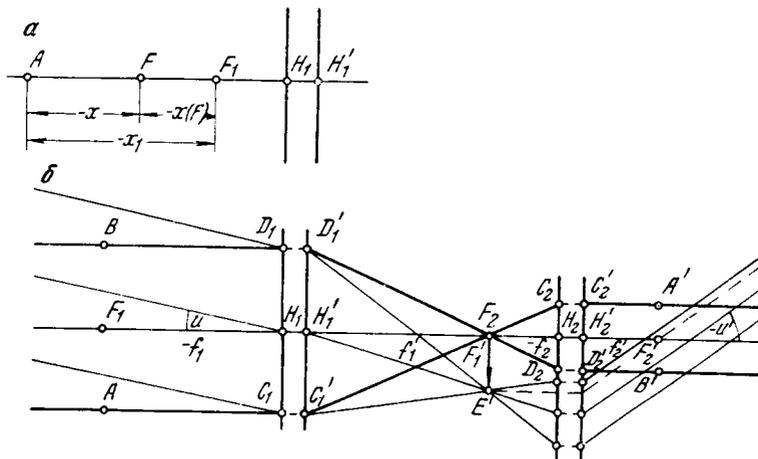


Рис. 15. Схема к выводу формулы линейного увеличения эквивалентной системы

Подставляя в равенства (I,57) значения $x(F)$, $x'(F')$, f и f' , получим:

$$x(H) = \frac{f_1(f'_1 - f_2)}{\Delta}; \quad (I,58)$$

$$x'(H') = \frac{f'_2(f'_1 - f_2)}{\Delta}. \quad (I,59)$$

Линейное увеличение эквивалентной системы. Из уравнения (I,37) следует

$$\beta = -\frac{f}{x},$$

где f — фокусное расстояние эквивалентной системы ($f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$);

x — расстояние от переднего фокуса F этой системы до предмета A .

Очевидно, x можно выразить через расстояние x_1 от переднего фокуса F_1 первой системы до предмета (рис. 15, а)

$$x = x_1 - x(F),$$

где

$$x(F) = \frac{f_1 f'_1}{\Delta}.$$

Подставляя значения f и x в формулу $\beta = -\frac{f}{x}$, получим

$$\beta = \frac{f_1 f_2}{f_1 f'_1 - x_1 \Delta}. \quad (I,60)$$

Телескопическая система. Если оптический интервал $\Delta = 0$, то задний фокус первой системы будет совпадать с передним фокусом второй системы. В этом случае значения фокусных расстояний эквивалентной системы, подсчитанные по формулам (I,55) и (I,56), оказываются равными бесконечности, а главные точки — отнесены в бесконечность.

Системы, у которых оптический интервал равен нулю, называются **телескопическими**.

Отношение фокусных расстояний телескопической системы будет конечным

$$\frac{f'}{f} = -\frac{f'_1 f'_2}{f_1 f_2}. \quad (I,61)$$

Из формулы (I,60) линейное увеличение для телескопической системы

$$\beta = \frac{f_2}{f'_1}. \quad (I,62)$$

Если обе системы, составляющие телескопическую систему, находятся в воздухе, то $-f_2 = f'_2$, следовательно,

$$\beta = -\frac{f'_2}{f'_1}. \quad (I,63)$$

Из формулы (I,62) и рис. 15, б видно ($AB = D_1 C_1$, а $A'B' = C'_2 D'_2$), что линейное увеличение телескопической системы не зависит от положения предмета (от величины x) и, следовательно, постоянно для всех сопряженных точек.

Угловое увеличение в соответствии с формулой (I,48) равно

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta}.$$

Подставляя в это уравнение значение отношения фокусных расстояний из уравнения (I,61) и значение β из уравнения (I,62), найдем угловое увеличение телескопической системы

$$\gamma = \frac{f_1}{f_2}, \quad (I,64)$$

а при $n = n' = 1$

$$\gamma = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (I,65)$$

Сопоставляя уравнение (I,63) с равенством (I,65), получим

$$\gamma = \frac{1}{\beta}, \quad (I,66)$$

т. е. угловое увеличение телескопической системы для всех сопряженных точек на оптической оси постоянно.

Лучи, вошедшие в телескопическую систему параллельно оптической оси ($BD_1 \parallel F_1H_1 \parallel AC_1$, рис. 15, б) выходят из оптической системы также параллельно этой оси ($C_2A' \parallel H_2F_2 \parallel D_2B'$).

Пучки параллельных лучей, вошедших в телескопическую систему под некоторым углом u , выходят из системы под большим углом u' , но также параллельным пучком. Это очень важное свойство дает возможность вести наблюдения через систему без напряжения глаза.

В-12

§ 13. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА СИСТЕМЫ. ДИОПТРИЯ

Из формулы (I,44) находим

$$\frac{f}{v} = -\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$$

Эти отношения называются **оптической силой системы**.

Как правило, оптические системы рассматриваются в воздухе, когда $n = n' = 1$. В этом случае оптическая сила системы определяется как величина, обратная заднему фокусному расстоянию,

$$\varphi = \frac{1}{f'}. \quad (I,67)$$

Чем больше оптическая сила, тем ближе к системе располагается изображение предмета и тем меньше величина изображения при прочих равных условиях.

За единицу оптической силы принимают оптическую силу системы (линзы) в воздухе, имеющей положительное заднее фокусное расстояние, равное 1 м.

Если величину фокусного расстояния выразить в миллиметрах, то оптическая сила в диоптриях будет определяться по формуле

$$\varphi = \frac{1000 \text{ мм}}{f' \text{ мм}}. \quad (I,68)$$

Например, системы с фокусными расстояниями, равными $f'_1 = 200 \text{ мм}$, $f'_2 = 100 \text{ мм}$ и $f'_3 = 50 \text{ мм}$, обладают оптическими силами в диоптриях соответственно $\varphi_1 = 5$, $\varphi_2 = 10$, $\varphi_3 = 20$.

В-В

§ 14. ЛИНЗЫ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ, ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ И ФОКУСОВ

Простейший вид центрированной системы — это линза (часть прозрачного вещества, ограниченная двумя сферическими поверхностями).

На рис. 16 изображена линза, ограниченная сферическими поверхностями O_1 и O_2 , радиусы кривизны которых $r_1 > 0$ и $r_2 < 0$. Для параксиальной области можно считать, что главные плоскости каждой поверхности совпадают между собой и с вершинами поверхностей O_1 и O_2 . Показатель преломления вещества, из которого сделана линза, $n_2 = n$, и так как линза находится в воздухе, то показатели преломления $n_1 = n_3 = 1$. Передний фокус первой преломляющей поверхности в воздухе обозначен буквой F_1 , задний фокус этой же преломляющей поверхности в стекле — буквой F'_1 .

Рассмотрим ход луча, входящего в линзу параллельно оптической оси из пространства предметов по линии AC . Преломившись в точке A , луч пойдет по линии AB и, если бы не было второй пре-

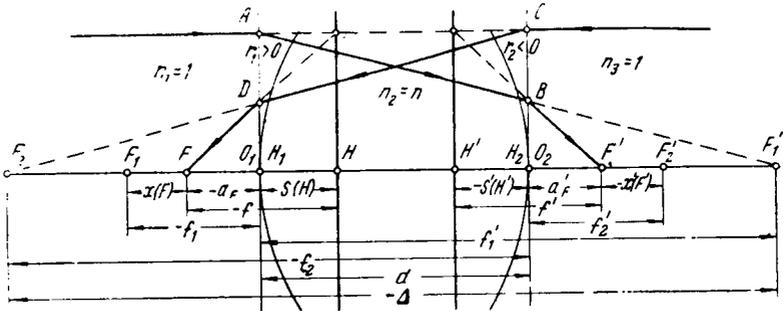


Рис. 16. Линзы конечной толщины

ломляющей поверхности, пересечет оптическую ось в точке F'_1 — в заднем фокусе первой преломляющей поверхности в среде с показателем преломления n . Но, встретив вторую преломляющую поверхность, он пойдет по направлению BF' и пересечет оптическую ось в заднем фокусе линзы F' .

Проследив ход луча, идущего параллельно оптической оси из пространства изображений по линии CA , по аналогии получим положения переднего фокуса второй преломляющей поверхности в точке F_2 и переднего фокуса линзы в точке F .

Из рис. 16 найдем

$$-\Delta = f'_1 - f_2 - d. \quad (I,69)$$

Подставляя в формулы (I,55) и (I,56) значение оптического интервала из равенства (I,69), получим

$$f = -\frac{f_1 f_2}{f'_1 - f_2 - d}, \quad f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 - f_2 - d}. \quad (I,70)$$

Учитывая знаки радиусов кривизны преломляющих поверхностей и положив $n_1 = n_3 = 1$ и $n_2 = n$, в соответствии с уравнениями (I,27) и (I,28), напомним:

$$f_1 = -\frac{r_1}{n-1}; \quad f'_1 = \frac{nr_1}{n-1}; \quad f_2 = \frac{nr_2}{n-1} \quad \text{и} \quad f'_2 = -\frac{r_2}{n-1}. \quad (I,71)$$

После подстановки в равенства (I,70) значений f_1, f'_1, f_2, f'_2 и преобразования получим формулу определения фокусных расстояний линзы

$$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1) + (n-1)d]} = -f. \quad (I,72)$$

Из формулы (I,72) получим формулу для определения оптической силы линзы

$$\varphi' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1r_2}. \quad (I,73)$$

Расстояния от вершины O_1 первой преломляющей поверхности до переднего фокуса линзы F и от вершины O_2 до заднего фокуса линзы F' называются вершинными фокусными расстояниями. Из рис. 16 находим:

$$a_F = f_1 + x(F); \quad a'_F = f'_2 + x'(F'),$$

где

$$x(F) = \frac{f_1f'_1}{\Delta}; \quad x'(F') = -\frac{f_2f'_2}{\Delta}.$$

Перешлем $x(F), x'(F')$ с учетом равенства (I,69):

$$x(F) = -\frac{f_1f'_1}{f'_1 - f_2 - d}; \quad x'(F') = \frac{f_2f'_2}{f'_1 - f_2 - d}. \quad (I,74)$$

Тогда:

$$a_F = f_1 - \frac{f_1f'_1}{f'_1 - f_2 - d} = \frac{-f_1f_2 - f_1d}{f'_1 - f_2 - d} = -f \left(1 + \frac{d}{f_2} \right); \quad (I,75)$$

$$a'_F = f'_2 + \frac{f_2f'_2}{f'_1 - f_2 - d} = \frac{f'_1f'_2 - f'_2d}{f'_1 - f_2 - d} = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right). \quad (I,76)$$

После подстановки значений f'_1 и f_2 из (I,71) окончательно получим:

$$\left. \begin{aligned} a_F &= -f \left[1 + \frac{(n-1)d}{nr_2} \right]; \\ a'_F &= f' \left[1 - \frac{(n-1)d}{nr_1} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (I,77)$$

Если отрезки, определяющие положения главных плоскостей H и H' линзы относительно вершин преломляющих поверхностей O_1 и O_2 , обозначить соответственно $S(H)$ и $S'(H')$, то согласно рис. 16:

$$\left. \begin{aligned} S(H) &= a_F - f = -f \frac{(n-1)d}{nr_2}; \\ S'(H') &= a'_F - f' = -f' \frac{(n-1)d}{nr_1}. \end{aligned} \right\} \quad (I,78)$$

Формулы (I,72), (I,77) и (I,78) позволяют определить положения кардинальных точек линзы.

Отдельная линза в воздухе находит широкое применение в геодезических и маркшейдерских приборах. Иногда оптическая система может состоять из одной линзы в воздухе (лупы), но, как правило, отдельная линза входит в состав более сложных оптических систем: объективов и окуляров зрительных труб, объективов и окуляров отсчетных микроскопов или в сложные лупы.

Рассмотрим основные типичные формы линз. На рис. 17 в верхнем ряду представлены собирательные, или положительные, линзы ($f' > 0$); в нижнем — рассеивающие, или отрицательные, линзы ($f' < 0$).

Собирательные линзы толще по оптическим осям и тоньше на краях. Рассеивающие линзы по оси имеют меньшую толщину, чем по краям.

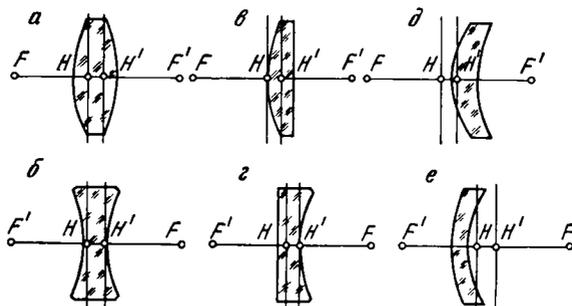


Рис. 17. Типы линз

Двояковыпуклая линза (рис. 17, а) ограничена сферическими поверхностями с радиусами кривизны, имеющими противоположные знаки ($r_1 > 0$ и $r_2 < 0$). На основании формул (I,78) можно заключить, что $S(H) > 0$ — положительно и $S'(H') < 0$ — отрицательно. Следовательно, обе главные плоскости находятся внутри линзы.

Двояковогнутая линза (рис. 17, б) имеет первый радиус $r_1 < 0$ и второй радиус $r_2 > 0$. Линза рассеивающая, так как во всех случаях $f' < 0$. На основании формул (I,78) приходим к выводу, что $S(H) > 0$ и $S'(H') < 0$.

В *плоско-выпуклой линзе* (рис. 17, в) одна преломляющая поверхность плоская, а другая выпуклая. Если $r_1 > 0$, то $r_2 = \infty$, или наоборот. Тогда в соответствии с формулой (I,73)

$$f' = \frac{r_1}{n-1}.$$

Из формулы (I,78) следует:

$$S(H) = 0 \quad \text{и} \quad S'(H') = -\frac{d}{n}.$$

Следовательно, заднее фокусное расстояние всегда положительно и не зависит от толщины линзы d ; одна из главных точек линзы совпадает с вершиной, а другая находится внутри линзы.

Плоско-вогнутая линза (рис. 17, *з*) имеет одну плоскую, а другую вогнутую поверхности. Если $r_1 = \infty$, то $r_2 > 0$. В этом случае:

$$f' = -\frac{r_2}{n-1}; \quad S(H) = \frac{d}{n}; \quad S'(H') = 0.$$

Линза рассеивающая, ее заднее фокусное расстояние не зависит от толщины.

Вогнуто-выпуклая линза, или положительный мениск (рис. 17, *д*), ограничена поверхностями с одинаковыми знаками кривизны. Радиус выпуклой поверхности по абсолютной величине меньше радиуса вогнутой поверхности, например, $r_1 > 0$, $r_2 > 0$ и $r_1 < r_2$. Фокусное расстояние $f' > 0$, линза собирающая; $S(H) < 0$, следовательно, вторая главная точка находится за выпуклостью вогнутой стороны.

Выпукло-вогнутая линза, или отрицательный мениск (рис. 17, *е*), ограничена поверхностями с одинаковыми знаками кривизны. Радиус выпуклой поверхности больше радиуса вогнутой поверхности.

§ 15. ТОНКИЕ ЛИНЗЫ. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ ИЗ ТОНКИХ ЛИНЗ. ТЕЛЕОБЪЕКТИВ

Если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей, то такая линза называется *тонкой*. Главные плоскости в тонкой линзе совпадают.

Для тонких линз можно положить $d = 0$, и формула (I,73) примет вид

$$f' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (I,79)$$

Сложные оптические системы могут быть представлены в виде системы тонких линз.

Пусть система из двух тонких линз в воздухе задана кардинальными точками F_1, H_1, F_1' и F_2, H_2, F_2' , расстояние между главными плоскостями H_1 и H_2 равно d (рис. 18, *а*).

Направим в систему луч AB , параллельный оптической оси. Преломившись в точке B , луч пойдет по направлению BF_1' , но, преломившись в точке C , он пересечет оптическую ось в точке F' — заднем фокусе эквивалентной системы. Для построения задней главной плоскости системы H' продолжим сопряженные лучи AB и $F'C$ до пересечения в точке D . Отрезок $H'F' = f'$ равен заднему фокусному расстоянию эквивалентной системы.

Из рис. 18, *а* следует

$$-\Delta = f_1' - f_2 - d.$$

Учитывая, что в нашем случае $-f_2 = f_2'$ и подставляя значение оптического интервала в уравнение (I,55), получим

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d}. \quad (I,80)$$

Оптическая сила эквивалентной системы определяется по формуле

$$\varphi' = \varphi_1' + \varphi_2' - d\varphi_1'\varphi_2'. \quad (I,81)$$

Если в системе тонкие линзы соприкасаются, то $d = 0$, и формула (I,81) принимает вид

$$\varphi' = \varphi_1' + \varphi_2'.$$

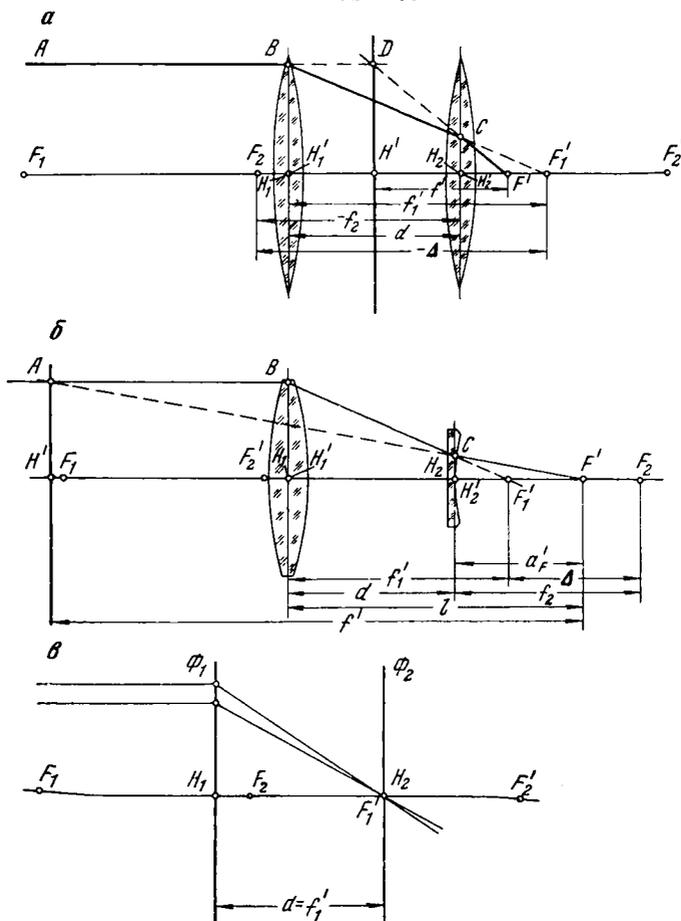


Рис. 18. Системы тонких линз

Рассмотрим частный случай, когда система состоит из двух тонких линз в воздухе — положительной и отрицательной. Пусть отрицательная линза находится на расстоянии $d < f_1'$ от положительной линзы (рис. 18, б).

Луч AB , параллельный оптической оси, после преломления в точке B первой линзы получит направление BF_1' ; в точке C второй

линзы он преломится, пойдет по линии CF' и пересечет оптическую ось в заднем фокусе эквивалентной системы F' . Заднюю главную плоскость эквивалентной системы H' построим графически, найдя точку A пересечением сопряженных лучей AB и $F'C$. Отрезок $H'F' = f'$ есть заднее фокусное расстояние эквивалентной системы.

Из рис. 18, б видно, что оптический интервал $\Delta = d + f_2 - f_1 = d - f_1 - f_2'$, поэтому с учетом выражения (I,55)

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1 + f_2' - d}. \quad (I,80a)$$

В данной оптической системе главная задняя плоскость H' вынесена вперед за пределы системы в пространство предметов и поэтому эквивалентное заднее фокусное расстояние f' больше интервала l между передней преломляющей поверхностью и плоскостью изображения. Это очень важно для получения фотографических объективов с большим фокусным расстоянием при небольших размерах l камеры. Такие объективы, состоящие из положительной и отрицательной систем, называются телеобъективами.

Из подобия треугольников $AH'F'$ и CH_2F' можно написать

$$\frac{AH'}{CH_2} = \frac{f'}{a_F'},$$

а из подобия треугольников BH_1F_1' и CH_2F_1' следует, что

$$\frac{BH_1}{CH_2} = \frac{f_1'}{f_1' - d}.$$

По построению $AH' = BH_1$, следовательно,

$$\frac{f'}{a_F'} = \frac{f_1'}{f_1' - d},$$

откуда

$$a_F' = f' (1 - d\varphi_1'), \quad (I,82)$$

где

$$\varphi_1' = \frac{1}{f_1'}.$$

После подстановки в последнее равенство значения f' из формулы (I,80), будем иметь

$$a_F' = \frac{f_2' (f_1' - d)}{f_1 + f_2' - d}. \quad (I,83)$$

Длина системы l определяется по формуле

$$l = d + a_F' = d + f' \left(1 - \frac{d}{f_1'} \right) \quad (I,84)$$

или, учитывая выражение (I,83),

$$l = \frac{f_1' f_2' + f_1' d - d^2}{f_1 + f_2' - d}.$$

Последнее равенство с учетом формулы (I,80) можно привести к виду

$$l = f' + d\varphi_2' a_F'. \quad (I,85)$$

В телеобъективе должно соблюдаться неравенство

$$l < f'.$$

Для соблюдения этого неравенства необходимо, чтобы вторая линза была рассеивающей (т. е. чтобы $\varphi_2' < 0$).

Из уравнения (I,81) следует, что при одних и тех же компонентах в зависимости от расстояния d между этими компонентами мы можем получить телеобъективы с различными фокусными расстояниями f' .

Если задаваться величинами f_1' , f_2' и f' , то расстояние между компонентами d можно определить по формуле (I,81)

$$d = f_1' + f_2' - \frac{f_1' f_2'}{f'}. \quad (I,86)$$

Рассмотрим еще одну эквивалентную систему из двух тонких линз (рис. 18, е).

Пусть две системы с оптическими силами φ_1 и φ_2 заданы кардинальными точками F_1, H_1, F_1' и F_2, H_2, F_2' .

Вторая система (линза) расположена относительно первой так, что ее главная точка H_2 совмещена с задним фокусом F_1' первой системы.

Применяя формулу (I,81) для нашего случая, напишем

$$\varphi' = \varphi_1 + \varphi_2 - f_1' \varphi_1 \varphi_2.$$

Если учесть, что $\varphi_1 = \frac{1}{f_1'}$, то $\varphi' = \varphi_1$, т. е. вторая система не влияет в этом случае на фокусное расстояние эквивалентной системы.

Система (линза), помещаемая в задней фокальной плоскости первой системы, называется коллективом или коллектором. С помощью такой положительной системы, устанавливаемой в плоскости действительного промежуточного изображения системы, наклонные пучки лучей отклоняются к оптической оси, а с помощью отрицательной, наоборот, наклонные пучки лучей отклоняются от оптической оси.

B²⁰

§ 16. ПОНЯТИЕ О ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ДИАФРАГМЕ. ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЗРАЧКИ

Из всех лучей, исходящих из точки предмета, в образовании изображения данной точки участвуют только те лучи, которые проходят всю систему, достигая изображения. Чем больше лучей от каждой точки поверхности предмета пройдет через систему, тем ярче будет изображение, так как большее количество световой энергии будет участвовать в построении этого изображения.

Реальные оптические системы имеют конечные размеры, поэтому через них проходят не все лучи, исходящие из точек предмета, а некоторая их часть. Пучки лучей, входящие в оптическую систему, ограничиваются оправами линз и специальными диафрагмами. В центрированных системах центры отверстий диафрагм совмещают с оптическими осями. Чтобы определить, какая диафрагма или оправа влияет на ограничение пучков лучей, нужно найти изображения всех вещественных диафрагм, включая и оправы линз, построенные оптическими системами, составляющими эквивалентную систему.

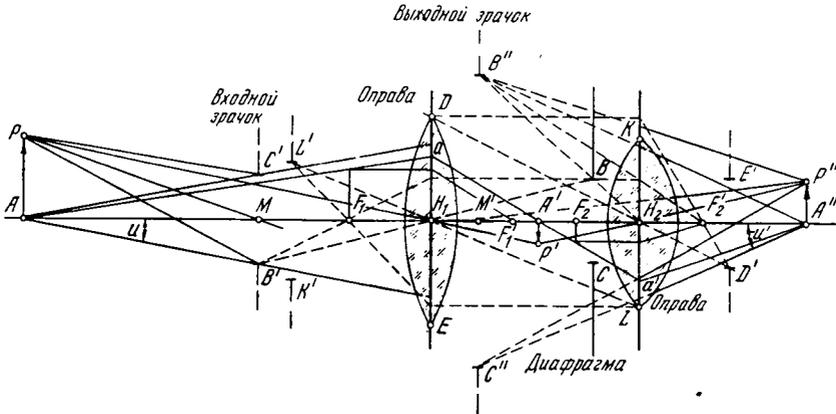


Рис. 19. Апертурная диафрагма

Пусть центрированная система состоит из двух линз DE и KL и диафрагмы BC . Построим изображение $A'P'$ предмета AP , зная положения кардинальных точек F_1, H_1, F'_1 и F_2, H_2, F'_2 и применяя правила § 11.

Построим далее изображения оправ DE, KL и диафрагмы BC . Изображение оправы DE через первую линзу совпадает с самой оправой DE , а через вторую линзу KL будет действительным изображением $D'E'$.

Действительное изображение $K'L'$ оправы KL , построенное с помощью первой линзы, получается в пространстве предметов, а с помощью второй линзы совпадает с самой оправой KL .

Действительное изображение $B'C'$ диафрагмы BC , построенное с помощью первой линзы, находится в пространстве предметов, а мнимое изображение $B''C''$, построенное с помощью второй линзы (предмет располагается между фокусом F_2 и главной точкой H_2), находится в пространстве изображений.

Для того чтобы выяснить, какая вещественная диафрагма или оправа ограничивает углы u пучков, входящих в оптическую систему, нужно найти то из изображений вещественных диафрагм или оправ, построенных в пространстве предметов, которое из осевой точки A будет видно под наименьшим углом u . Из рис. 19 видно, что

таким изображением будет $B'C'$ — изображение вещественной диафрагмы BC .

По аналогии со зрачком глаза, ограничивающим пучки световых лучей, входящих в глаз, входное отверстие $B'C'$ называется входным зрачком оптической системы.

Угол $u = MAB'$, образованный крайним лучом AB' пучка, исходящего из точки A , называется передним апертурным углом.

В пространстве изображений находится изображение $B''C''$ входного зрачка $B'C'$ оптической системы с центром в точке M' ($B'C'$ и $B''C''$ сопряжены, так как являются изображениями одной и той же вещественной диафрагмы BC). При этом из всех изображений вещественных диафрагм в пространстве изображений $B''C''$ видно из точки A'' под наименьшим углом u' , и все лучи пучков, исходящих из точек A и P , после прохождения системы должны заполнить изображение $B''C''$ и сойтись в точках A'' и P'' .

Изображение $B''C''$ входного зрачка $B'C'$ называется выходным зрачком системы.

Крайний луч $C''A''$ пучка, сходящегося в точке A'' , образует с оптической осью угол $u' = M'A''C''$, называемый задним апертурным углом системы.

Лучи AM , PM и $A''M'$, $P''M'$, проходящие через центры M и M' входного и выходного зрачков, исходящие из точек A и P предмета и сходящиеся в точках A'' и P'' изображения, называются главными лучами.

Вещественная диафрагма, изображение которой в пространстве предмета оказалось входным зрачком, а в пространстве изображений выходным зрачком, называется действующей или апертурной диафрагмой.

Следовательно, в нашем случае диафрагма BC — это действующая диафрагма.

Действующая диафрагма может находиться:

в пространстве предметов, где она служит входным зрачком;
в пространстве изображений, где она является выходным зрачком;

в междулинзовом пространстве (см. рис. 19), когда входным зрачком является оптическое изображение действующей диафрагмы, полученное при обратном ходе лучей, проходящих через оптическую часть системы, предшествующую действующей диафрагме, а выходным зрачком — оптическое изображение, полученное при прямом ходе лучей, проходящих через оптическую часть системы, расположенную за действующей диафрагмой.

§ 17. ДИАФРАГМА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ

Допустим, что в пространстве предметов, кроме входного зрачка BC с центром в точке D , имеется еще диафрагма M_1M_2 , ограничивающая поле зрения прибора (например, оправы первой линзы,

рис. 20, а). Такая диафрагма называется **входным окном** или **люком**.

Пучок лучей, исходящий из осевой точки A , проходит эту диафрагму свободно. Если точку A перемещать в плоскости предмета вверх от оптической оси, то, достигнув точки A_1 , мы обнаружим, что это крайнее положение светящейся точки, от которого во входной зрачок пройдут все лучи. Если точку A перемещать еще выше, то часть лучей начнет срезаться краем M_1 входного окна, при этом в положении A_2 будет срезана половина лучей, а в положении A_3 ни один луч, исходящий из точки, не пройдет через входной зрачок.

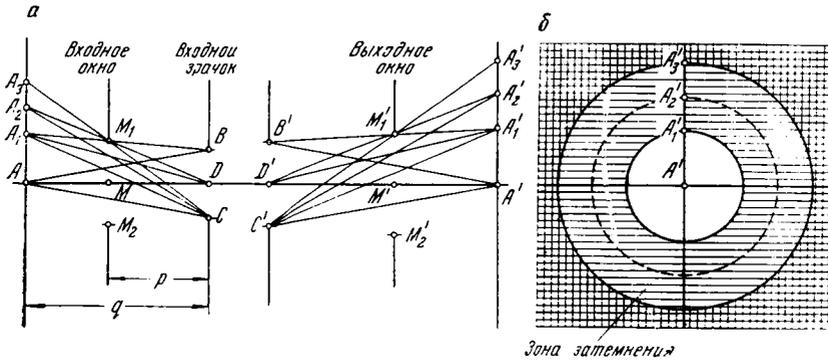


Рис. 20. Вьюетирование и полевая диафрагма

Следовательно, входное окно ограничивает поле зрения, постепенно снижая освещенность изображения до нуля к краям поля зрения системы. Это явление называется **затемнением** или **вьюетированием**.

На рис. 20, б показана плоскость изображения, в виде зон, ограниченных окружностями, проведенными из точки A' радиусами $A'A_1'$, $A'A_2'$, $A'A_3'$.

В центральной зоне, ограниченной окружностью радиусом $A'A_1'$, наблюдается полная освещенность. В зоне, ограниченной окружностями с радиусами $A'A_1'$ и $A'A_2'$, освещенность изображения падает от полной до 50%, а в зоне, ограниченной окружностями с радиусами $A'A_2'$ и $A'A_3'$ — от 50% до 0. Зона, ограниченная окружностями с радиусами $A'A_1'$ и $A'A_3'$, называется **зоной затемнения**. За пределами окружности радиусом $A'A_3'$ освещенность равна нулю, и изображения точек, расположенных с внешней стороны этой окружности, оптическая система не построит.

Изображение $M'_1M'_2$ входного окна M_1M_2 , которое строит оптическая система в пространстве изображений, называется **выходным окном** системы. Выходное окно ограничивает пучки, сходящиеся во внеосевых точках A'_2 , A'_3 и т. д.

Для человеческого глаза снижение освещенности изображения на 50% практически не ощутимо. Поэтому обычно в оптических системах допускается падение освещенности до 50%.

Из подобия треугольников $A_1A_3M_1$ и BCM_1 (см. рис. 20, а) следует, что

$$A_1A_3 = BC \frac{q-p}{p}.$$

Следовательно, зона затемнения будет равна нулю, если:

$BC = 0$, т. е. когда входной зрачок превращается в точку D и через него проходят только главные лучи, при этом освещенность изображения будет крайне слабой;

$p = q$, т. е. когда входное окно совмещено с плоскостью предмета, так как в этом случае входной зрачок будет заполняться полностью лучами, исходящими от любой точки плоскости предмета, ограниченной входным окном.

Очевидно, что для получения яркого равномерно освещенного изображения приемлем только второй случай. Для совмещения входного окна с плоскостью предмета, а следовательно, выходного окна с плоскостью изображения достаточно совместить диафрагму поля зрения с плоскостью промежуточного действительного изображения, так как эти три плоскости сопряжены между собой. Для оптической системы, показанной на рис. 19, диафрагму поля зрения следует поместить в плоскость действительного промежуточного изображения $A'P'$.

Если в оптической системе не образуется промежуточного действительного изображения, то полностью устранить виньетирование не представляется возможным.

Поле зрения называют ту часть пространства предметов, которую можно наблюдать через данную систему или которую изображает данная система.

Поле зрения оптических систем характеризуют угловой мерой при наблюдении значительно удаленных предметов и линейной мерой при наблюдении близко расположенных предметов.

Поле зрения ограничивается диафрагмой поля зрения. Размер диафрагмы определяется:

величиной резкого изображения, пригодного для практических целей;

величиной изображения с достаточной освещенностью.

Центрированные системы дают изображения в виде круга. Угол, под которым виден диаметр полевой диафрагмы из центра выходного зрачка, является угловой мерой поля зрения, а сторона квадрата, вписанного в полевую диафрагму, является линейной мерой поля зрения.

Г Л А В А II

ОПТИЧЕСКИЕ ЧАСТИ
МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

§ 18. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ
МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В геодезических и маркшейдерских инструментах широко применяются различные оптические системы: плоско-параллельные пластинки в виде зеркал, защитных стекол, стеклянных лимбов, шкал; призмы полного внутреннего отражения для изменения направления хода лучей и для оборачивания изображений; оптические клинья в оптических микрометрах и дальнометрах двойного изображения; центрированные системы в виде луп и микроскопов для рассматривания мелких предметов (например, отсчетных шкал и шкал лимбов) на близких расстояниях и в виде зрительных труб для рассматривания удаленных предметов.

Микроскопы и зрительные трубы предназначены для различных целей. Это сложные системы, состоящие из оптических систем, выполняющих аналогичные функции: объектива, окуляра и визирных приспособлений (шкал и сеток нитей).

Объективом называется линза или система линз оптического прибора, обращенная к предмету и строящая действительное его изображение.

Окуляр служит для увеличения действительного изображения, образованного объективом, и используется как лупа, с той лишь разницей, что через лупу рассматривается предмет, а через окуляр его изображение, построенное объективом.

Лупа, микроскоп и зрительная труба относятся к визуальным оптическим приборам. К ним предъявляется следующее требование: лучи, идущие от предмета, после прохождения через эти системы должны поступать в глаз параллельными пучками. При этом глаз не будет аккомодировать и, следовательно, утомляться. В этом случае мнимое изображение находится в бесконечности, однако глаз видит его на расстоянии 250—300 м.м. Это объясняется психо-

логией восприятия изображения, образованного на сетчатке глаза. Одна из характеристик визуальных приборов — в и д и м о е у в е л и ч е н и е; это отношение размера изображения предмета l'_2 , полученного на сетчатке глаза при помощи прибора, к размеру изображения того же предмета l' , полученного на сетчатке глаза при наблюдении невооруженным глазом,

$$\Gamma = \frac{l'_2}{l'}. \quad (II, 4)$$

В маркшейдерских и геодезических приборах, кроме того, применяются оптические компенсаторы, позволяющие автоматически выводить визирную ось зрительной трубы нивелира в горизонтальное положение, приводить место нуля вертикального круга к нулю и т. д.

Компенсаторы будут рассмотрены при описании конкретных инструментов, в которых они применяются. В этой главе мы рассмотрим теорию, свойства и методы исследования лупы, микроскопа и зрительной трубы.

§ 19. ЛУПА

При хорошей освещенности и достаточной контрастности предмета нормальный глаз может различать детали, угловая величина α которых равна или больше $60''$. Благоприятной для наблюдения

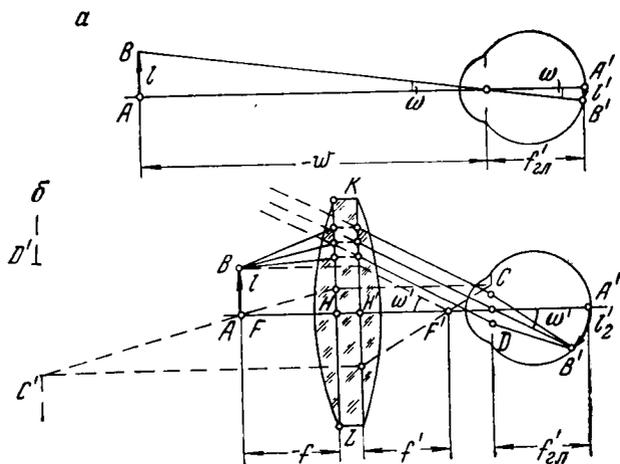


Рис. 21. Ход лучей в системе «лупа — глаз»

является угловая величина предмета $\alpha' = 3'$, называемая у г л о м у д о б н о й р а з л и ч и м о с т ь ю. Наблюдения мелких предметов в таких условиях обеспечивают лупы и микроскопы.

При рассматривании предмета $AB = l$ невооруженным глазом его помещают на расстоянии $w = -250$ мм от глаза (рис. 21, а),

поэтому величина изображения $A'B' = l'$ предмета на сетчатке глаза

$$l' = \frac{l f'_{\text{гл}}}{w}, \quad (\text{II}, 2)$$

где $f'_{\text{гл}}$ — заднее фокусное расстояние глаза.

Лупа увеличивает изображение предмета так, что размеры этого изображения, образуемого на сетчатке глаза, оказываются достаточными для различения мелких деталей. Чтобы обеспечить неутомляемость глаза при наблюдении через лупу, рассматриваемый предмет помещают в передней фокальной плоскости лупы. В этом случае изображение предмета оказывается в бесконечности, и в глаз поступают лучи света от точек предмета параллельными пучками.

В соответствии с рис. 21, б величина изображения $A'B' = l'_2$ предмета AB на сетчатке глаза при рассмотрении через лупу будет равна

$$l'_2 = -\frac{l f'_{\text{гл}}}{f'}, \quad (\text{II}, 3)$$

где f' — заднее фокусное расстояние лупы.

Видимое увеличение лупы с учетом выражений (II,2) и (II,3) определится по формуле

$$\Gamma = \frac{l'_2}{l'} = -\frac{w}{f'}. \quad (\text{II}, 4)$$

Если принять $w = 250$ мм, формула (II,4) примет вид

$$\Gamma = \frac{250}{f'}. \quad (\text{II}, 5)$$

Если оптическую систему, изображающую лупу, принять за изображение микроскопа (см. рис. 21, б), то формула (II,5) будет определять видимое увеличение микроскопа.

В системе «глаз — лупа» действующей (апертурной) диафрагмой и зрачком выхода является зрачок глаза CD , а зрачком входа — действительное изображение $C'D'$ зрачка глаза, полученное через лупу при обратном ходе лучей. Окном (люком) входа и выхода одновременно является оправа лупы; так как она не совпадает с плоскостью предмета AB , то ограничение поля зрения происходит с венъетированием. Величина поля зрения при этом зависит от положения зрачка глаза относительно лупы. Наибольшая величина поля зрения лупы соответствует положению зрачка глаза в заднем фокусе F' лупы. В лупах, состоящих из одной линзы, поле зрения может достигать 10—15°, а в сложных лупах до 40°.

Разрешающая способность системы «глаз — лупа» определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\alpha}{F'}, \quad (\text{II}, 6)$$

где α — разрешающая способность глаза, принимаемая обычно равной 60";

Γ — видимое увеличение лупы.

Однoliniзoвые лупы могут давать хорошее изображение при видимых увеличениях до $10\times$. Многoлинзoвые лупы могут давать хорошие изображения даже при увеличениях до $20\times$, но они применяются редко из-за малого поля зрения и малого расстояния между предметом и лупой.

Видимые увеличения луп, применяемых в отсчетных приспособлениях, рассчитывают так, чтобы изображение наименьших делений шкалы составляло $1,5\text{--}2\text{ мм}$.

§ 20. МИКРОСКОП

Микроскоп, как и лупа, служит для рассматривания мелких предметов. Микроскопы обычно применяются в тех случаях, когда нужно получить увеличение больше $12\text{--}15\times$. Микроскоп является сложной оптической системой, состоящей из объектива и окуляра.

Объектив KL (рис. 22) строит действительное обратное изображение $A'B'$ предмета AB в передней фокальной плоскости окуляра

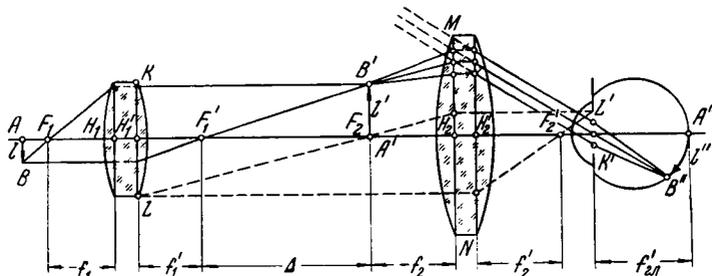


Рис. 22. Оптическая система «микроскоп — глаз»

MN . В этой плоскости можно поместить плоско-параллельную пластинку со шкалой или сеткой нитей в виде биссектора. Промежуточное действительное изображение предмета вместе со шкалой рассматривается через окуляр, работающий как лупа. При этом в глаз поступают лучи в виде параллельных пучков, и хрусталик глаза образует на сетчатке изображение предмета $A''B'' = l''$. Глаз при этом не утомляется, так как он аккомодирован на бесконечность (спокойное состояние глаза).

Рассматриваемый предмет AB помещается перед объективом в интервале между одинарным и двойным фокусными расстояниями. Поэтому промежуточное изображение получается увеличенным на расстоянии оптического интервала Δ за задним фокусом F_1' объектива.

Действующей диафрагмой и зрачком входа в микроскопе обычно является оправа первой или последней линзы объектива (KL , рис. 22), а зрачком выхода — действительное изображение этой оправы, построенное окуляром $K'L'$.

Поле зрения микроскопа ограничивается полевой диафрагмой, совмещаемой с промежуточным изображением $A'B'$ в передней фокальной плоскости окуляра.

При рассматривании предмета через микроскоп зрачок глаза совмещают со зрачком выхода $K'L'$ микроскопа.

Видимое увеличение Γ микроскопа определяется по формуле (II,5)

$$\Gamma = \frac{250}{f'}$$

где f' — заднее фокусное расстояние микроскопа.

Если в формулу (II,5) подставить значение f' микроскопа, определяемое по формуле (I,55),

$$f' = -\frac{f_1 f_2'}{\Delta}$$

где f_1' и f_2' — задние фокусные расстояния объектива и окуляра; Δ — оптический интервал, то

$$\Gamma = -\frac{\Delta}{f_1'} \cdot \frac{250}{f_2'} \quad (\text{II,7})$$

Но $\frac{\Delta}{f_1'} = \Gamma_{об}$ — увеличение объектива, а $\frac{250}{f_2'} = \Gamma_{ок}$ — увеличение окуляра, поэтому формула видимого увеличения микроскопа примет вид

$$\Gamma = \Gamma_{об} \Gamma_{ок} \quad (\text{II,8})$$

В маркшейдерских и геодезических инструментах микроскопы применяются обычно в отсчетных приспособлениях и имеют общее увеличение не более $50\times$, при увеличении объектива $\Gamma_{об} = 3\times$.

Для облегчения юстировки в отсчетных устройствах часто применяют объективы микроскопов из двух компонентов. В соответствии с формулой (I,80) это позволяет изменять фокусное расстояние объектива за счет изменения расстояния d между компонентами его.

§ 21. ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА

Для рассматривания удаленных предметов в геодезических и маркшейдерских инструментах используют телескопическую систему (см. § 12) — зрительную трубу.

Наблюдатель видит через зрительную трубу пространство предметов под большим углом u' , чем невооруженным глазом (угол u). Поэтому все предметы кажутся приближенными к наблюдателю, а само пространство сжатым вдоль линии визирования.

Зрительная труба состоит из следующих основных оптических частей (рис. 23):

объектива KL , который строит действительное обратное изображение $A'B'$ удаленного предмета AB в своей задней фокальной плоскости;

окуляра MN , через который, как через лупу, рассматривают изображение $A'B'$, совмещенное с его передней фокальной плоскостью;

сетки нитей — плоско-параллельной пластинки, на которой выгравированы пересекающиеся линии и которая расположена в передней фокальной плоскости окуляра.

На рис. 23 показан ход лучей в астрономической зрительной трубе Кеплера.

Оправа объектива KL является действующей диафрагмой и входным зрачком, а ее изображение $K'L'$, построенное окуляром, — выходным зрачком. Диафрагма OP , являющаяся оправой сетки нитей и совмещаема с плоскостью промежуточного изображения $A'B'$, служит полевой диафрагмой. Следовательно, ограничение поля зрения происходит без веньетирования.

На рис. 23 апертурные углы пространства предметов и пространства изображения соответственно обозначены u и u' , диаметр полевой диафрагмы $OP = 2l'$ и фокусные расстояния объектива и окуляра f'_1 и f'_2 .

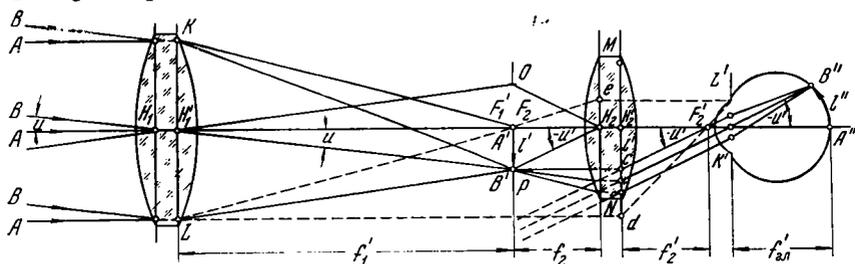


Рис. 23. Оптическая система «зрительная труба — глаз».

Угловое увеличение γ телескопической системы в воздухе определяется по формуле (I,65).

С другой стороны, отношение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} \quad (\text{II},9)$$

называется видимым увеличением системы.

Из рис. 23 находим:

$$\operatorname{tg} u = -\frac{l'}{f'_1} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} u' = \frac{l'}{f'_2},$$

поэтому

$$\Gamma = \gamma = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (\text{II},10)$$

Отрицательный знак показывает, что труба Кеплера дает обратное изображение.

Наличие сетки нитей, совмещенной с плоскостью промежуточного изображения, позволяет применять зрительную трубу Кеплера в геодезических и маркшейдерских инструментах. При этом обратное изображение, создаваемое трубой, не является недостатком, так как крест сетки нитей наводят на специальные знаки, веши и рейки.

Изображение предмета, расположенного на конечном расстоянии от трубы, получается за задней фокальной плоскостью объектива

на расстоянии оптического интервала Δ . Это расстояние тем больше, чем ближе к трубе находится наблюдаемый предмет. Для получения в этом случае резкого изображения предмета на сетчатке нормального глаза необходимо совместить переднюю фокальную плоскость окуляра с плоскостью изображения, построенного объективом.

Труба Кеплера — это труба с внешней фокусировкой. Она состоит из объективного колена 1 и окулярного колена 2, которое может перемещаться внутри объективного колена при помощи гребенки 3, трибки (шестеренки) 4 с маховичком — кремальерой 5 (рис. 24, а).

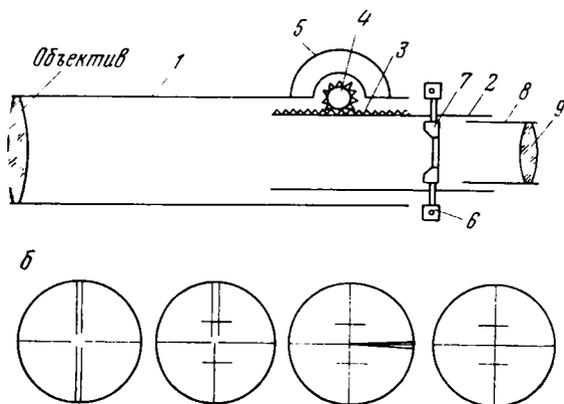


Рис. 24. Схема конструкции трубы Кеплера.
Виды сеток нитей

В передней фокальной плоскости окуляра в окулярном колене при помощи винтов 6 укреплена полевая диафрагма 7 с сеткой нитей.

На рис. 24, б показаны виды сеток нитей, рекомендованные для теодолитов и нивелиров ГОСТ 10529—63 и 10528—63.

Оптический интервал Δ может быть определен по формуле Ньютона (1,38)

$$\Delta = \frac{f_1'^2}{x_1},$$

где f_1' — фокусное расстояние объектива, мм;

x_1 — расстояние от переднего фокуса объектива до предмета, мм.

При фокусировании на предметы, лежащие на конечных расстояниях, телескопичность нарушается, так как оптический интервал $\Delta \neq 0$ (табл. 1). Отклонение от телескопичности становится значительным на расстояниях 10 м и менее.

Фокусирование трубы на конечные расстояния вызывает незначительные изменения поля зрения трубы, увеличения и диаметра выходного зрачка, которые, как правило, не учитываются. Заднее фокусное расстояние при нулевой аккомодации у зрачка близорукого

глаза меньше, а у дальнозоркого больше, чем у нормального. Поэтому для обеспечения длительного наблюдения нормальным, близоруким и дальнозорким глазом необходимо, чтобы при нормальном глазе из лупы (окуляра) выходили пучки параллельных лучей; при близоруким — пучки расходящихся лучей; при дальнозорком — пучки сходящихся лучей. Для этого предмет следует располагать перед лупой (или действительное изображение перед окуляром): при нормальном глазе — в передней фокальной плоскости лупы (окуляра); при близоруким глазе — между передним фокусом и лупой; при дальнозорком глазе — перед передним фокусом лупы.

Таблица 1

Расстояние до предмета, м	Оптический интервал окуляра Δ , мм	
	$f'_1=124$ мм	$f'_1=200$ мм
500	0,031	0,080
100	0,153	0,400
50	0,306	0,800
25	0,615	1,600
10	1,537	4,000
4	3,844	10,000
2	7,688	20,000

В связи с этим необходимо, чтобы окуляр мог перемещаться относительно сетки нитей. Достигается это при помощи окулярной трубки 8, в которой помещен окуляр 9 и которая может перемещаться относительно окулярного колена (см. рис. 24, а).

Преимущества трубы Кеплера: простота конструкции и сравнительно малые потери яркости.

Недостатки: наличие поперечных смещений визирной оси при перефокусировках трубы; наличие зазора между объективным и окулярным коленами, через который могут проникать в трубу пыль и влага; изменение длины трубы при перефокусировках, что может препятствовать переводу ее через зенит в одну из сторон.

Все современные маркшейдерские и геодезические инструменты снабжены зрительными трубами с внутренней фокусировкой.

Если в формуле отрезков (I,41)

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$$

заднее фокусное расстояние объектива f' величина постоянная, то при изменении расстояния a от объектива до предмета (см. рис. 12) должно меняться расстояние a' от объектива до изображения. Если расстояние a' постоянно, то при изменении расстояния a должно меняться фокусное расстояние f' объектива. В первом случае мы имеем трубу Кеплера, во втором — трубу с внутренней фокусировкой.

Если в трубе Кеплера заменить обычный объектив телеобъективом (см. § 15) с перемещающимся вдоль оптической оси вторым (отрицательным) компонентом, то получим трубу с внутренней фокусировкой.

Из формулы (I,80а) следует, что фокусное расстояние f' телеобъектива, состоящего из положительного и отрицательного компо-

ментов с фокусными расстояниями f'_1 и f'_2 , зависит от расстояния между компонентами d :

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d},$$

откуда получается формула (I,86)

$$d = f'_1 + f'_2 - \frac{f'_1 f'_2}{f'}.$$

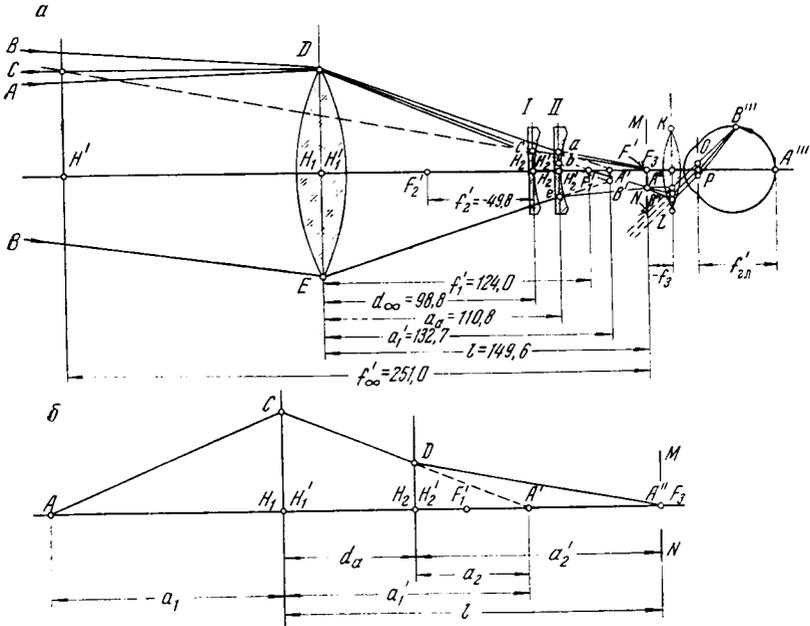


Рис. 25. Ход лучей в зрительной трубе с внутренней фокусировкой

Расстояние d , вычисляемое по формуле (I,86), соответствует пересечению преломленного телеобъективом луча в его заднем фокусе F' на расстоянии l от положительного компонента, если этот луч CD входит в телеобъектив параллельно оптической оси. Это расстояние между компонентами телеобъектива обозначим через d_∞ , а соответствующее ему фокусное расстояние телеобъектива через f'_∞ (рис. 25, а).

Для того чтобы изображение предмета, находящегося на конечном расстоянии от трубы, получилось на расстоянии l от неподвижного компонента DE , нужно фокусирующую линзу I расположить относительно неподвижного компонента на расстоянии d_a . Выведем формулу для определения d_a :

Пусть $H_1 H'_1$ — главная точка объектива (рис. 25, б); $H_2 H'_2$ — главная точка фокусирующей линзы; MN — сетка нитей; A — предмет-

расположенный на расстоянии a_1 от объектива; A' — изображение, даваемое объективом на расстоянии a'_1 ; d_a — расстояние между компонентами телеобъектива, при котором изображение A'' точки A , строится телеобъективом в плоскости сетки нитей MN ; l — оптическая длина трубы; a_2 — расстояние между точкой A' и фокусирующей линзой и a'_2 — расстояние между фокусирующей линзой и изображением A'' точки A .

Из рис. 25, б находим

$$d_a = l - a'_2. \quad (II,11)$$

Определим a'_2 по формуле отрезков (I,44):

$$a'_2 = \frac{a_2 f'_2}{a_2 + f'_2},$$

где f'_2 — фокусное расстояние фокусирующей линзы;

$$a_2 = a'_1 - d_a.$$

Следовательно,

$$a'_2 = \frac{(a'_1 - d_a) f'_2}{(a'_1 - d_a) + f'_2}.$$

После подстановки a'_2 в формулу (II,11) и несложных преобразований получим квадратное уравнение относительно d_a :

$$d_a^2 - (a'_1 + l) d_a - f'_2 a'_1 + l (a'_1 + f'_2) = 0.$$

Решая это квадратное уравнение, получим

$$d_a = \frac{1}{2} [(a'_1 + l) - \sqrt{(a'_1 - l)(a'_1 - l + 4f'_2)}], \quad (II,12)$$

где

$$a'_1 = \frac{a_1 f'_1}{a_1 + f'_1}.$$

В формуле (II,12) перед корнем знак плюс опущен, так как удовлетворяющее задачу решение получается только при знаке минус.

В табл. 2 приведены результаты вычислений по формулам (I,85), (II,11) и (II,12) для трубы оптического теодолита с исходными параметрами f'_∞ , f'_1 , f'_2 , l .

Таблица 2

l , мм	f'_∞ , мм	f'_1 , мм	f'_2 , мм	d_∞ , мм	a_1 , м	a'_1 , мм	d_a , мм	$d_i - d_{i-1}$
149,6	251,0	124,0	-49,8	98,8	∞	—	—	2,1
—	239,3	—	—	—	10	125,6	100,9	3,4
—	205,1	—	—	—	4	128,0	104,3	6,5
—	168,7	—	—	—	2	132,7	110,8	

На рис. 25, а показано расположение оптических частей зрительной трубы с внутренней фокусировкой в соответствии с данными табл. 2 для крайних положений фокусирующей линзы при фокусировании на бесконечность (линза I) и на расстоянии 2 м (линза II). Очевидно, труба с внутренней фокусировкой принципиально не отличается от трубы Кеплера.

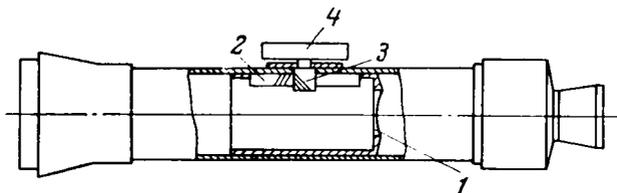


Рис. 26. Конструкция трубы с внутренней фокусировкой:

1 — фокусирующая линза; 2 — гребенка; 3 — шестерня (трибка); 4 — кремальера

К достоинствам трубы с внутренней фокусировкой относятся: большое фокусное расстояние объектива f' при небольшой оптической длине трубы l ;

стабильность оси визирования;

герметичность системы;

неизменность длины трубы при перефокусировках.

На рис. 26 показана конструкция трубы с внутренней фокусировкой.

В-18 § 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

Увеличение зрительной трубы должно соответствовать разрешающей силе объектива, а в нивелирах, кроме того, соответствовать еще цене деления уровня. Для проверки этих соотношений возникает необходимость определения увеличения зрительной трубы.

В соответствии с формулой (II,10) видимое увеличение зрительной трубы

$$\Gamma = - \frac{f'_1}{f'_2}.$$

Учитывая, что на рис. 27, а $KL = A'B'$ (по построению) и что треугольники ABF'_1 и KLF'_1 подобны, можно написать

$$\Gamma = \frac{AB}{A'B'}, \quad (\text{II,13})$$

т. е. видимое увеличение трубы равно отношению диаметров входного AB и выходного $A'B'$ зрачков.

Поэтому увеличение трубы может быть определено следующим способом: наводят трубу на освещенный светлый фон и фокусируют ее на бесконечность; на восковке, которую подносят к окуляру,

получают резкое изображение выходного зрачка и с помощью измерителя и масштабной линейки определяют его диаметр; измеряют диаметр входного отверстия объектива, и по формуле (II,13) вычисляют увеличение трубы.

В практике для определения увеличения часто пользуются способом Галилея. Способ состоит в одновременном наблюдении рейки с делениями: одним глазом через исследуемую трубу, а другим глазом — непосредственно. При этом подсчитывают число делений n рейки, ограниченных полем зрения трубы. Подсчитывают также

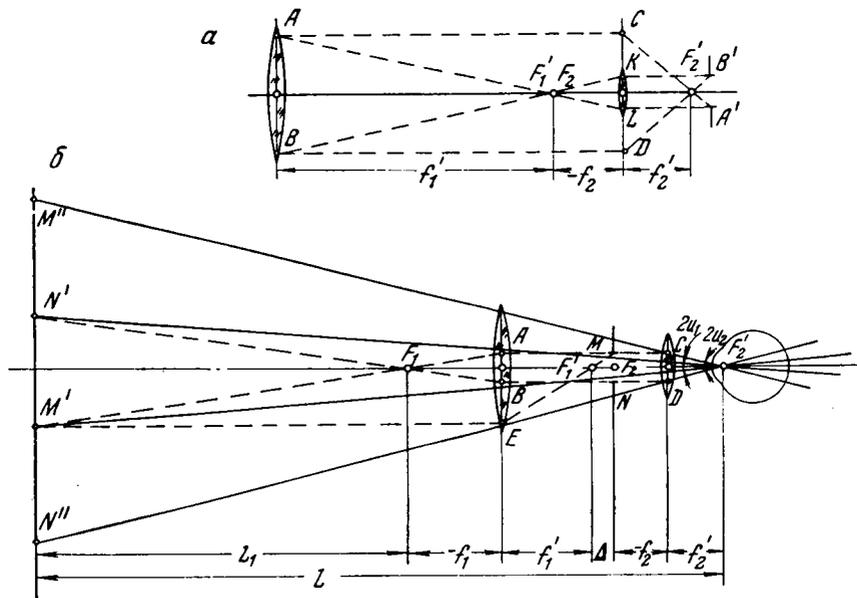


Рис. 27. Схема к определению телескопического увеличения

число делений n' рейки, рассматриваемых невооруженным глазом, в пределах поля зрения, наблюдаемого другим глазом через трубу. Так как труба при этом отфокусирована на конечное расстояние L , то мы получим частное значение увеличения трубы (рис. 27, б)

$$\Gamma' = \frac{n'}{n}. \quad (\text{II},14)$$

От частного увеличения Γ' можно перейти к телескопическому увеличению Γ .

На рис. 27, б $M'N'$ — действительное изображение полевой диафрагмы MN , построенное объективом AB в обратном ходе лучей, — оно ограничивает число n делений, подсчитываемых через трубу; $2u_1$ — угол, под которым виден участок рейки $M'N'$ невооруженным глазом из точки F_2' ; $M''N''$ — мнимое изображение полевой диафрагмы MN , образованное окуляром CD и спроектированное

на рейку, — оно ограничивает на рейке число n' делений, видимых невооруженным глазом и подлежащих подсчету; $2u_2$ — угол, под которым из точки F'_2 виден участок рейки $M'N'$ через трубу; L — расстояние от рейки до заднего фокуса F'_2 окуляра; L_1 — расстояние от рейки до переднего фокуса F_1 объектива; f'_1 — заднее фокусное расстояние объектива; f'_2 — заднее фокусное расстояние окуляра.

В соответствии с формулой (II,9) частное видимое увеличение трубы

$$\Gamma' = \frac{\operatorname{tg} u_2}{\operatorname{tg} u_1}.$$

Из треугольников $M'N'F'_2$ и CDF'_2 с учетом того, что $MN = CD$ (по построению), следует, что

$$\operatorname{tg} u_1 = \frac{M'N'}{2L} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} u_2 = \frac{MN}{2f'_2}.$$

После подстановки этих значений в формулу (II,9) получим

$$\Gamma' = \frac{MN}{M'N'} \cdot \frac{L}{f'_2},$$

а так как из формулы (II,10) следует, что $f'_2 = \frac{f'_1}{\Gamma}$, то

$$\Gamma' = \frac{MN}{M'N'} \cdot \frac{L}{f'_1} \Gamma,$$

откуда

$$\Gamma = \frac{M'N'}{MN} \cdot \frac{f'_1}{L} \Gamma'. \quad (\text{II,15})$$

Из подобия треугольников $M'N'F_1$ и ABF_1 и с учетом того, что $AB = MN$ (по построению), получим

$$MN = \frac{M'N'}{L_1} f'_1.$$

После подстановки значения MN в формулу (II,15) окончательно получим

$$\Gamma = \Gamma' \frac{L_1}{L}. \quad (\text{II,16})$$

B-19.

§ 23. ПОЛЕ ЗРЕНИЯ ТРУБЫ

Поле зрения зрительной трубы определяется углом $2u$ между крайними главными лучами, входящими в объектив, когда труба отфокусирована на бесконечность (рис. 28). Пространство предметов в виде конуса, образованного крайними главными лучами, будет наблюдаться через трубу.

Поле зрения трубы со стороны объектива называется объективным. Угол $2u'$, под которым мы видим полевую диафрагму MN через окуляр, называется окулярным.

Из рис. 28 видно, что объективное поле зрения трубы определяется по формуле

$$2 \operatorname{tg} u = \frac{MN}{f_1'},$$

а окулярное

$$2 \operatorname{tg} u' = -\frac{MN}{f_2'},$$

где MN — диаметр полевой диафрагмы.

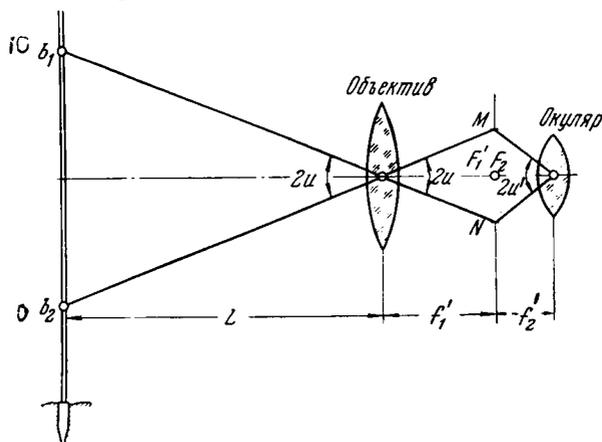


Рис. 28. Схема к определению поля зрения трубы

Поэтому можно написать

$$\frac{2 \operatorname{tg} u'}{2 \operatorname{tg} u} = -\frac{f_1'}{f_2'} = \Gamma$$

или для малых углов

$$\frac{2u'}{2u} = \Gamma$$

и окончательно

$$2u = \frac{2u'}{\Gamma}. \quad (\text{II}, 17)$$

Из формулы (II,17) следует, что объективное поле зрения трубы обратно пропорционально ее увеличению.

Окулярное поле зрения трубы зависит от оптической системы окуляра и может достигать величины $2u' = 60^\circ$.

Зрительные трубы характеризуются объективным полем зрения

$$2u = \frac{MN}{f_1'} \rho', \quad (\text{II}, 18)$$

где ρ' — число минут, содержащихся в радиане ($\rho' = 3438'$).

В табл. 3 приведены примеры увеличения и значения поля зрения для некоторых зрительных труб.

Инструмент	$\Gamma \times$	$2u$	$2u' = 2u\Gamma$
Теодолит ТОМ	18	2°	36°
ОТ-02М	30 и 40	$1^\circ 40'$ и $1^\circ 20'$	50° и 53°
Нивелир НВ-1	31	$1^\circ 25'$	$43^\circ 9'$
НБ-2	47	$50'$	$30^\circ 9'$

Поле зрения *труб угломерных инструментов* определяют следующим способом. Трубу наводят на удаленную точку дважды: первый раз — одним краем (верхним или правым) полевой диафрагмы, второй раз — противоположным (нижним или левым). После каждого наведения берут отсчеты N_1 и N_2 по вертикальному или горизонтальному лимбу. Угол поля зрения вычисляется по формуле

$$2u = N_1 - N_2. \quad (\text{II}, 19)$$

Для определения поля зрения *труб нивелиров* на расстоянии 50 м от нивелира устанавливают рейку перпендикулярно визирной оси трубы. Вертикальную нить трубы совмещают с осью рейки и берут отсчеты на рейке по нижнему b_1 и по верхнему b_2 краям полевой диафрагмы (см. рис. 28). Измеряют расстояние L от рейки до объекта и определяют угол поля зрения по формуле

$$2u = \frac{b_1 - b_2}{L} \rho. \quad (\text{II}, 20)$$

При фокусировании трубы на 50 м телескопичность практически не нарушается.

В-14 ✓

§ 24. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

Разрешающей способностью или разрешающей силой называется способность оптической системы изображать раздельно две точки. Разрешающая способность характеризуется наименьшим углом r , под которым видны раздельно эти точки. Поэтому, если принять разрешающую способность невооруженного глаза $r = 60''$, то разрешающую силу системы можно выразить формулой

$$r = \frac{60''}{\Gamma}. \quad (\text{II}, 21)$$

Разрешающая способность зрительной трубы определяется разрешающей способностью ее объектива. Значение предела разрешения для объектива согласно теории дифракции света зависит только от диаметра D входного зрачка и определяется по формуле

$$r_d = \frac{140''}{D}. \quad (\text{II}, 22)$$

Увеличение телескопической системы, при котором разрешающая сила объектива этой системы полностью используется глазом, называется *н о р м а л ь н ы м* *у в е л и ч е н и е м* Γ_n . При нормальном увеличении должно соблюдаться условие $r = r_d$, т. е.

$$\frac{60''}{\Gamma_n} = \frac{140''}{D},$$

откуда

$$\Gamma_n \approx 0,5D. \quad (\text{II}, 23)$$

Увеличение зрительных труб маркшейдерско-геодезических инструментов обычно в 1,5—2 раза больше нормального.

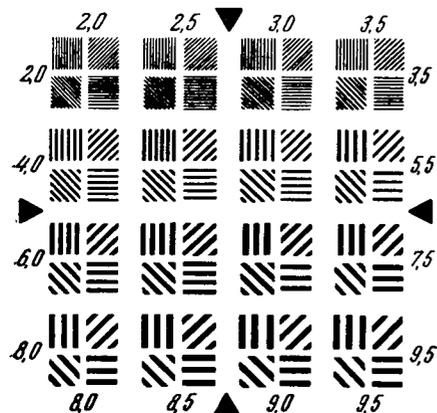


Рис. 29. Штриховая мира

Новые государственные стандарты на геодезические инструменты требуют, чтобы разрешающая сила r в центре поля зрения трубы, выраженная в секундах дуги, для зрительных труб всех инструментов, за исключением зрительных труб с зеркально-линзовой оптикой, была не более

$$r = k \frac{120}{D}, \quad (\text{II}, 24)$$

где k — коэффициент, равный 1,2; D — диаметр входного зрачка.

Разрешающую способность зрительных труб определяют опытным путем при помощи штриховых мир. Штриховая мира представляет собой изображение групп по четыре семейства штрихов, ориентированных под углом 45° друг к другу (рис. 29). В пределах одной группы штрихи и промежутки между ними имеют одинаковую ширину, а в пределах каждого семейства штрихи параллельны между собой.

Ширина штрихов от группы к группе изменяется в геометрической прогрессии. Мира могут содержать 16 или 25 групп. Между шириной штриха a каждой группы и разрешающей способностью r в угловой мере существуют зависимости

$$r = \frac{a}{L} \rho \quad (\text{II}, 25)$$

или

$$r = \frac{a}{f_k} \rho. \quad (\text{II}, 26)$$

В первом случае мира представляет собой таблицу, устанавливаемую на расстоянии L от исследуемой зрительной трубы. Во втором случае она представляет собой хорошо освещаемый диапозитив, устанавливаемый в задней фокальной плоскости объектива колли-

матора (см. § 32). Испытываемая зрительная труба устанавливается перед объективом коллиматора так, чтобы ее визирная ось была «совмещена» с продолжением визирной оси коллиматора. Часто за зрительной трубой устанавливается вспомогательная труба с четырехкратным увеличением.

Рассматривая миру через зрительную трубу, находят ту группу, штрихи которой еще отчетливо различаются. Угол, под которым видны штрихи этой группы, и есть разрешающая сила испытываемой зрительной трубы.

Для удобства работы каждая группа штрихов вместо номера обозначается значением разрешающей силы в секундах дуги, соответствующей этой группе.

§ 25. ПОТЕРИ СВЕТА В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ. ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИКИ

Потери света при прохождении его через оптические системы складываются из потерь на отражение при преломлении на полированных поверхностях оптических деталей и потерь на поглощение при прохождении светом толщи вещества деталей. Отношение светового потока, пропущенного данной оптической системой, к потоку, упавшему на входной зрачок системы, называется коэффициентом пропускания прибора $\tau_{пр}$.

Часть световой энергии, которая рассеивается на границе преломления, определяется коэффициентом отражения ρ . Коэффициентом отражения ρ называется отношение светового потока F_r , отраженного от преломляющей поверхности оптической детали, к световому потоку F , упавшему на нее. Коэффициент отражения для светового потока, отраженного при нормальном падении его на преломляющую поверхность, может быть вычислен по формуле Френеля

$$\rho = \frac{F_r}{F} = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2, \quad (II, 27)$$

где n и n' — показатели преломления сред.

Из формулы (II, 27) следует, что величина коэффициента отражения тем больше, чем больше разница в значениях показателей преломления сред n и n' . Поэтому наибольшее значение ρ оказывается на преломляющих поверхностях между воздухом и стеклом.

Средний показатель преломления для оптического стекла крон $n' = 1,5$, а для флинта $n' = 1,63$. Поэтому, если в формуле (II, 27) принять $n = 1$ и $n' = 1,5$, то $\rho_{кр} = 0,04$, а если принять $n = 1$ и $n' = 1,63$, то $\rho_{фл} = 0,06$.

Для системы, состоящей из $N_{кр}$ кроновых поверхностей, граничащих с воздухом, и $N_{фл}$ флинтных поверхностей, коэффициент пропускания системы с учетом потерь на отражение будет

$$\tau_p = (1 - \rho_{кр})^{N_{кр}} (1 - \rho_{фл})^{N_{фл}}. \quad (II, 28)$$

Та часть световой энергии, которая поглощается массой стекла, определяется коэффициентом поглощения α . Коэффициентом поглощения называется отношение светового потока F_α , поглощенного данной оптической деталью, к световому потоку, упавшему на нее,

$$\alpha = \frac{F_\alpha}{F} = 1 - \Theta^l, \quad (\text{II}, 29)$$

где Θ — коэффициент прозрачности;

l — длина пути светового потока в стекле, см.

В современных сортах стекла потеря света за счет поглощения составляет 1% на 1 см хода луча в стекле, следовательно, $\Theta = 0,99$.

Коэффициент пропускания оптического прибора, состоящего из кроновых и флинтových деталей, равен

$$\tau_{\text{пр}} = 0,94^{N_{\text{Фл}}} \cdot 0,96^{N_{\text{кр}}} \cdot 0,99^l. \quad (\text{II}, 30)$$

В сложных оптических системах потери света могут достигать 70—80%, при этом основные потери возникают за счет отражения при преломлении.

В результате многократного отражения от преломляющих поверхностей часть отражаемого светового потока достигает плоскости изображения и может вызвать появление бликов или значительно понизить контрастность изображения, осветив темные его участки. Следовательно, свет, отраженный от поверхности при преломлении, так же как свет, рассеянный средой стекла, является светом вредным.

Влияние рассеянного света на изображение принято характеризовать коэффициентом светорассеяния s . Коэффициентом светорассеяния называется отношение освещенности образуемого объективом изображения черного предмета, расположенного на равномерно ярком фоне, к освещенности изображения яркого фона:

$$s = \frac{E_{\text{т}}}{E_{\text{с}}}. \quad (\text{II}, 31)$$

В последнее время разработан эффективный метод понижения потерь светового потока за счет отражения на преломляющих поверхностях. Этот метод называется просветлением оптики. Он основан академиком И. В. Гребенщиковым и А. А. Лебедевым. Метод состоит в том, что преломляющую поверхность линзы покрывают тонким прозрачным слоем (пленкой) с показателем преломления n_c , определяемым по формуле

$$n_c = \sqrt{n}, \quad (\text{II}, 32)$$

где n — показатель преломления стекла линзы.

Толщина прозрачного слоя равна приблизительно одной четвертой части длины волны света.

Физический смысл метода заключается в том, что световые потоки, отраженные от двух поверхностей слоя, вследствие интерференции взаимно погашаются, и вся световая энергия направляется в световой поток, проходящий через преломляющие поверхности слоя.

Существуют три метода нанесения просветляющей пленки: химический, физический и гидролизации.

Просветление линз оптических систем приблизительно вдвое повышает пропускание света в оптических приборах и, кроме того, значительно снижает вредное действие рассеянного света.

В табл. 4* приведены сравнительные данные результатов просветления для поверхности, коэффициент отражения которой до просветления составлял 0,040—0,055.

Т а б л и ц а 4

Метод	Коэффициент отражения, %	
	до просветления	после просветления
Химический	4,5—5,5	1,7—2,2
Физический	4,5—5,5	0,4—1,4
Гидролизаии:		
однослойный	4,5—5,5	0,8—2,5
двухслойный	4,5—5,5	1,0—1,2
трехслойный	4,5—5,5	0,2—0,6

Для оптических систем с просветленной оптикой можно пользоваться приближенной формулой для вычисления коэффициента пропускания света прибором

$$\tau_{\text{пр}} = 0,99^l \cdot 0,99^{N_1} \cdot 0,98^{N_2}, \quad (\text{I I}, 33)$$

где N_1 — число поверхностей, просветленных физическим методом или методом гидролизаии;

N_2 — число поверхностей, просветленных химическим методом.

Государственные стандарты на геодезические и маркшейдерские инструменты (ГОСТ 10528—63, 10529—63, 10812—64, 10813—64) предъявляют следующие требования:

зрительные трубы всех инструментов должны быть с просветленной оптикой;

коэффициент светорассеяния зрительных труб инструментов типов Т05, Т1, Т2, Т5 и Н1, Н2, Н3 должен быть не более 7%;

* Бегунов В. Н. Геометрическая оптика. М., изд. МГУ, 1966.

коэффициент светорассеяния зрительных труб остальных инструментов должен быть не более 10%;

коэффициент пропускания зрительных труб всех инструментов должен быть не менее 60%.

§ 26. ЯРКОСТЬ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

О яркости наблюдаемых предметов глаз судит по освещенности их изображений, образуемых на сетчатке глаза. Чем больше освещенность, тем большее раздражение получают светочувствительные нервные окончания, покрывающие сетчатку. Степень этого раздражения называется субъективной яркостью.

Освещенность изображения на сетчатке невооруженного глаза определяют по формуле

$$E' = \frac{\pi \tau_{\text{гл}} B D_{\text{гл}}^2}{4f}, \quad (\text{II}, 34)$$

где $\tau_{\text{гл}}$ — коэффициент пропускания оптической системы глаза;

B — яркость объекта;

$D_{\text{гл}}$ — диаметр зрачка глаза;

f — переднее фокусное расстояние глаза.

Для того чтобы перейти к освещенности изображения на сетчатке глаза при наблюдении через оптический прибор, необходимо учитывать следующее:

освещенность объекта будет ослаблена пропорционально коэффициенту пропускания прибора $B' = \tau_{\text{пр}} B$; диаметр зрачка глаза следует заменить диаметром выходного зрачка трубы $D_{\text{зр. вых}}$. Тогда

$$E'' = \frac{\pi \tau_{\text{гл}} \tau_{\text{пр}} B D_{\text{зр. вых}}^2}{4f^2}. \quad (\text{II}, 35)$$

Относительная яркость определяется по формуле

$$\frac{E''}{E'} = \tau_{\text{пр}} \left(\frac{D_{\text{зр. вых}}}{D_{\text{гл}}} \right)^2. \quad (\text{II}, 36)$$

Рассмотрим следующие случаи:

если $D_{\text{гл}} > D_{\text{зр. вых}}$, то $\frac{D_{\text{зр. вых}}}{D_{\text{гл}}} < 1$, а так как $\tau_{\text{пр}}$ всегда меньше единицы, то субъективная яркость для вооруженного глаза будет меньше, чем для невооруженного глаза;

если $D_{\text{гл}} = D_{\text{зр. вых}}$, то относительная яркость будет определяться по формуле

$$\frac{E''}{E'} = \tau_{\text{пр}} \left(\frac{D_{\text{гл}}}{D_{\text{гл}}} \right)^2 = \tau_{\text{пр}} < 1,$$

т. е. субъективная яркость вооруженного глаза и в этом случае меньше, чем невооруженного;

если $D_{\text{гл}} < D_{\text{зр. вых}}$, то выходным зрачком оптической системы (зрительной трубы) будет служить входной зрачок глаза $D_{\text{гл}}$. Следовательно, относительная яркость трубы выразится той же формулой.

Следует иметь в виду, что в последнем случае входное отверстие объектива используется не полностью, так как $D_{\text{гл}} \Gamma < D_{\text{зр. вх}}$.

Учитывая, что всегда $\tau_{\text{пр}} < 1$, приходим к выводу, что освещенность изображения светящейся поверхности на сетчатке глаза при наблюдении через прибор во всех случаях меньше, чем при наблюдении невооруженным глазом.

Если в формулу (II,36) подставить значение $D_{\text{зр. вых}} = \frac{D_{\text{зр. вх}}}{\Gamma}$, то получим

$$\frac{E''}{E'} = \left(\frac{D_{\text{зр. вх}}}{D_{\text{гл}} \Gamma} \right)^2 \tau_{\text{пр}}. \quad (\text{II},37)$$

Из формулы (II,37) следует, что освещенность изображения на сетчатке глаза при наблюдении через прибор тем меньше, чем больше увеличение.

При наблюдении светящихся точек (например, звезд) картина существенно меняется. Светящимися точками называются источники света, видимые глазом под углами, меньшими $1'$. В этом случае субъективная яркость изображения определяется величиной светового потока F' , поступающего в глаз от источника,

$$F' = I \omega, \quad (\text{II},38)$$

где I — сила света светящейся точки;

ω — телесный угол, образованный конусом с вершиной в светящейся точке и основанием, равным площади входного зрачка глаза.

Если светящаяся точка находится на расстоянии a от зрачка глаза, то

$$\omega = \frac{\pi L_{\text{гл}}^2}{a^2}, \quad (\text{II},39)$$

а световой поток в соответствии с равенством (II,38)

$$F' = \frac{\pi D_{\text{гл}}^2 I}{a^2}. \quad (\text{II},40)$$

Если светящуюся точку наблюдать через зрительную трубу, принимая, что $D_{\text{гл}} = D_{\text{зр. вых}}$, то для определения светового потока, поступающего в глаз, необходимо:

заменить в формуле (II,40) $D_{\text{гл}}$ значением диаметра входного зрачка зрительной трубы $D_{\text{зр. вх}}$, так как весь световой поток, прошедший в объектив, достигнет сетчатки глаза;

уменьшить силу света источника пропорционально коэффициенту пропускания $\tau_{\text{пр}}$ зрительной трубы и принять $I' = \tau_{\text{пр}} I$.

Тогда получим формулу для определения светового потока, поступающего в глаз при наблюдении через прибор,

$$F'' = \frac{\pi D_{\text{зр. вх}}^2 \tau_{\text{пр}} I}{a^2}. \quad (\text{II}, 41)$$

Отсюда относительная яркость трубы

$$\frac{F''}{F'} = \left(\frac{D_{\text{зр. вх}}}{D_{\text{гл}}} \right)^2 \tau_{\text{пр}}. \quad (\text{II}, 42)$$

Следовательно, субъективная яркость трубы в этих случаях увеличивается пропорционально квадрату диаметра входного зрачка зрительной трубы. Это позволяет наблюдать звезды через телескопические системы днем, так как при наблюдении через зрительную трубу субъективная яркость точечных источников (формула II,42) выше, чем фона (формула II,36).

В-21 § 27. ХРОМАТИЧЕСКАЯ И СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИИ

Реальные оптические системы в силу физических свойств деталей, из которых они состоят, нарушают гомоцентричность проходящих через них световых пучков и поэтому точки предмета изображаются кружками рассеяния. Отклонения свойств реальных оптических систем от идеальных называются а б е р р а ц и я м и.

Различают семь видов aberrаций: х р о м а т и ч е с к у ю а б е р р а ц и ю положения, х р о м а т и ч е с к у ю а б е р р а ц и ю увеличения, с ф е р и ч е с к у ю а б е р р а ц и ю, к о м у, а с т и г м а т и з м, к р и в и з н у и з о б р а ж е н и я и д и с т о р с и ю.

Первые две aberrации относятся к хроматическим, а остальные — к монохроматическим. Астигматизм, кривизна изображения и дисторсия не оказывают заметного влияния на ухудшение изображений, даваемых зрительными трубами, из-за их сравнительно небольших углов поля зрения.

Поэтому рассмотрим первые четыре вида aberrаций.

Хроматическая aberrация положения. Появление хроматических aberrаций объясняется тем, что при прохождении поверхности, разделяющей две прозрачные среды с разными показателями преломления, белый луч света не только преломляется, но и разлагается в спектр. Разложение белого луча в спектр вызывается тем, что показатель преломления зависит не только от физических свойств оптического стекла, но и от длин волн цветных лучей, составляющих луч белого света. Поэтому в соответствии с формулой (I,29) для лучей с различной длиной волны будет меняться фокусное расстояние оптической системы: чем короче длина волны, тем меньше фокусное расстояние.

Пусть через тонкую положительную линзу проходит пучок белых лучей параллельно оптической оси. Проследим ход трех цветных

лучей, входящих в состав белого луча: зелено-голубого F , желтого D и красного C с показателями преломления n_F, n_D и n_C . По выходе из линзы эти лучи пересекаются в фокусах F, D и C (рис. 30, а).

Напишем формулу (I,79), определяющую оптическую силу тонкой линзы,

$$\frac{1}{f'} = \Phi = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

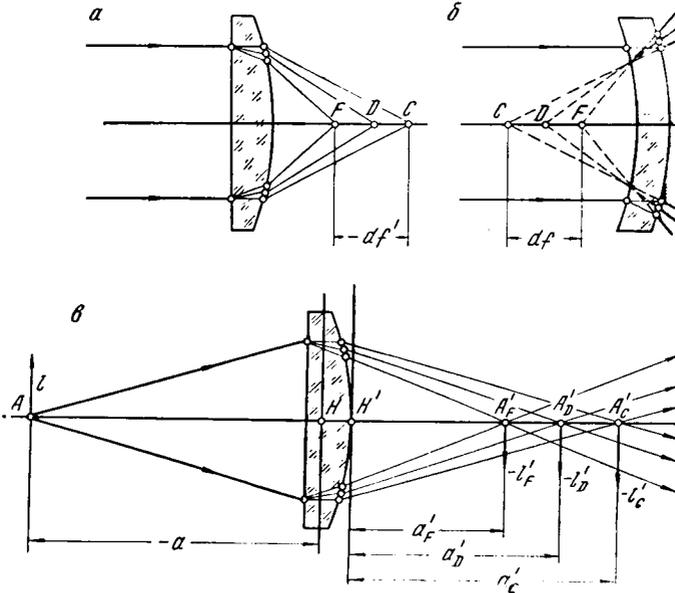


Рис. 30. Хроматическая aberrация положения и увеличения

Дифференцируя эту формулу, получим

$$-\frac{df'}{f'^2} = d\Phi = dn \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

и окончательно

$$-\frac{df'}{f'} = \frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{dn}{n-1}. \quad (II,43)$$

Если f' и Φ определены при $n = n_D$, а изменение показателя преломления равно $dn = n_F - n_C$, то с учетом уравнения (I,2) можно написать:

$$\begin{aligned} f' &= f'_D; \quad \Phi = \Phi_D; \\ df' &= f'_F - f'_C; \\ -\frac{df'}{f'_D} &= \frac{d\Phi}{\Phi_D} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \frac{1}{v}, \end{aligned} \quad (II,44)$$

откуда

$$df' = f'_F - f'_C = -\frac{f_D}{v}, \quad (\text{II,45})$$

где v — коэффициент дисперсии.

Из формулы (II,45) следует, что расстояния df' для положительной и отрицательной линз имеют противоположные знаки (см. рис. 30, а и б).

Положение изображения данной светящейся точки зависит от фокусного расстояния оптической системы, а так как для составляющих белый свет цветных лучей фокусные расстояния различны, то и изображения светящейся точки в лучах разных цветов будут находиться на различных расстояниях от оптической системы.

Расстояние a' от линзы до изображения определяется по формуле отрезков (I,41).

Пусть белые лучи света, идущие из точки A , падают на собирающую линзу (рис. 30, в). Пройдя линзу, лучи пересекают оптическую ось в точках A'_F , A'_D и A'_C . На участке оси $A'_F A'_C$ расположены все цветные изображения точки A в порядке цветов спектра.

Где бы в этом интервале мы ни поставили экран, улавливающий изображение, оно может быть резким только для одной длины волны света, а в совокупности вместо изображения точки мы получим пятно рассеивания с радужно окрашенным контуром.

Дифференцируя формулу отрезков (I,41), получим

$$da' = a'^2 \frac{df'}{f_D^2}. \quad (\text{II,46})$$

С учетом выражения (II,44) формулу (II,46) можно переписать для крайних значений длин волн видимого спектра

$$da' = a_F - a_C = -a_D'^2 \frac{1}{f_D v}. \quad (\text{II,47})$$

Для предмета, находящегося в бесконечности, $a = \infty$, $a' = f'$ и формула (II,47) переходит в формулу (II,45).

Хроматическая aberrация оптической системы может быть устранена комбинацией положительных и отрицательных линз, изготовленных из разных сортов стекла.

Определим фокусное расстояние двух соприкасающихся тонких линз (положительной и отрицательной), дающих совмещенные изображения, образуемые зелено-голубыми и красными лучами.

Оптическая сила системы из двух тонких соприкасающихся линз определяется по формуле

$$\Phi' = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (\text{II,47a})$$

Продифференцируем эту формулу

$$d\Phi' = d\Phi_1 + d\Phi_2.$$

Подставляя значения $d\Phi_1$ и $d\Phi_2$ из формулы (II,44), получим

$$d\Phi' = \frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2}, \quad (\text{II,48})$$

где v_1 и v_2 — коэффициенты дисперсии стекол.

Для совпадения изображений необходимо, чтобы $d\Phi' = 0$, т. е.

$$\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2} = 0. \quad (\text{II,49})$$

Решая совместно (II,47a) и (II,49), получим:

$$\Phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} \Phi'; \quad \Phi_2 = - \frac{v_2}{v_1 - v_2} \Phi', \quad (\text{II,50})$$

откуда:

$$f'_1 = \frac{v_1 - v_2}{v_1 \Phi'}; \quad f'_2 = - \frac{v_1 - v_2}{v_2 \Phi'}. \quad (\text{II,51})$$

Из уравнений (II,51) видно, что линзы должны иметь разные знаки.

Хроматическая абберация увеличения. Фокусные расстояния системы при разных длинах волн света различны, вследствие чего увеличения цветных изображений будут также различны (рис. 30, ϑ), т. е.

$$l'_F \neq l'_D \neq l'_C.$$

Такое явление называется хроматической абберацией увеличения. Хроматизм увеличения исправляется совместно с хроматизмом положения подбором соответствующих фокусных расстояний линз, расстояний между ними и коэффициента дисперсии оптического стекла.

Оптические системы, в которых исправлена хроматическая абберация, называются ахроматами.

Сферическая абберация. Линзы, ограниченные сферическими поверхностями, обладают способностью сильнее преломлять лучи, проходящие вдали от оптической оси, по сравнению с лучами, проходящими в параксиальной области. Это явление называется сферической абберацией. Сферическая абберация приводит к тому, что изображение точки имеет вид кружка, размер которого прямо пропорционален диаметру линзы или объектива.

На рис. 31, *a* и *b* показаны сферические абберации положительной и отрицательной линз для точки *A*, расположенной на оптической оси.

Сферическая абберация положительной линзы отрицательна, а отрицательной линзы — положительна (рис. 31).

Отрезок $\Delta a'$ характеризует продольную сферическую абберацию. Обозначим диаметр линзы BC через $2h$, а диаметр кружка DE , изображающего точку *A* в плоскости изображения, образованного параксиальными лучами, через $2r$. Радиус кружка рассеивания r называется поперечной сферической абберацией.

рации. Поперечная сферическая aberrация (рис. 31, а) определяется по формуле

$$r = \frac{h \Delta a'}{a'' + \Delta a'}. \quad (\text{II}, 52)$$

Наименьший радиус кружка рассеивания получается на расстоянии $\Delta a'$ от плоскости изображения, строящегося параксиальными лучами. Если установить экран в плоскости изображения параксиальных лучей, то радиус кружка рассеивания получается довольно большим. Однако энергия распределяется в этом кружке

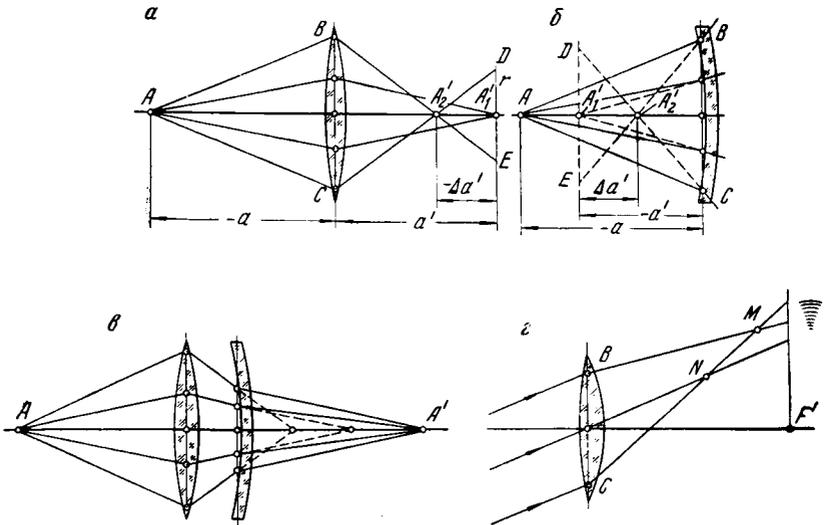


Рис. 31. Сферическая aberrация. Кома

очень неравномерно — в центре его создается яркое ядро сравнительно малого диаметра, а к краям кружка световая энергия резко уменьшается. Поэтому по полному диаметру пятна рассеивания нельзя судить о резкости изображения.

Для исправления сферических aberrаций, так же как и хроматических, оптические системы составляют из положительных и отрицательных линз и из различных сортов оптического стекла.

На рис. 31, в показана геометрическая схема исправления сферической aberrации.

Кома. Сферическая aberrация широкого наклонного пучка лучей, в котором нарушена симметрия, называется *комой*. Пусть через линзу BC проходит наклонный пучок лучей (рис. 31, г).

Крайние лучи пучка не симметричны по отношению к среднему лучу и поэтому точка M , образованная пересечением лучей, не лежит на среднем луче. Если бы точка M находилась на среднем луче, то пятно рассеивания было бы кругом. В данном же случае пятно оказывается в виде несимметричного мазка. Кома, так же как и сфе-

были бы видны все дефекты оптического стекла (пузырьки и царапины), из которого сделан коллектив.

Коллектив помещают на несколько миллиметров в сторону от плоскости изображения (ближе к окуляру). В тех случаях, когда приходится применять коллектив, его относят к системе окуляра. Тогда первая линза окуляра называется коллективом, а последняя — глазной линзой.

Окуляры характеризуются следующими параметрами: фокусным расстоянием f' , углом поля зрения $2u'$, диаметром выходного зрачка D' .

Помимо этого, важную роль играют параметры, определяющие положения передней фокальной плоскости (переднее вершинное расстояние или задний отрезок t) и удаление выходного зрачка t' (рис. 33).

Рассмотрим наиболее распространенные окуляры, используемые в маршейдерских и геодезических зрительных трубах.

Окуляр Кельнера состоит из двух компонентов (рис. 33, а): полевой (коллективной) и склеенной глазной линзы. Глаз-

ная линза состоит из оптического стекла двух сортов. Окуляр дает хорошие изображения при углах поля зрения до 50° . Удаление выходного зрачка $t' \approx 0,5f'$ окуляра, а переднего отрезка — $t \approx 0,3f'$ окуляра. Общая длина окуляра приблизительно равна $1,25f'$.

Диаметры линз в каждом конкретном случае выбираются в зависимости от хода лучей.

Симметричный окуляр состоит из двух склеенных компонентов, установленных флинтами наружу (рис. 33, б). Наличие двух пар склеенных линз позволяет хорошо исправлять aberrации при небольшом воздушном промежутке между компонентами (на более $0,5 \text{ мм}$). Ценное свойство симметричного окуляра — сравнительно большое удаление выходного зрачка, $t' \approx 0,75f'$ окуляра. Это объясняется отсутствием в нем положительного коллектива, пригибающего лучи к оптической оси и уменьшающего тем самым удаление выходного зрачка. Окуляр дает хорошие изображения при углах поля зрения до 50° . Он получил наиболее широкое распространение в зрительных трубах с внутренней фокусировкой и при малых фокусных расстояниях ($f' = 8-10 \text{ мм}$) позволяет добиться больших увеличений. Общая длина окуляра составляет $d \approx 0,75f'$.

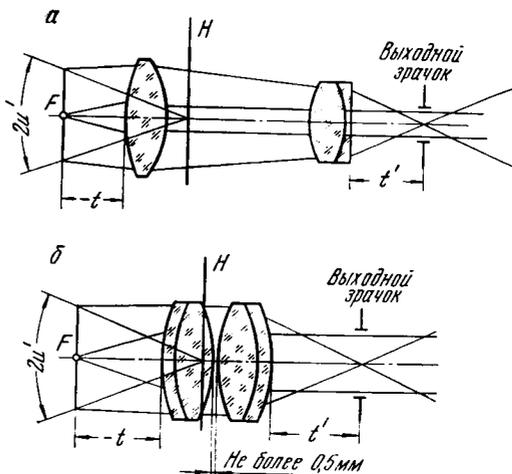


Рис. 33. Окуляры Кельнера и симметричный

§ 30. КОЛЕБАНИЯ ВИЗИРНОЙ ОСИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ

Допустим, что при фокусировке трубы вследствие ошибок изготовления и из-за зазора между объективным и окулярным коленами крест нитей перемещается не вдоль оптической оси объектива HF' , а вдоль линии aa (рис. 34, а). При этом смещение сетки на величину оптического интервала Δ вызывает смещение креста нитей с оптической оси объектива на величину y , что, в свою очередь,

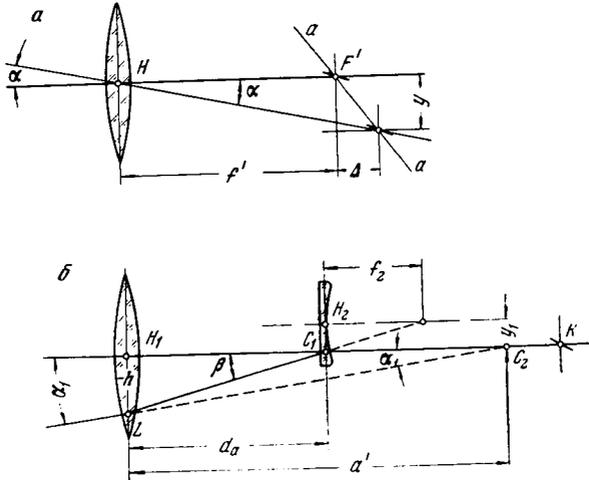


Рис. 34. Смещение визирных осей при перефокусировании

приводит к повороту визирной оси на угол α . Так как этот угол мал, то его величину в секундах можно вычислить по формуле

$$\alpha = \frac{y}{f'} \rho, \quad (\text{II}, 54)$$

где f' — фокусное расстояние объектива;
 ρ — число секунд в радиане.

Отклонение визирной оси вследствие такого же смещения y_1 фокусирующей линзы определяется по формуле (рис. 34, б)

$$\alpha_1 = \frac{f' - f'_1}{f'_1 f'} y_1 \rho, \quad (\text{II}, 55)$$

где f'_1 — фокусное расстояние положительной компоненты телеобъектива;

f' — эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива.

Из отношения выражений (II,54) и (II,55) получим

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{y}{y_1} \cdot \frac{f'_1}{(f' - f'_1)}. \quad (\text{II}, 56)$$

Если предположить, что $y = y_1$, то

$$\alpha_1 = \alpha \frac{(f' - f'_1)}{f'_1}. \quad (\text{II}, 57)$$

Сравним влияние смещения сетки нитей и фокусирующей линзы на одну и ту же величину $y = y_1 = 0,01$ мм для зрительных труб нивелиров с внешней и внутренней фокусировкой. Пусть фокусное расстояние объектива трубы нивелира с внешней фокусировкой $f' = 410$ мм, фокусное расстояние телеобъектива трубы нивелира с внутренней фокусировкой также $f' = 410$ мм, а $f'_1 = 280$ мм. В первом случае угол поворота вычисляется по формуле (II,54)

$$\alpha = \frac{0,01 \cdot 206\,265''}{410} \approx 5''.$$

Во втором случае угол поворота подсчитывается по формуле (II,57)

$$\alpha_1 = 5'' \cdot \frac{410 - 280}{280} \approx 2'',3.$$

Следовательно, влияние поперечного смещения фокусирующей линзы на положение визирной оси, по сравнению с влиянием такого же смещения сетки нитей, в трубах со сравнимыми параметрами вдвое меньше. Это важное преимущество труб с внутренней фокусировкой.

Смещение визирной оси зрительной трубы теодолита при фокусировке определяют так. Выбирают удаленную хорошо видимую точку. На расстоянии 3—4 м от теодолита на высоте инструмента укрепляют горизонтальную доску, на которой отмечают направление на удаленную точку.

Затем поочередно наводят трубу на точку и на отметку на доске при круге «лево» (KL) и круге «право» ($KП$) и при каждом наведении берут отсчеты по горизонтальному кругу. Составляют разности отсчетов $KL_1 - KП_1 = 2c_1$ на удаленную точку и разности отсчетов $KL_2 - KП_2 = 2c_2$ на отметку доски. Величина

$$\alpha = \frac{2c_2 - 2c_1}{2}$$

определяет смещение визирной оси при фокусировании. Такие наблюдения повторяют несколько раз и определяют среднее смещение.

В-1^{1/2} § 31. ТОЧНОСТЬ ВИЗИРОВАНИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

Точностью визирования называется точность совмещения визирной оси трубы с внешним направлением (с направлением на точку визирования). Эта точность зависит от увеличения трубы, разрешающих сил трубы и глаза, от формы, освещенности и контрастности предмета.

Точность визирования зависит, кроме того, от рисунка и толщины штрихов сетки нитей.

Разрешающая сила трубы определяется по формуле (II,21)

$$r = \frac{r'}{T},$$

где r' — разрешающая сила глаза.

Разрешающая сила глаза зависит от формы наблюдаемых объектов. Если для различения точечных объектов принять $r' = 60''$, то при установлении одного штриха на продолжении другого (например, при отсчетах по верньерам или при совмещении изображений в дальномерах двойного изображения) принимают $r' = 10''$. Значение разрешающей силы глаза для объектов различных очертаний и контрастностей определяется опытным путем и меняется в широких пределах (от 10 до 240'').

В маркшейдерско-геодезической практике основными видами визирования следует считать: наведение нити сетки на точку визирования; наведение середины биссектора нитей на точку визирования; совмещение изображений, даваемых оптическими системами дальномеров двойного изображения.

В первом случае предельная ошибка визирования определяется углом, под которым видна ширина нити из задней главной точки объектива,

$$\Delta_1 = \pm \frac{p}{f'} \rho, \quad (\text{II},58)$$

где p — ширина нити;

f' — фокусное расстояние объектива;

ρ — число секунд в радиане ($\rho = 206\,265''$).

Пр и м е р. Пусть $p = 8$ мк, $f' = 250$ мм. Предельная ошибка, вычисленная по формуле (II,58), составит $\Delta_1 = 6''$.

Сетка в виде «биссектора» исключает влияние толщины нити. Ошибка визирования в этом случае зависит от ширины нитей; от величины промежутка p между ними и от ширины изображения наблюдаемого знака.

Исследования показали, что если расстояние p между нитями в два раза больше ширины изображения знака, то при благоприятных внешних условиях предельная ошибка визирования

$$\Delta_2 = \pm \frac{p}{f \cdot 18} \rho,$$

где величина $\frac{p}{f} \rho = 40''$.

Проф. С. В. Елисеев установил, что средняя квадратическая ошибка наведения биссектора на барабан удаленного сигнала

$$m = \pm \frac{15''}{T}. \quad (\text{II},59)$$

По новым ГОСТам угловые расстояния c'' между нитями биссектора со стороны объектива для теодолитов Т05, Т1, Т2, Т5 должны

быть не более 40", для теодолитов Т10 — 50", для теодолитов Т15, Т20 и Т30 — 60".

Следует стремиться к тому, чтобы предельная ошибка визирования не превышала разрешающей способности трубы $\Delta \leq \frac{r'}{\Gamma}$. Для зрительных труб с оптическими дальномерами двойного изображения предельная ошибка совмещения изображений точки визирования или совмещения изображений концевых марок дальномерной рейки определяется по формуле

$$\Delta_3 = \pm \frac{10''}{\Gamma}. \quad (\text{II},60)$$

§ 32. КОЛЛИМАТОРЫ И КОЛЛИМАТОРНЫЕ ПАРЫ

Коллиматором называется оптическая система, образующая пучок параллельных лучей, которая может заменять бесконечно удаленный предмет. Коллиматор состоит из ахроматического объектива, в фокальной плоскости которого расположена хорошо освещенная сетка, диафрагма или мира. Коллиматоры используются для определения качества изображения и разрешающей способности

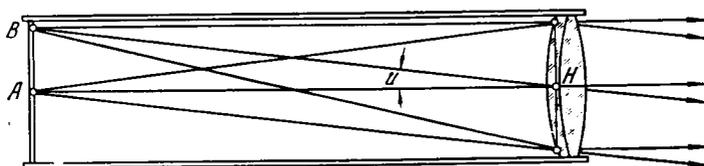


Рис. 35. Коллиматор

оптических систем и для взаимного ориентирования двух систем. Кроме того, они входят как составная часть в различные контрольно-измерительные приборы.

Размеры сеток и отверстий диафрагм коллиматора вычисляются по формуле

$$l = f' \operatorname{tg} u, \quad (\text{II},61)$$

где l — размер сетки AB ;

f' — фокусное расстояние объектива коллиматора;

u — угол, под которым виден отрезок l из задней главной точки объектива.

Из формулы (II,61) следует, что чем больше фокусное расстояние, тем крупнее могут быть элементы сеток, шкал и мир (рис. 35). Поэтому длиннофокусные коллиматоры обеспечивают высокую точность измерений.

Возьмем два коллиматора с объективами H_1 , H_2 и с сетками нитей K_1 и K_2 и установим их на некотором расстоянии S один от другого, направив их друг на друга объективами (рис. 36, а).

В поле зрения первого коллиматора (с объективом H_1) мы увидим изображение K'_2 креста нитей второго коллиматора, смещенное относительно креста нитей K_1 первого коллиматора, а в поле зрения второго — изображение K'_1 креста нитей K_1 первого коллиматора, смещенное относительно креста нитей K_2 второго. Если теперь два наблюдателя, меняя ориентировку каждого коллиматора, точно совместят изображения перекрестий сеток нитей K'_2 и K'_1 соответственно с крестами нитей K_1 и K_2 , то коллиматоры окажутся взаимно ориентированными, их оптические оси совпадут или станут параллельными (рис. 36, б). Это свойство коллиматорных пар широко используется для взаимного ориентирования приборов, расположенных на расстояниях прямого видения, например для ориентирования дальномерных реек относительно дальномера.

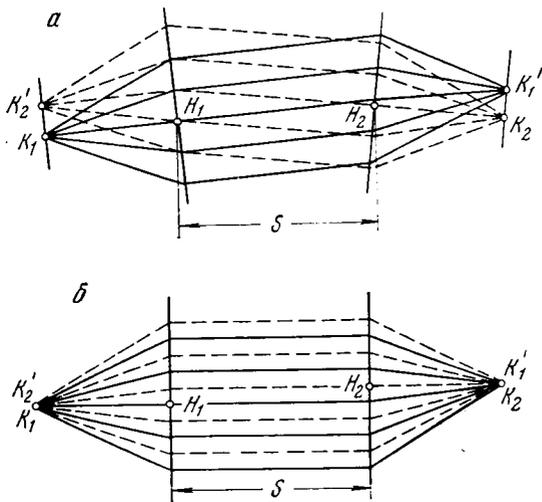


Рис. 36. Ориентирование коллиматоров

Любая зрительная труба геодезического прибора, отфокусированная на бесконечность, может быть использована как коллиматор. Для того чтобы увидеть через зрительную трубу резкое изображение сетки нитей коллиматора, необходимо зрительную трубу отфокусировать на бесконечность независимо от того, на каком расстоянии S от нее находится коллиматор. Это позволяет использовать коллиматор вместо удаленного в бесконечность предмета. Коллиматоры используются на оптико-механических заводах в тех случаях, когда для юстировок оптических систем и оценки качества изображений необходимо наблюдать удаленные точки. Таким образом, при определении поля зрения, разрешающей силы трубы, смещения визирной оси при фокусировках и т. д. удаленный предмет может быть заменен коллиматором с соответствующей сеткой, шкалой, мирой или диафрагмой.

Г Л А В А III

ОСЕВЫЕ УСТРОЙСТВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТОВ

§ 33. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Осевые устройства определяют принципиальную схему прибора и в сочетании с другими механическими частями обеспечивают сохранение необходимых сопряжений геометрических осей инструмента в процессе измерений. Механические части инструментов должны быть конструктивно и технологически выполнены так, чтобы можно было достичь заданной точности измерений и высокой производительности работы при широком интервале изменений температуры (от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$).

К механическим частям инструментов относятся: вертикальные осевые устройства; микрометрично-зажимные устройства; подставки-треножки; подставки трубы и горизонтальные оси; элевационные винты и системы бесконечного наводящего винта в нивелирах; исправительные винты; штативы, консоли, устройства центрирования и сигналы.

§ 34. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ОСИ ТЕОДОЛИТОВ

В современных теодолитах применяются две системы вертикальных осей: повторительные оси и оси с поворотным лимбом. На рис. 37, *a* приведена схема повторительной системы вертикальных осей с подвижной втулкой оси алидады. Ось лимба 2 вращается во втулке треножника 3 и является втулкой оси алидады 1. Недостаток системы — возможность увлечения лимба при вращении алидады, так как их оси соприкасаются. Такая система осей встречается в теодолитах технической точности с металлическими и стеклянными лимбами, а также в угломерах пониженной точности.

На рис. 37, *б* показана схема вертикальных осей с неподвижной втулкой 3 алидады, в которой поверхности осей алидады 1 и лимба 2 не соприкасаются, что исключает возможность увлечения алидадой

лимба. Такие системы широко применяются в точных и повышенной точности оптических теодолитах и могут быть повторительными или с поворотным лимбом. Эта система требует высокой точности изготовления для исключения эксцентриситета алидады.

На рис. 37, *а* показана схема вертикальных осей, упрощающая центрирование осей алидады 1 и лимба 2. Эти оси — втулки вращаются вокруг одной и той же внешней поверхности неподвижной втулки 3 треножника. Кроме того, так как давление алидады передается на треножник по периферии, увеличивается стабильность осей. Обычно это оси с поворотным лимбом.

Осевые системы бывают конические и цилиндрические.

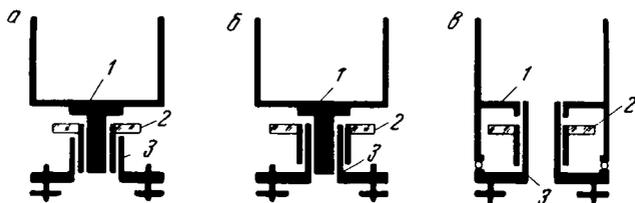


Рис. 37. Схемы вертикальных осей теодолитов

Конические оси. Основными конструктивными элементами конических осей являются: угол конуса 2α , длина оси L и диаметры d_{\min} и d_{\max} . Угол 2α находится в пределах $4-15^\circ$. Длину L выбирают равной 3—4 диаметрам d_{\max} . Величина зазора e между осью и втулкой может быть не более

$$e = \frac{0,2\tau L}{\rho}, \quad (\text{III}, 1)$$

где τ — цена деления уровня алидады горизонтального круга;

L — длина оси, мм.

Оси и втулки конических осей изготавливаются из различных металлов, которые образуют пары с небольшим коэффициентом трения. Например, ось делают из закаленной стали, а втулку из бронзы или ось из латуни, а втулку из бронзы (в приборах с магнитными стрелками).

Рассмотрим примеры конических вертикальных осей с подвижными втулками алидады.

На рис. 38, *а* показана осевая система повторительного теодолита ТТ-5 с металлическим лимбом.

Коническая ось алидады 1 вращается в подвижной втулке 2 алидады (оси лимба 3), которая, в свою очередь, вращается во втулке 4. Эта втулка 4 может легко отделяться от треножника 5, в котором она закрепляется винтом 6.

На рис. 38, *б* показан разрез конических осей повторительного теодолита ТОМ со стеклянным лимбом. Ось алидады 1 теодолита

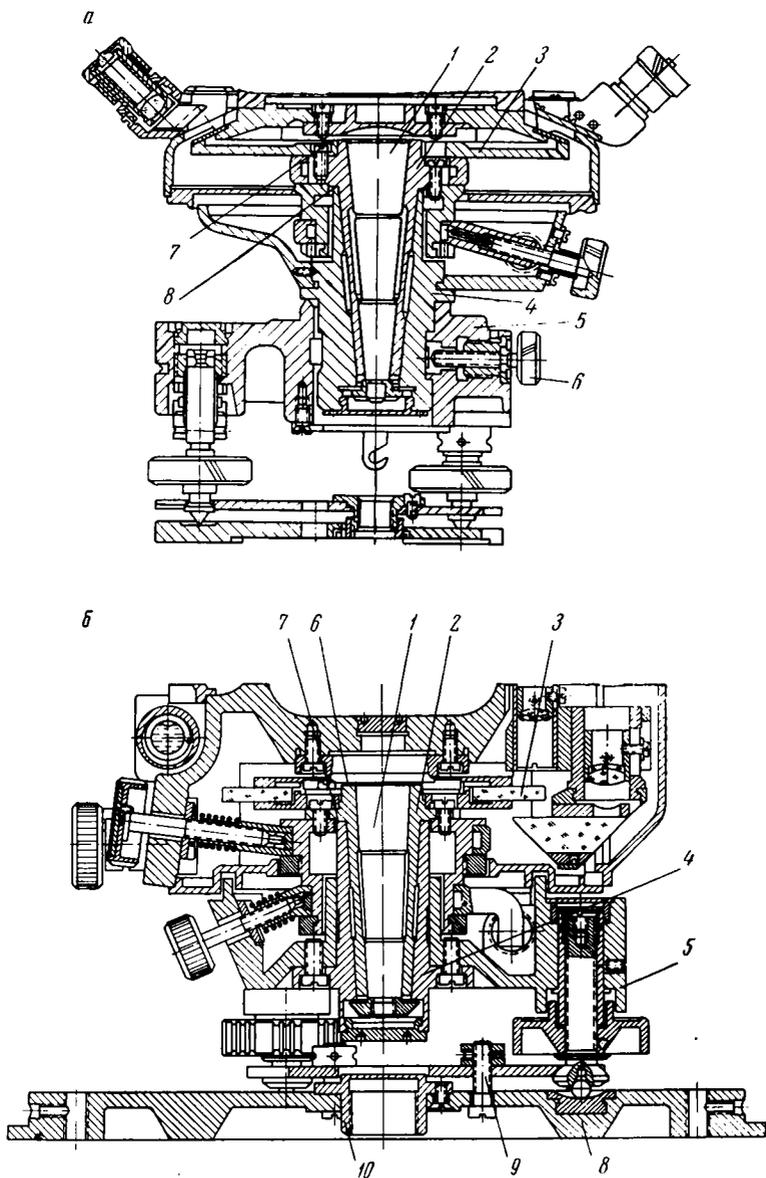


Рис. 38. Конические оси теодолитов ТТ-5 и ТОМ

вращается в подвижной втулке 2 алидады (оси лимба 3), которая, в свою очередь, вращается во втулке 4, скрепленной наглухо с треножником 5.

Из-за действия сил трения в этих осях, при измерениях горизонтальных узлов могут возникать ошибки за счет увлечения осью алидады оси лимба, достигающие 10" для теодолитов 30-секундной точности.

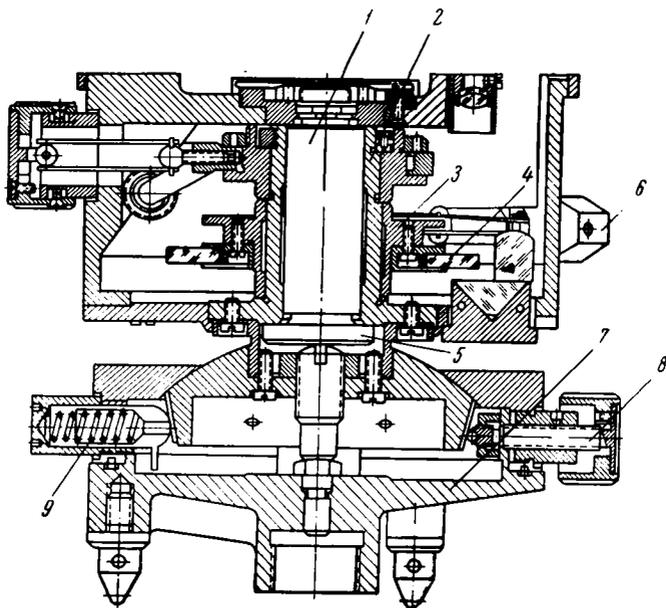


Рис. 39. Цилиндрические оси теодолита Т20

Цилиндрические оси. Изготовление цилиндрических осей требует высокого уровня техники. Цилиндрические осевые системы с неподвижной втулкой алидады широко применяются в точных и повышенной точности оптических теодолитах. Как правило, это системы с поворотными лимбами.

Однако цилиндрические оси используются и в оптических повторительных теодолитах технической точности.

На рис. 39 показан разрез вертикальной системы осей повторительного оптического маркшейдерского теодолита Т20. Цилиндрическая ось алидады 1 вращается в неподвижной втулке 2 алидады, внешняя полированная поверхность которой является осью независимого вращения втулки 3 лимба 4.

Ось алидады оканчивается «шляпкой» 5 с заплевиками, через которые передается вес теодолита на неподвижную втулку 2 в перевернутом положении теодолита. Для совместного вращения лимба и алидады втулка 3 может быть скреплена с алидадой поворотом рычажка 6 в вертикальное положение. При горизонтальном положе-

нии рычажка вращается только алидада, а лимб остается неподвижным.

На рис. 40 показана схема вертикальных осей оптического повторительного малого теодолита Theo-120 завода Цейсс, Иена. В этом теодолите лимб 1 соединяется с алидадной частью и ее осью 2 посредством тонкого металлического диска 5, укрепленного на оси-втулке 4 лимба, который при помощи защелки 6 может скрепляться с алидадой и вращаться вместе с ней. Неподвижная втулка 3 оси алидады наглухо скреплена с деталью 7 и вместе с ней легко отделяется от подставки 8.

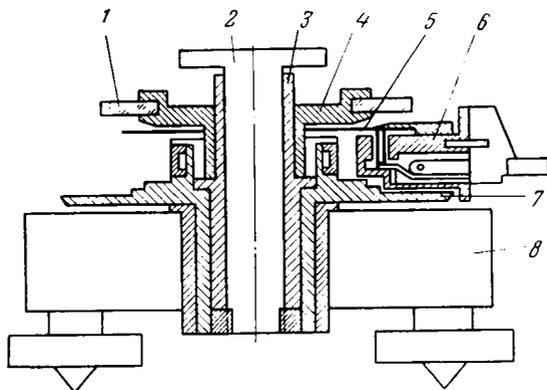


Рис. 40. Схема осей теодолита Theo-120

Оптические теодолиты точные и повышенной точности используются для измерения горизонтальных углов способом круговых приемов, при котором не требуется соединение и совместное вращение лимба с алидадой. Поэтому схемы вертикальных осей таких инструментов просты и состоят из втулки, соединенной с треножником, поддерживаемым подъемными винтами, в которой вращается ось алидады, несущей отсчетные приспособления. Снаружи этой втулки вращается лимб.

На рис. 41 показан разрез осевой системы оптического теодолита ТБ-1 с поворотным лимбом.

Ось алидады 1 вращается в неподвижной втулке 2, на внешней поверхности которой вращается ось-втулка 3 лимба 4. Перестановка лимба производится при помощи конической шестерни 5, укрепленной на втулке 3, и установочного барабана 6 лимба. Вращение с барабана 6 передается на шестерню при помощи трибки 7.

При недостаточной уравновешенности вращающейся части теодолита могут возникать перекосы оси алидады и износ осей. Для обеспечения лучшей центрировки и уменьшения перекосов оси алидады необходимо, чтобы опоры располагались на большом расстоянии от центра вращения. Интересны в этом отношении конструкции

вертикальных осей, разработанные на заводе оптических приборов и точных механизмов (МОМ) в Венгерской Народной Республике.

На рис. 42, *a* показан разрез вертикальных осей, применяемых в универсальном теодолите ТЕ-С1 и теодолитах-тахеометрах ТЕ-Д2, ТЕ-Д3 и ТЕ-Д4. Нагрузка алидадной части 1 передается на основание 8 через 30 шариков 6, расположенных между двумя стальными кольцами 5 и 7, относящимся соответственно к алидаде и основанию.

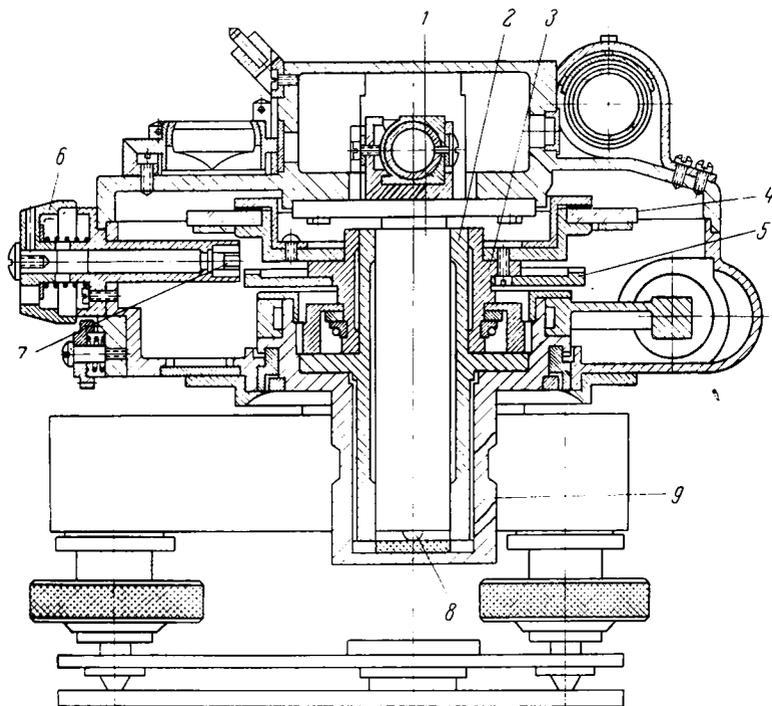
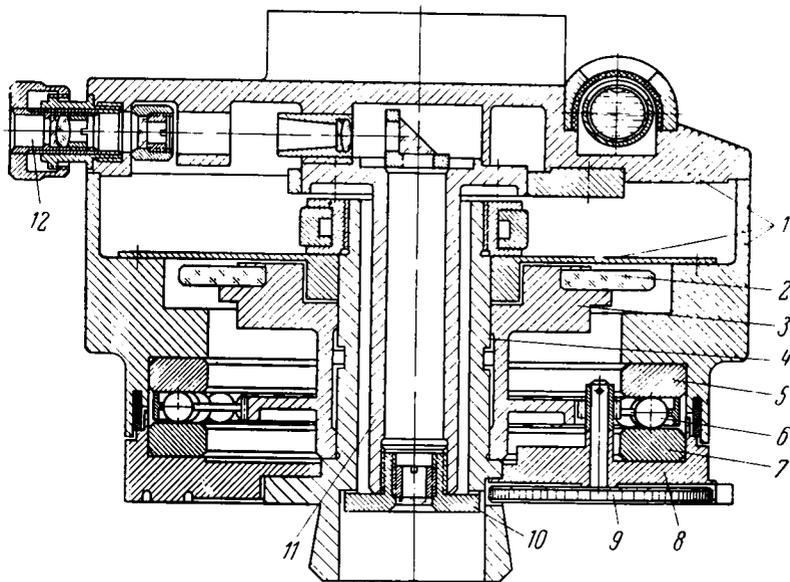


Рис. 41. Оси теодолита ТЕ-1

Поверхности колец, обращенные к шарикам, обработаны под плоскости с оптической точностью. Точная центрировка оси алидады 1 относительно оси 3 лимба 2 достигается тем, что обе эти оси-втулки вращаются вокруг одной и той же внешней цилиндрической поверхности неподвижной втулки 4, закрепленной в основании 8. Перестановка лимба осуществляется винтом 9. Центральная цилиндрическая втулка 11 не является несущей осью алидады, а служит частью оптического отвеса 12. Снизу в эту втулку ввинчена деталь 10, препятствующая отделению алидадной части от основания.

На рис. 42, *б* дан разрез системы вертикальных осей теодолита ТЕ-В1 завода МОМ. Нагрузка алидадной части передается через ось алидады 2, нижняя внутренняя часть 4 которой представляет

a



б

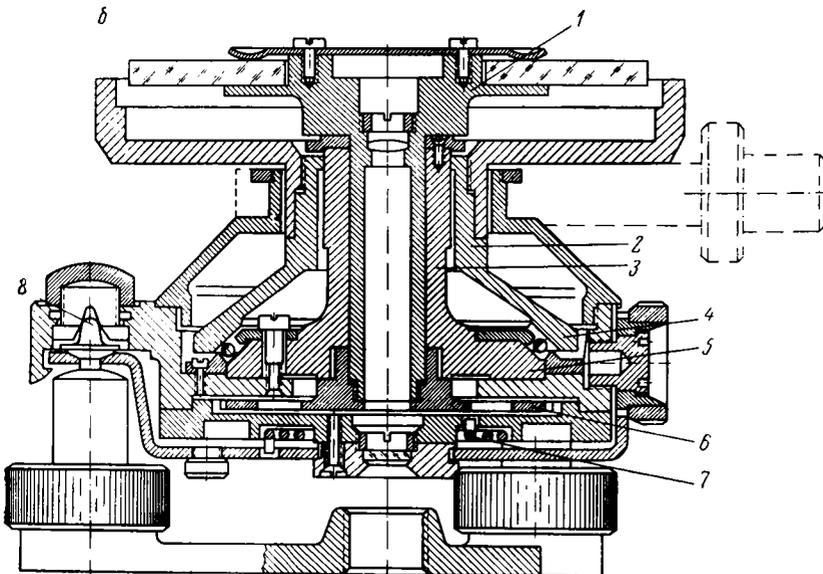


Рис. 42. Оси теодолитов:

a — ТЕ-С1; ТЕ-Д2, ТЕ-Д3 и ТЕ-Д4; *б* — ТЕ-В1

собой поверхность сферы и опирается на шарики, лежащие на другой концентрической сферической поверхности 5. Эта поверхность находится на основании неподвижной втулки 3 оси лимба 1. Сферические поверхности обрабатываются с высокой точностью специальными шлифовальными станками. На нижнем конце оси лимба укреплена шестерня 6, в зацепление с которой входит специальный винт для перестановки лимба (на рис. 42, б не показан).

Цилиндрические оси и втулки изготавливаются из однородного металла (обычно из стали) с соответствующей технологической обработкой. Допуски на изготовление деталей осевых систем геодезических и маркшейдерских инструментов наиболее жесткие. Осевые системы реагируют на изменения внешней среды, чувствительны к трению и неравномерностям нагрузки.

Плавность вращения осевых систем — необходимое условие точных измерений. Для уменьшения трения в вертикальных осях применяют смазку и специальные разгружающие приспособления.

Чтобы уменьшить площадь соприкосновения трущихся поверхностей, на средних частях осей и втулок делают проточки глубиной 0,3—0,5 мм. На осях алидады и лимба делают заплечики 7 (см. рис. 38, а) и 6 (см. рис. 38, б), которыми ось алидады опирается на втулку лимба, а ось лимба — на втулку подъемного аппарата (заплечики 8, см. рис. 38, а и 7, см. рис. 38, б).

Чтобы не было заклинивания, конические оси делают иногда с переменной конусностью с вершинами конусов в одной точке. В цилиндрических осях вертикальная нагрузка передается на заплечики или подпятники 8 (см. рис. 41).

В некоторых теодолитах цилиндрические оси выполняются шариковых подшипниках, располагающихся между заплечиками оси алидады и торцовой поверхностью втулки треножника, и так, как это показано на рис. 42, а и б.

§ 35. МИКРОМЕТРЕННО-ЗАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КРУГА

Одной из основных операций при измерении угла является вращение, которое должно выполняться с точностью, соответствующей разрешающей способности зрительной трубы. Для достижения такой точности пользуются микрометренно-зажимными устройствами. Конструкции микрометренно-зажимных устройств различаются по способу закрепления. В маркшейдерских и геодезических инструментах применяются преимущественно конструкции с центральным радиальным закреплением и реже с кольцевым периферическим.

В вертикальных системах осей, как правило, используют микрометренно-зажимные устройства с центральным радиальным закреплением, основными частями которых являются: хомутик 13, зажимной винт 3, микрометренный или наводящий винт 8 и контрупор (рис. 43).

На рис. 43 показан горизонтальный разрез нижней части оптического теодолита ТБ-1. Поворачивая головку 1 зажимного винта 3, мы вращаем шарнирный валик 2, который, в свою очередь, передает вращение на зажимной винт, скрепляющий хомутик 13 с неподвижной втулкой 4. Прилив 9 хомутика зажат между качающимися штифтами 10 наводящего винта 8 и контрупора 11, укрепленных на алидадной части инструмента. Вращая головку 7 наводящего винта 8.

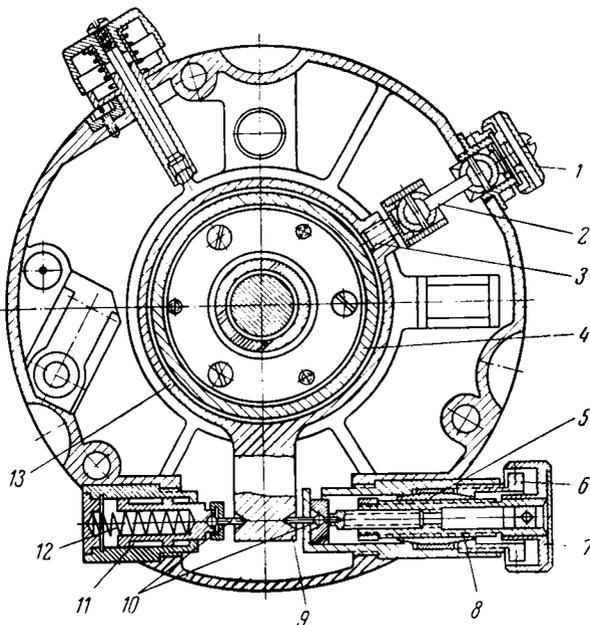


Рис. 43. Микрометренно-зажимное устройство теодолита ТБ-1

можно медленно поворачивать алидаду относительно неподвижной втулки 4, закрепленной в треножнике.

Наводящий винт 8 ввинчивается в разрезную коническую гайку 5, которую можно поджимать зажимной гайкой 6 и тем самым выбирать люфт между резьбой наводящего винта и резьбой разрезной гайки. Под действием пружины 12 контрупор 11 перемещает алидаду в обратную сторону при вывинчивании наводящего винта.

Минимальный шаг наводящих винтов равен 0,35 мм. Шаг s наводящего винта и диаметр его головки d связаны между собой следующим соотношением.

$$s = d \frac{720rh}{\rho}, \quad (\text{III}, 2)$$

где r — разрешающая способность трубы;

h — расстояние от оси наводящего винта до оси вращения алидады;
 $\rho = 206\ 265''$.

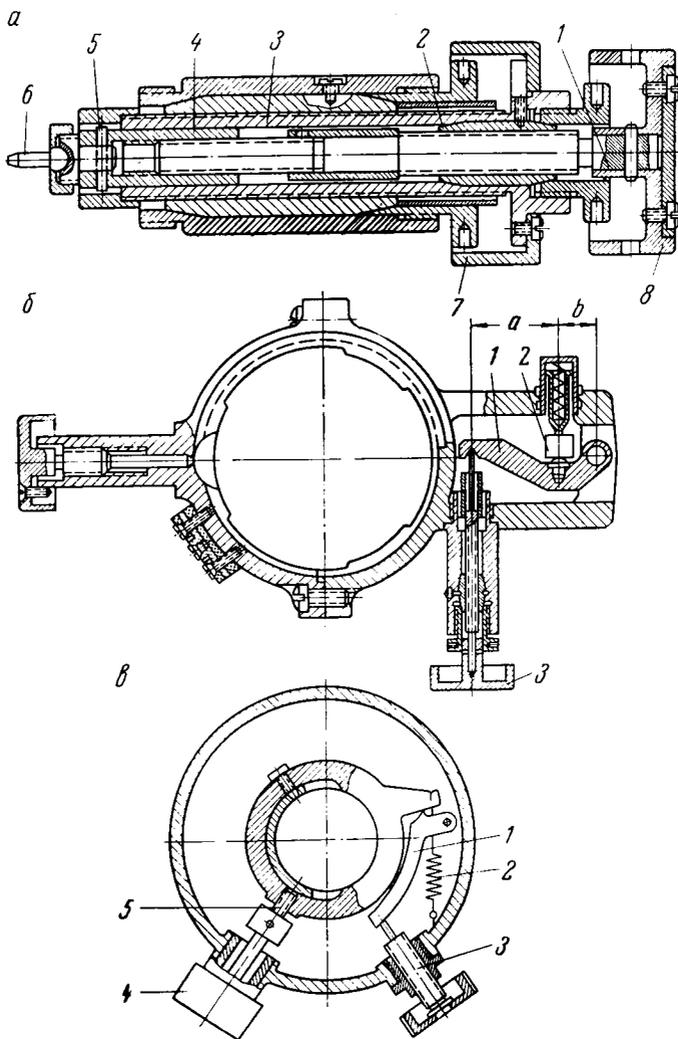


Рис. 44. Дифференциальный винт и шарнирно-рычажные устройства

Приспособления для микрометрических перемещений в высокоточных инструментах представляют собой сложные механизмы, так как применение одного наводящего винта не всегда дает необходимую точность наведения.

К механизмам, при помощи которых можно получить малые перемещения, относится дифференциальный винт.

На стержень винта 1 (рис. 44, а), имеющего одну резьбу с шагом s_1 , а вторую с шагом s_2 , навинчиваются две гайки: гайка 2, скрепленная с полым винтом 3, и гайка 4, имеющая штифт 5, препятствующий ее вращению и заставляющий ее двигаться поступательно. Грубое перемещение качающегося штифта 6 осуществляется вращением головки 7 полого винта 3, а точное — вращением головки 8 винта 1. При повороте головки 8 на один оборот штифт 6 переместится на величину

$$s = s_1 - s_2, \quad (\text{III}, 3)$$

т. е. на разность шагов резьб, отсюда название — дифференциальный. Если $s_1 = 0,5 \text{ мм}$, а $s_2 = 0,35 \text{ мм}$, то $s = 0,15 \text{ мм}$.

Другим видом механизмов малых перемещений являются шарнирно-рычажные устройства, например механизм микрометренной наводки теодолита ОТ-02 (рис. 44, б). Подбирая длину плеч b и $a + b$ рычага 1, можно достичь нужного малого перемещения пальца 2 на величину

$$\Delta s_1 = \frac{b \Delta s}{a + b}, \quad (\text{III}, 4)$$

где Δs — перемещение конца штифта наводящего винта 3.

Интересным является шарнирно-рычажное устройство, применяемое народным предприятием Цейс, Йена (рис. 44, в). Оно состоит из перемещающегося фигурного рычага 1, возвратной пружины 2, наводящего винта 3 и головки 4 зажимного винта 5.

В теодолитах повторительного типа применяются повторительные устройства. Повторительное устройство должно обеспечить совместное движение (грубое и микрометренное) лимба с алидадой и алидады относительно лимба. В осевых системах с подвижной втулкой алидады это достигается применением двух микрометренно-зажимных

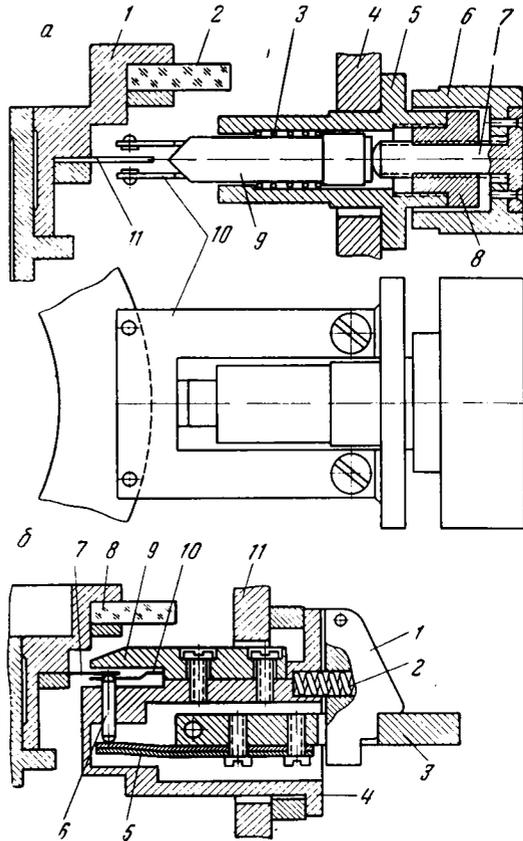


Рис. 45. Клемма и защелка лимба

устройств лимба относительно треножника и алидады относительно лимба. Такие системы применены в теодолитах ТТ-5 и ТОМ (см. рис. 38, а и б).

Другая система, получившая широкое распространение в оптических теодолитах с неподвижной втулкой алидады, состоит из одного микрометрично-зажимного устройства алидады, тонкого металлического диска, укрепленного на оси-втулке лимба, и клеммы или защелки, укрепленных на алидаде.

Повторительное устройство с клеммой (рис. 45, а) состоит из патрона 5, укрепляемого на алидадной части корпуса инструмента 4, с двумя П-образными металлическими пластинами 10 и тонкого металлического диска 11, укрепленного на оси-втулке 1 лимба 2. Край диска располагается между П-образными пластинами 10, которыми он может зажиматься. В тот момент, когда диск зажат, он оказывается соединенным с алидадной частью 4 и при вращении алидады лимб 2 будет вращаться вместе с ней. Для отключения лимба служит клин 9, находящийся в патроне 5. Клин скошенным краем входит между П-образными пластинами 10, а другим концом упирается в винт 7, имеющий рукоятку 6. При ввинчивании винта 7 в гайку 8 клин разводит пластины 10 клеммы и отключает лимб 2 от алидады 4. При вывинчивании винта 7 спиральная пружина 3 выводит клин из П-образных пластин. При этом пластины 10 зажимают диск 11, соединяя лимб с алидадой. Таким образом одно микрометрично-зажимное устройство обслуживает алидаду и лимб.

Повторительное устройство с защелкой 4 показано на рис. 45, б. Когда нужно соединить лимб 8 с алидадой 11, рычаг 3 опускают вниз, плоская пружина 5 поднимает штифт 6, преодолевая действие плоской пружины 19, и диск 7 оказывается зажатым между пружиной 10 и зубом 9. Рычаг 1 при этом фиксирует рычаг 3 в нижнем положении под действием пружины 2.

Для освобождения диска 7 достаточно нажать на рычаг 1 и пружина 10 вернет рычаг 3 в исходное положение.

§ 36. ПОДСТАВКИ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ОСИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ

Алидадная часть несет на себе зрительную трубу, ее горизонтальную ось, вертикальный круг, отсчетные приспособления, уровни и другие части. Вес всех этих деталей передается на вертикальную осевую систему через подставки зрительной трубы. Для уменьшения веса и вместе с тем для сохранения жесткости подставки в современных инструментах делают коробчатой формы из легких сплавов и внутри них располагают вертикальные круги, детали отсчетных приспособлений, микрометрично-зажимные устройства и сопутствующие им детали.

В современных инструментах применяют, как правило, цилиндрические горизонтальные оси, являющиеся полыми трубками с переменным диаметром. Этим достигаются уменьшение веса

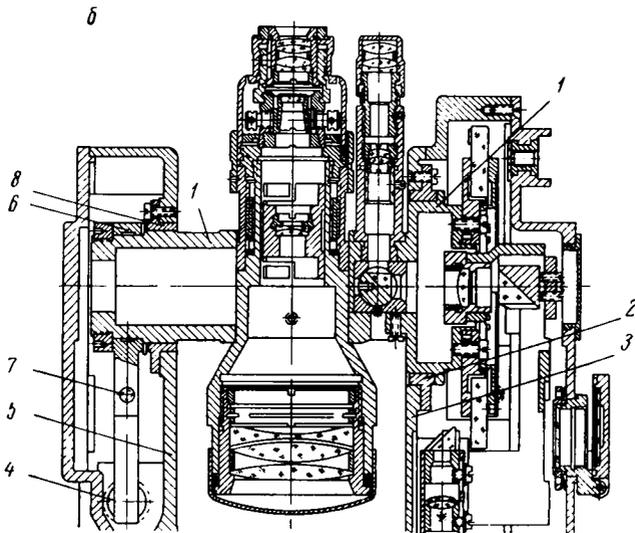
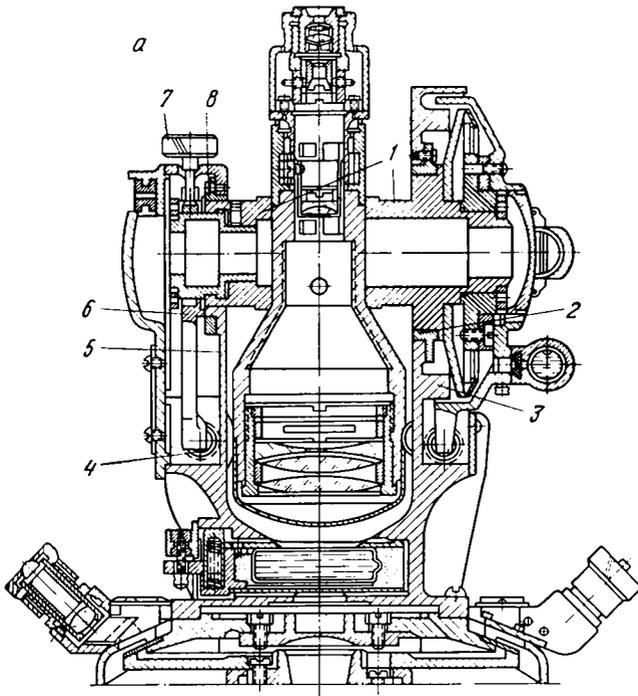


Рис. 46. Горизонтальные оси:
a — теодолита ТТ-5; *б* — теодолита ТОМ

и возможность передачи изображений шкал кругов в микроскоп у окуляра зрительной трубы.

На рис. 46, *a* и *б* показаны разрезы подставок 3 и 5 горизонтальных осей 1, втулок горизонтальных осей 2 и 8 и микрометрично-зажимных устройств горизонтальных осей (хомутик 6, зажимные 7 и наводящие 4 винты теодолитов ТТ-5 и ТОМ).

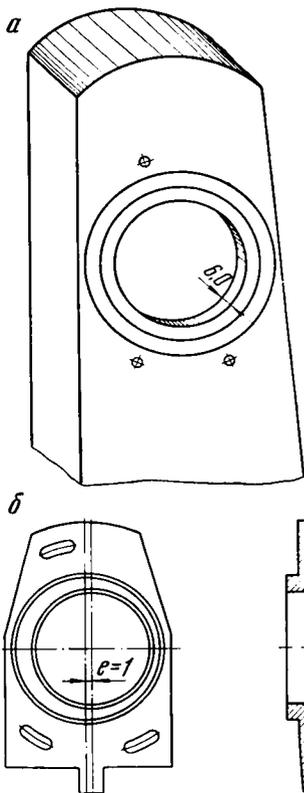


Рис. 47. Лагеры теодолита ТБ-1 и юстировочное устройство оси

Части горизонтальных осей, которыми они опираются на подставки трубы, называются цапфами, а втулки 2 и 8 подставок, поддерживающие цапфы, — лагерами.

Для уменьшения трения необходимо уменьшать трущиеся поверхности, предусматривая кольцевые поверхности касания шириной 5—6 мм.

На рис. 47, *a* показан лагерь оптического теодолита ТБ-1.

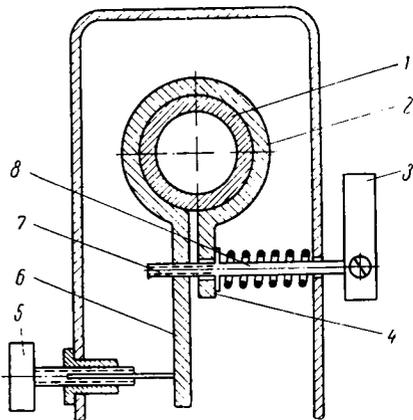


Рис. 48. Микрометрично-зажимное устройство трубы теодолита ТОМ

В современных теодолитах технической точности, как правило, не предусматривают приспособлений для изменения высот подставок. В теодолитах точных и повышенной точности со сравнительно тяжелыми трубами такие устройства иногда предусматривают.

На рис. 47, *б* показана эксцентрическая втулка-лагер оптического теодолита.

Микрометрично-зажимные устройства горизонтальных осей обычно представляют собой конструкции с центральным радиальным зажимом (см. рис. 46, *a*) и реже с кольцевым периферическим зажимом (см. рис. 46, *б*).

На рис. 48 показан схематический разрез микрометрично-зажимного устройства трубы теодолита ТОМ с кольцевым периферическим

зажимом. При повороте рычажка 3 винт 7 ввинчивается в хвостовик 6 и приближает его к хвостовику 4. При этом ось 1 зажимается хомутиком 2. Вращая теперь наводящий винт 5, можно медленно поворачивать ось 1. Пружина 8 поворачивает горизонтальную ось в обратном направлении при вывинчивании наводящего винта.

§ 37. ПОДСТАВКИ-ТРЕНОЖНИКИ

Подставка, или треножник, является несущей частью инструмента и служит для приведения его оси вращения в отвесное, а плоскости лимба в горизонтальное положение. Подставка состоит из треугольного корпуса, в углах которого расположены подъемные винты.

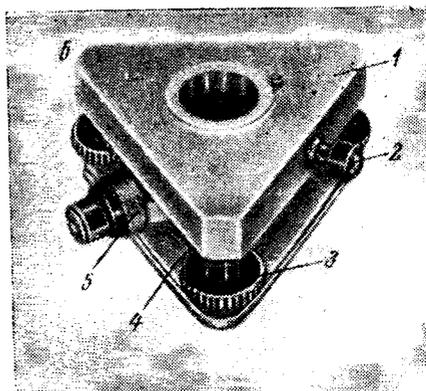
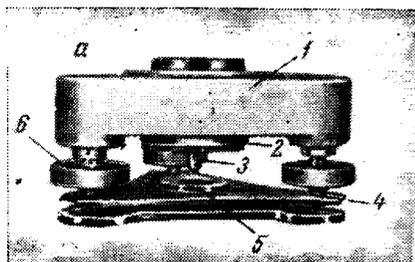


Рис. 49. Подставки теодолитов ТТ-5 и ТБ-1

Треножник соединяется со штативом при помощи полого станового винта, ввинчивающегося в плоскую пружину, плотно прижимающую подъемные винты к головке штатива. В большинстве случаев теодолиты могут легко отделяться от подставок и соединяться с треножниками посредством цилиндрических втулок 4 (см. рис. 38, а) и 9 (см. рис. 41) и закрепляться винтами 6 (см. рис. 38, а) и 2 (рис. 49, б).

Основные части подставки теодолита ТТ-5 (рис. 49, а): корпус 1, подъемные винты 6, шайба 2 с крючком 3 для крепления отвеса и пластинчатая пружина 4, в центральной части которой укреплена втулка 5 с резьбой для станового винта.

Отделяющаяся подставка оптического теодолита ТБ-1 (рис. 49, б) состоит из корпуса 1, подъемных винтов 3, оптического отвеса 5, закрепительного винта 2 и пластинчатой пружины 4.

Треножник оптического теодолита ТОМ не может быть отделен от теодолита без разборки (см. рис. 38, б). Втулка 4, в которой вращается ось лимба 2, жестко скреплена с треножником 5, а сам треножник соединен с основанием 8 болтами 9. Основание при помощи втулки 10 скрепляется со штативом. Оно является дном металлического футляра теодолита.

На рис. 39 показан разрез подставки горного теодолита Т20. Конструкция подставки 7 учитывает возможность установки на штативе и подвески на консоли. Инструмент приводится в рабочее положение двумя винтами 8, расположенными перпендикулярно друг к другу. Этим винтам противодействуют два контрупора с пружинами 9. Инструмент может отклоняться от вертикали на $\pm 5^\circ$.

Интересна подставка теодолита ТЕ-В1 производства завода MOM в Венгерской Народной Республике (рис. 50).

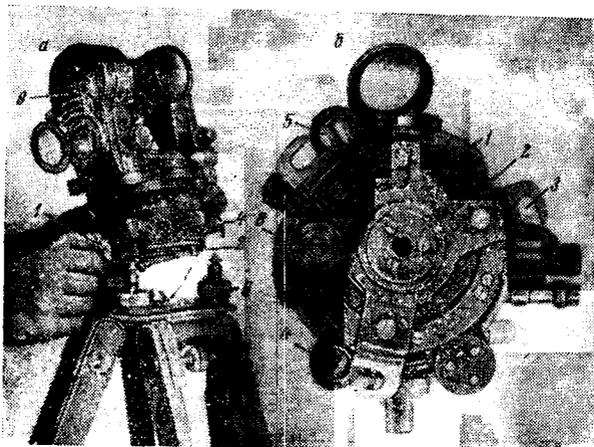


Рис. 50. Подставка теодолита ТЕ-В1

Корпус 4 подставки соединен с вертикальной осевой системой и отделяется от подъемных винтов 6, укрепленных на металлическом треугольнике 7, который крепится к штативу при помощи станового винта. Корпус подставки имеет углубления 5 для вершин подъемных винтов 8 (см. рис. 42, б) и снизу несет фигурную пластину 7 (см. рис. 42, б) с вырезами 3 (рис. 50, а). Эта пластина при помощи пружины 9 оказывается против углублений 5 (рис. 50, а). Вращая винт 1, пластину 2 можно повернуть, преодолевая действие пружины, в положение, показанное на рис. 50, б. В этом положении, придерживая винт 1, устанавливают теодолит так, чтобы вершины подъемных винтов вошли в свои пазы, после чего винт отпускают. Под действием пружины пластина поворачивается и теодолит закрепляется на подъемных винтах.

В современных подставках применяют подъемные винты с закрытой регулировкой. Такие винты предохранены от загрязнения и работают плавно без люфтов.

На рис. 51, а показан подъемный винт с закрытой регулировкой, осуществляемой глухой гайкой 1, ввинченной в корпус 2 подставки, регулировочной гайкой 4, навинченной на нижнюю часть глухой

гайки 1, и разрезной втулкой-гайкой 3, в которую ввинчен подъемный винт. Вращая гайку 4, можно затягивать конусную разрезную гайку 3 и тем самым регулировать ход подъемного винта. Сверху глухая гайка 1 закрыта заглушкой 5.

Иная конструкция подъемного винта с закрытой регулировкой показана на рис. 51, б. Винт ввинчен в нижнюю разрезную гайку 1, завинченную в корпус подставки 2. Разрезная гайка затягивается вращением регулировочной гайки 3.

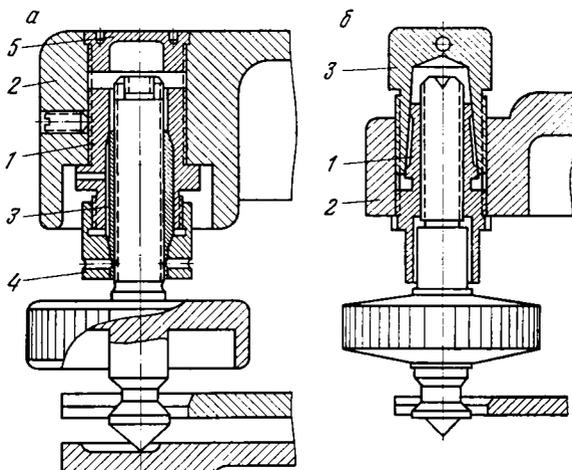


Рис. 51. Подъемные винты

Шаг s и диаметр d головки подъемного винта должны быть выбраны так, чтобы наименьшему, ощутимому рукой повороту головки винта соответствовал наклон вертикальной оси, равный точности установки уровня и принимаемый равным $0,2 \tau$. Для подставки с тремя подъемными винтами значения s и d определяют по формуле

$$s = d \frac{\pi 0,2 \tau 1,5 h}{(0,2 \div 0,5) \rho} = d \frac{0,94 \tau h}{(0,2 \div 0,5) \rho}, \quad (III,5)$$

где τ — цена деления уровня;
 h — расстояние от подъемного винта до оси прибора;
 $0,2 \div 0,5$ мм — величина поворота ободка головки, ощутимая рукой.

§ 38. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ОСИ И МИКРОМЕТРЕННО-ЗАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА В НИВЕЛИРАХ. ЭЛЕВАЦИОННЫЙ ВИНТ

Вертикальные осевые системы нивелиров менее сложны, чем гео-долитов. Ось или втулка этих систем неподвижны.

На рис. 52, а показан разрез вертикальной осевой системы технического нивелира НВ-1. Вертикальная ось 1, прикрепленная

наглухо к опорной площадке, вращается во втулке 2, скрепленной с треножником 3. Давление оси передается через коническую пату 4 на стальной подпятник 5. Винт 6 препятствует смещению вертикальной оси вверх. Микрометренно-зажимное устройство с центральным

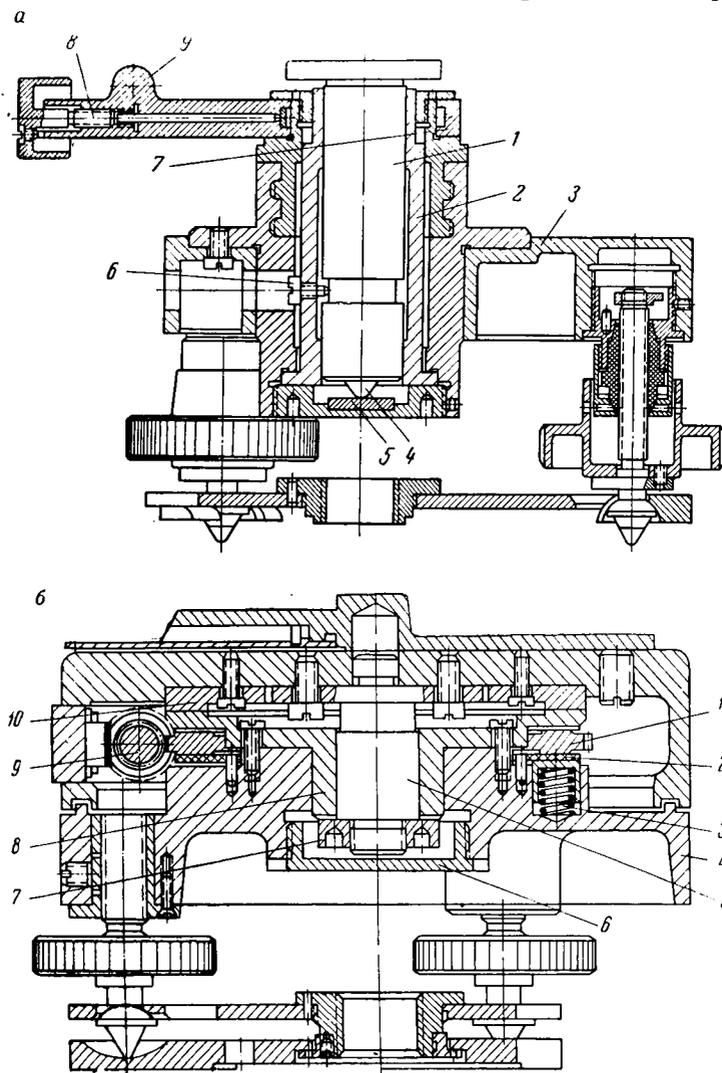


Рис. 52. Вертикальные оси нивелиров

радиальным закреплением состоит из хомутика 7, зажимного винта 8, наводящего винта и контршупора, расположенных на вилке опорной площадки (на рис. 52, а не показаны), между которыми зажат прилив 9.

В современных нивелирах применяют вертикальные оси с бесконечным наводящим винтом.

На рис. 52, б приведен вертикальный разрез осей и подставки велира НСМ-2А. В системе вертикальной оси верхняя опорная поверхность бронзовой втулки 8 является направляющей. По ней скользит стальное кольцо 10, прикрепленное к основанию зрительной трубы. Для центрирования служит стальная цилиндрическая втулка 5, на нижнюю часть которой навинчена предохранительная крышка 7, закрытая колпачком 6.

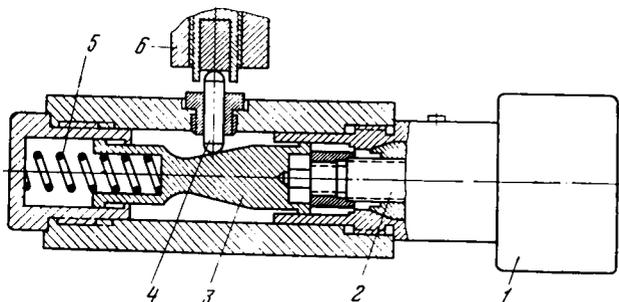


Рис. 53. Элевационный винт нивелира НВ-1

Между втулкой и подставкой 4 расположена шестерня 1, входящая в зацепление с бесконечным наводящим винтом 9. Через кольцо шестерня 1 поджимается к втулке 8 пружинами 3. Пружины растянаны так, что момент силы трения, возникающий при вращении шестерни относительно втулки 8, в два раза больше момента силы трения между стальным кольцом 10 и опорной поверхностью втулки 8. Поэтому при грубом наведении нивелира на рейку труба перемещается вместе с шестерней довольно легко и устанавливается в нужном направлении достаточно надежно без зажимного винта. При вращении наводящего винта шестерня остается неподвижной, а зрительная труба медленно поворачивается вокруг вертикальной оси.

В некоторых конструкциях нивелиров применяют элевационный винт, при помощи которого можно поднимать или опускать один конец трубы или уровня. Элевационные винты требуют малого усилия и поэтому быстро изнашиваются. В последнее время они выполняются в виде подвижного клина.

На рис. 53 показан разрез подвижного клина элевационного винта технического нивелира НВ-1. При вращении головки 1 винта 2 перемещается подвижный клин 3. При этом он двигает штырь 4, который, в свою очередь, передает движение на прилив 6 корпуса зрительной трубы. При вывинчивании винта пружина 5 перемещает клин вправо и штырь опускается вниз.

V § 39. ИСПРАВИТЕЛЬНЫЕ ВИНТЫ УРОВНЕЙ И СЕТОК НИТЕЙ

Исправительные винты служат для приведения основных метрических элементов инструмента в сопряжения, определяемые геометрической схемой. В современных инструментах, как прав сохранность перпендикулярности горизонтальной оси вращения трубы вертикальной оси вращения инструмента гарантирует изготовитель. Поэтому подставки трубы не снабжаются исправительными винтами. Рассмотрим исправительные винты уровней и сеток нитей.

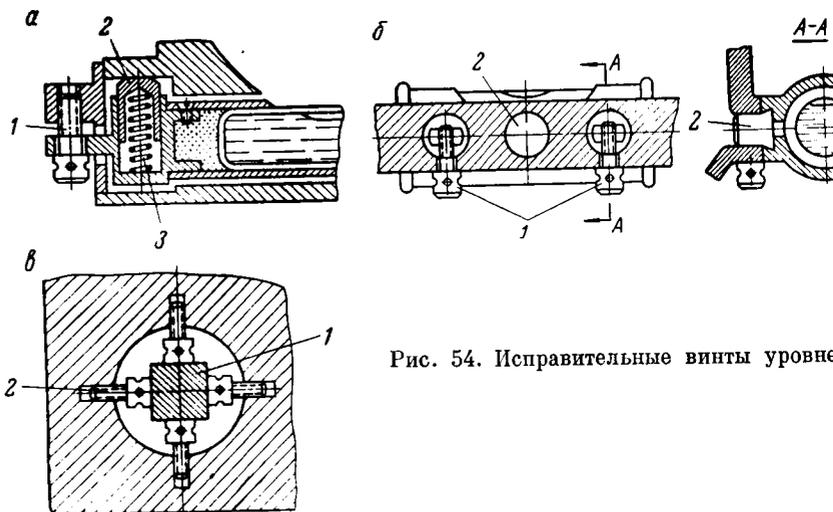


Рис. 54. Исправительные винты уровней

На рис. 54 показаны конструкции исправительных винтов уровней, применяемых в настоящее время. Исправительный винт 1 и упор 2 с пружиной 3 позволяют наклонять ось уровня (рис. 54, а).

На рис. 54, б показана конструкция исправительных винтов уровня алидады вертикального круга. При попеременном вращении исправительных винтов 1 в разных направлениях осуществляется поворот оси уровня относительно оси 2.

В нивелирах часто используют исправительные винты конструкции, показанной на рис. 54, в. Квадратный конец 1 оправы уровня может перемещаться исправительными винтами 2 в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В современных инструментах применяются зрительные трубы с внутренним фокусированием, поэтому конструкция исправительных винтов сеток нитей стала иной, чем в старых инструментах. Исправительные винты сеток нитей выполняют теперь только функцию — перемещают сетку в горизонтальном и вертикальных направлениях. Поворот сетки нитей осуществляется поворотом

окуляра вместе с сеткой, общая втулка которых крепится к торцу зрительной трубы четырьмя винтами.

Исключением из этого правила могут служить исправительные винты сетки нитей нивелира НВ-1 (рис. 55, а). В этом нивелире сетка нитей крепится внутри окулярного конца трубы тремя стопорными винтами 1, которые входят в выточку оправы сетки нитей 2. Завод гарантирует установку сетки, однако в случае необходимости поворот сетки нитей может быть произведен после снятия окуляра 3 и ослабления винтов 1. Перемещение сетки в своей плоскости не предусмотрено.

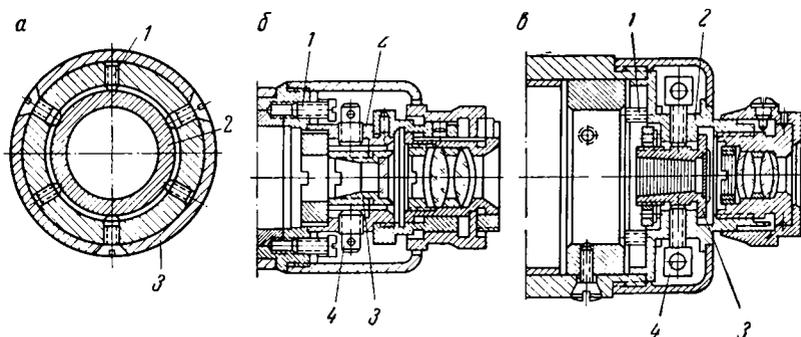


Рис. 55. Исправительные винты сеток нитей

На рис. 55, б приведен горизонтальный разрез окуляра и сетки нитей теодолита ТТ-5. Втулка 2 крепится к торцу трубы четырьмя винтами 1, а диафрагма сетки нитей 3 закрепляется во втулке 2 четырьмя исправительными винтами 4.

В нивелире НСМ-2А (рис. 55, в) втулка 2 крепится к торцу трубы четырьмя винтами 1, а оправа 3 сетки нитей снабжена только двумя исправительными винтами 4, перемещающими ее по вертикали.

§ 40. ШТАТИВЫ, КОНСОЛИ, УСТРОЙСТВА ЦЕНТРИРОВАНИЯ И СИГНАЛЫ

Штатив предназначен для установки инструмента в рабочее положение над (или под) точкой — станцией. Он состоит из металлической головки, на которую устанавливается инструмент; трех ножек, шарнирно соединенных с головкой; станového винта, при помощи которого подставка инструмента крепится к головке штатива.

На рис. 56, а показан штатив нивелира НВ-1. Головка 3 штатива из легкого металла шарнирно соединена с тремя деревянными ножками 1, верхние части 2 которых оправлены металлом.

Под головкой штатива имеются винты, зажимающие ножки штатива в шарнирах 4. В центре головки расположен становой винт. Оканчиваются ножки металлическими башмаками 6. Раздвижные ножки имеют зажимные барашки 5.

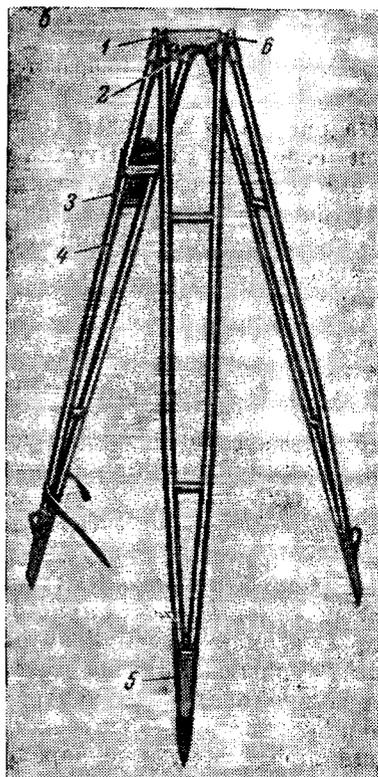
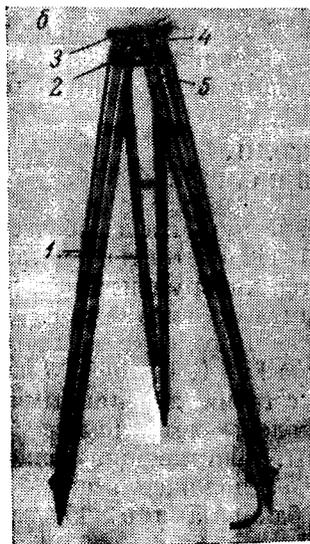
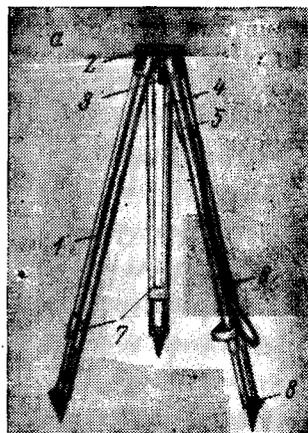
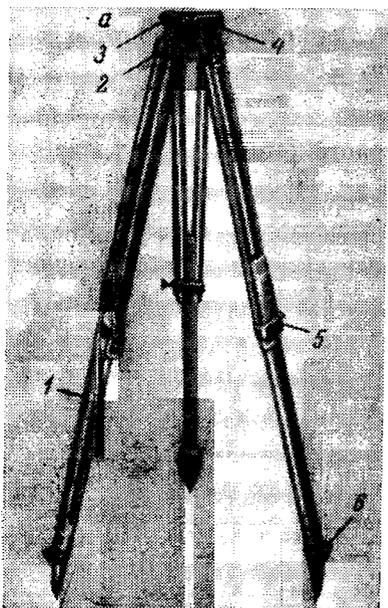


Рис. 56. Штативы нивелиров

Рис. 57. Штативы теодолитов

На рис. 56, б представлен штатив высокоточных нивелиров Н-1, НБ-3 и НА-1. В соответствии с высокими требованиями, предъявляемыми к нивелированию I, II и III классов точности, штатив имеет нераздвижные ножки 1, изготовляемые из твердого дерева. Верхние части 2 ножек шарнирно скреплены с головкой 3 штатива. Верхние части ножек и головка сделаны из прочного легкого металла. В центре головки имеется становой винт 5, а под головкой — три болта 4, которыми регулируется ход вращения ножек штатива.

Металлический штатив теодолита ТОМ (рис. 57, а) состоит из головки 2 и трех раздвижных ножек 1, шарнирно соединенных с головкой. Выдвижные ножки оканчиваются металлическими башмаками 8 и закрепляются в любом положении в направляющих барашками 7. Становой винт 3 снабжен крючком 4 для подвешивания отвеса. К одной из ножек крепится ремень 6 для переноски штатива и пенал 5 для укладки отвеса.

Интересна конструкция штатива высокоточного оптического теодолита ОТ-02М (рис. 57, б). Штатив состоит из головки 1 и трех нераздвижных ножек 4, которые шарнирно соединены с головкой посредством круглых стержней 6. Под головкой штатива в специальной оправе находится становой винт 2. Ножки штатива заканчиваются металлическими башмаками 5, которые имеют упоры для вдавливания в грунт. Одна из ножек штатива снабжена пеналом 3 для упаковки отвеса и ключа для регулирования хода вращения ножек.

При прокладке теодолитных ходов в подземных выработках с интенсивным движением, а также при теодолитных съемках наклонных и крутопадающих выработок, где неудобно пользоваться штативом, пользуются консольными комплектами.

На рис. 58 показан теодолитный консольный комплект ТК-5, который может быть применен в выработках с различными видами крепления — специальной шахтной крепью уголкового сечения, крепью двутаврового сечения и деревянной крепью. Комплект ТК-5 предназначен для установки и автоматического центрирования теодолитов ТФ-5, ОМТ-30 и сигнала ТС-5.

Постоянная часть консоли — подставка 1 может передвигаться по прорези ввилке 15 и закрепляться зажимным винтом 16. Вилка

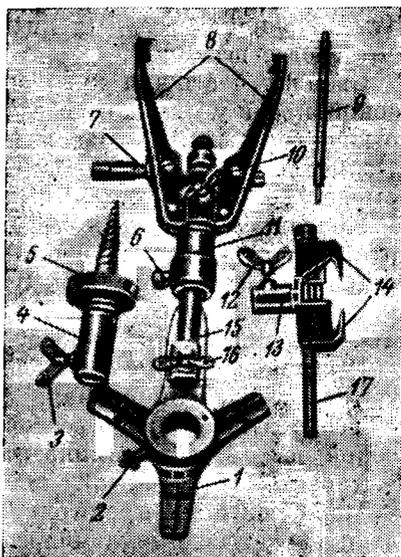


Рис. 58. Теодолитный консольный комплект ТК-5

подставка скрепляется в нужном положении с корпусом шарового шарнира 11 при помощи зажима шарнира 6. Хвостовая часть шарнира входит в съемную часть консоли и крепится зажимным винтом 10. Закрепление теодолита на подставке во время маркшейдерской съемки осуществляется вращением винта 2. Штырь 4 с винтовой нарезкой используется для крепления консоли к дереву. Одним концом штырь ввинчивается в стойку, а другим надевается на хвостовик шарового шарнира подставки и зажимается винтом 3. Для обеспечения жесткости крепления к стойке служит зажимная гайка 5. Штырь ввинчивается в стойку при помощи воротка 9, вставленного в отверстие штыря 4.

Съемная часть для крепления на специальной шахтной металлической крепи уголкового сечения состоит из двух лап зажима 8. При помощи винта 7 с правой и левой резьбой и гаек лапы разводят и, зацепив за кромки профиля крепления, зажимают консоль при помощи воротка.

Консоль крепится к крепи двутаврового сечения губками 14, которые стягиваются винтом 17 при помощи рукоятки 9. Подставка соединяется с губками при помощи втулки 13, которая надевается на хвостовик шарнира и закрепляется винтом 12. Весь комплект ТГ-5 содержит три набора.

При производстве маркшейдерских съемок теодолитом ТГ-5 пользуются комплектом сигнала ТС-5, состоящим из двух сигналов.

Теодолитный сигнал состоит из марки 8 в оправе, вилки 9, конической оси 11, треножника 3 с подъемными винтами 2 (рис. 59, а) и стойки 1 (рис. 59, б).

Марка сигнала крепится в вилке на двух полуосях 6 и может устанавливаться при помощи визира 7 перпендикулярно визирному лучу. Вилка устанавливается в цилиндрической шейке конической оси и через хомутик 5 закрепляется винтом 10. Коническая ось 11 имеет площадку 12 с взаимно перпендикулярными уровнями 4 (рис. 59, а).

Треножник сигнала в нижней части снабжен сферической головкой 15, которая предназначена для автоматического центрирования и крепления во втулке консоли.

Сигнал крепится к штативу становым винтом, который ввинчивается в резьбу сферической головки. Коническая ось закрепляется винтом 13.

Во время работы необходимо устанавливать центр марки на одной высоте с горизонтальной осью трубы теодолита ТГ-5. Постоянная высота центра марки от острия подъемных винтов достигается сохранением постоянной длины одного подъемного винта 14 и выведением пузырьков уровней на середины.

Установка горизонтальной оси теодолита на высоте марки сигнала достигается при помощи контрольной установочной шайбы 1 (рис. 59, а), устанавливаемой на одном из подъемных винтов теодолита ТГ-5 (рис. 59, в). Вращением этого винта контрольная шайба зажимается между торцами втулки подставки и головки подъемного винта. После

этого при помощи двух других подъемных винтов лимб приводится в горизонтальное положение. В результате центр марки и горизонтальная ось теодолита окажутся на одной высоте (214 ± 1 мм) от острий подъемных винтов.

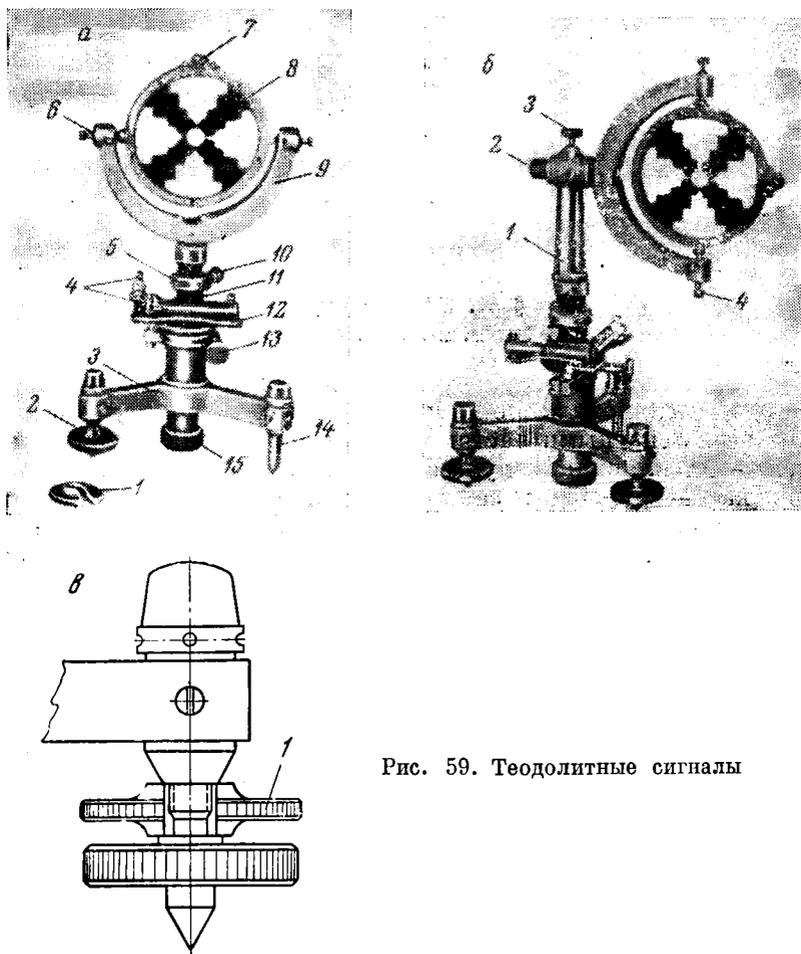


Рис. 59. Теодолитные сигналы

При работе с эксцентренной трубой ЭТ-5 на место марки в конической оси 11 устанавливается стойка 1 (рис. 59, б). Ось кронштейна 2 вставляется во втулку стойки до упора и зажимается винтом 3. Вращением винтов 4 центр марки приводится к высоте 214 ± 1 мм от острия подъемных винтов.

Г Л А В А IV

УРОВНИ

B-22

§ 41. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО УРОВНЕЙ

Уровни служат для ориентирования осей и плоскостей инструмента относительно отвесной линии и для измерения малых отклонений от нее. Основными частями уровня являются: чувствительный элемент — стеклянная ампула с жидкостью и оправка для установки уровня на инструменте и защиты ампулы от внешних воздействий.

Уровни по форме подразделяются на ц и л и н д р и ч е с к и е и к р у г л ы е. Ампулы цилиндрических уровней представляют собой стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой (или часть ее) имеет форму поверхности вращения дуги окружности вокруг стягивающей ее хорды (рис. 60, а и б). Рабочая часть внутренней поверхности круглого уровня представляет собой сферическую поверхность (рис. 60, в).

Для изготовления ампул используются два сорта стекла: термометрическое, соответствующее требованиям ГОСТ 1224—41, и жароустойчивое (пирекс) с большим содержанием SiO_2 , достигающим 80%, типа МКР-1.

Ампулы заполняются прозрачной маловязкой жидкостью с низкой температурой замерзания. Лучшим наполнителем является серный наркозный эфир. Для уровней малой точности применяют этиловый или метиловый спирт.

После заполнения горячей жидкостью ампула запаивается. По остывании жидкости объем ее сокращается. При этом образуется пространство, заполненное ее парами, которое называется п у з ы р ь к о м у р о в н я.

Нормальная длина пузырька составляет 0,3—0,4 длины ампулы при температуре $+20^\circ\text{C}$. Уменьшение длины пузырька приводит к снижению чувствительности уровня; длинный пузырек неудобен, так как его концы могут скрываться под оправой.

Простые ампулы (рис. 60, а) неудобны тем, что с изменением температуры воздуха резко меняется длина пузырька из-за изменения

объема наполнителя. Чтобы сохранить длину пузырька при разных температурах, применяют компенсированные ампулы. Принцип устройства такой ампулы основан на сокращении объема наполнителя, для чего в ампулу помещают стеклянную трубку с запаянными концами (рис. 61, а).

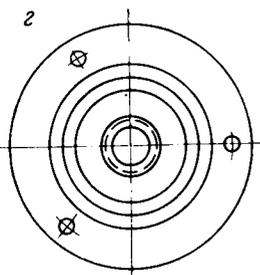
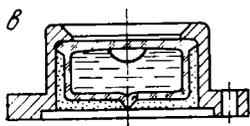
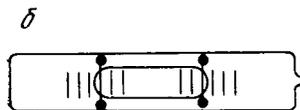


Рис. 60. Ампулы цилиндрического и круглого уровней

Для получения уровня с регулируемой длиной пузырька используют ампулы с запасными камерами

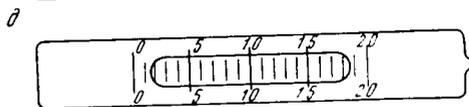
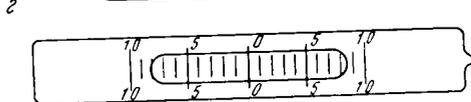


Рис. 61. Компенсированная и камерная ампулы. Ампула реверсионного (поворотного) уровня

(рис. 61, б). Запасная камера отделяется от рабочей стеклянной перегородкой с отверстием внизу. Наклоняя концы уровня, можно перемещать часть паров наполнителя из одной камеры в другую и тем самым регулировать длину пузырька.

В некоторых инструментах применяют реверсионные (поворотные) уровни (рис. 61, е). У реверсионных уровней имеются две рабочие поверхности, расположенные на противоположных сторонах внутренней поверхности ампулы.

На ампулах односторонних уровней с одной стороны, а на реверсионных с двух сторон нанесены равномерные шкалы. Интервал между штрихами шкалы установлен ГОСТ 2386—62 и равен 2 мм. Штрихи могут быть пронумерованы через каждые 5 или 10 делений от среднего нулевого штриха в обе стороны (рис. 61, з) или от одного

из крайних штрихов в одну сторону (рис. 61, *д*). На ампулах установочных уровней (см. рис. 60, *б*) штрихи не нумеруются и в средних частях не наносятся. На противоположных сторонах реверсионных уровней одноименные штрихи наносятся с точностью $\pm 0,2$ деления. Снаружи на рабочей поверхности ампулы круглых уровней штрихи наносятся в виде концентрических окружностей, радиусы которых отличаются один от другого на 2 мм (см. рис. 60, *з*).

Рабочей зоной ампулы считается та ее часть, на которой нанесена шкала. Для ампул с перекрестием величина рабочей зоны принимается равной 0,6 длины ампулы в средней ее части. Ширина рабочей зоны должна быть больше ширины пузырька на 1,4 мм (по 0,7 мм в каждую сторону).

§ 42. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ УРОВНЯ И ТИПЫ АМПУЛ

Средняя точка O' дуги ab (рис. 62) рабочей поверхности уровня, ограниченная концами пузырька, называется с е р е д и н о й п у з ы р ь к а. Касательная к середине пузырька всегда горизонтальна. Средняя точка O шкалы, нанесенной на ампуле, называется н у л ь -

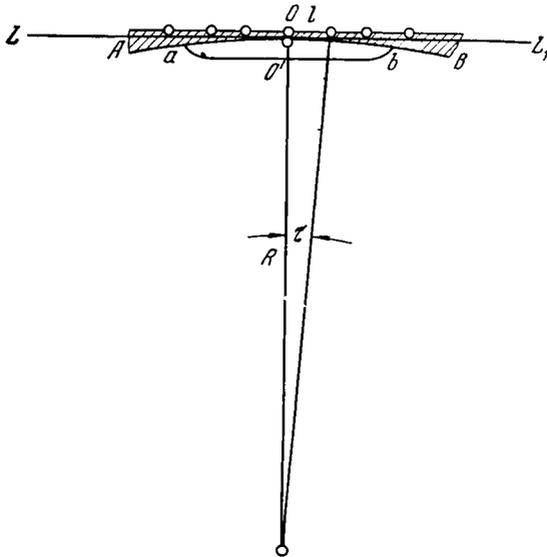


Рис. 62. Геометрические элементы уровня

п у н к т о м. Касательная LL_1 к дуге AB в точке, соответствующей нульпункту, называется о с ь ю у р о в н я.

Если середина пузырька совпадает с нульпунктом, то ось LL_1 уровня горизонтальна, если не совпадает — наклонна. Угол наклона t оси уровня при смещении пузырька на одно деление называется

ценой деления уровня. Цена деления уровня определяется по формуле

$$\tau = \frac{l}{R} \rho = \frac{2}{R} \rho, \quad (\text{IV},1)$$

где l — длина одного деления шкалы ампулы, мм ($l = 2$ мм);
 R — радиус дуги AB , мм.

В табл. 5 приведены характеристики некоторых ампул * в соответствии с ГОСТ 2386—62.

Таблица 5

Тип ампулы	Характеристика	Цена деления уровня	Диаметр ампулы, мм	Высота или длина на ампуле, мм	Диаметр или длина пузырька при +20° С, мм	Радиус рабочей сферы дуги, мм
Круглые ампулы						
АК	Сферические малой точности со шкалой в виде круговых рисок	20'	17	10	5	344
		10'	17	10	5	688
		5'	17	10	5	1 376
Цилиндрические ампулы						
АЦП	Простые (с постоянной при заданной температуре длиной пузырька) малой и средней точности со штриховой шкалой или перекрестием в центре (вместо шкалы)	10'	7,5	23	6	688
		4'	7,5	33	8	1 719
		60"	11	54	18	6 876
		30"	11	54	18	13 751
		15"	12	64	20	27 502
	10"	12	64	20	41 252	
АЦК	Компенсированные (с компенсационной палочкой) средней и высокой точности со штриховой шкалой или перекрестием в центре (вместо шкалы)	20"	14	124	36	20 626
		15"	14	124	36	27 502
		10"	14	124	36	41 252
		4"	14	124	36	103 132
АЦР	Камерные (с регулируемой длиной пузырька) средней и высокой точности со штриховой шкалой	20"	15	124	30	20 626
		15"	15	124	36	27 502
		10"	15	124	36	41 252
		4"	16	155	44	103 132
		2"	16	155	44	206 265
		1'	20	226	50	412 530

Ампулы, предусмотренные ГОСТ 2386—62, должны изготавливаться с номинальной ценой деления: свыше 1' — ампулы малой точности; свыше 5" до 1' — ампулы средней точности; до 5" — ампулы высокой точности.

* ГОСТ 2386—62 на реверсионные ампулы не распространяется.

Приведем примеры условных обозначений ампул.

1) Ампула типа АК с ценой деления 10', диаметром 17 мм:

$$AK\ 10' - 17\ GOST\ 2386-62.$$

2) Ампула типа АЦП с ценой деления 60", диаметром 11 мм, длиной 54 мм:

$$AC\P 60'' - 11 \times 54\ GOST\ 2386-62.$$

3) Ампула типа АЦК с ценой деления 10", диаметром 14 мм, длиной 124 мм:

$$ACK\ 10'' - 14 \times 124\ GOST\ 2386-62.$$

4) Ампула типа АЦР с ценой деления 2", диаметром 16 мм, длиной 155 мм:

$$ACR\ 2'' - 16 \times 155\ GOST\ 2386-62.$$

В-23 § 43. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛОННОСТИ ОСИ УРОВНЯ

Наклонностью оси уровня называется угол ε , который составляет ось уровня LL_1 с горизонтальной плоскостью или с касательной NN_1 к середине пузырька O' уровня (рис. 63). Наклонность вычисляется по формуле

$$\varepsilon = n\tau, \quad (IV,2)$$

где n — смещение нуля относительно середины пузырька в делениях шкалы уровня.

Значение n определяют из отсчетов по концам пузырька: L — левому, P — правому.

Условимся считать наклонность положительной, если правый конец приподнят или нульпункт находится слева от середины пузырька.

Определим наклонность в зависимости от оцифровки делений уровня.

1. Оцифровка делений на ампуле возрастает от нульпункта в обе стороны (см. рис. 61, z). Из рис. 63, a имеем

$$n = L + \frac{\text{длина пузырька}}{2} = L + \frac{P-L}{2} = \frac{1}{2}(L+P). \quad (IV,3)$$

Отсюда в соответствии с формулой (IV,2) получим

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\tau(L+P). \quad (IV,4)$$

Если условиться приписывать отсчетам, расположенным слева от нульпункта, знак минус, а расположенным справа — знак плюс, то положительной наклонности будет соответствовать приподнятость правого конца уровня, а отрицательной — левого конца.

Пример. Даны: $L = -14,1$, $\Pi = -2,3$ и $\tau = 20''$, тогда формуле (IV,4)

$$\varepsilon = 10'' (-14,1 - 2,3) = -164''.$$

При определении наклонности оси установочного уровня (см. рис. 60, б) штрихи, ограничивающие разрыв внутри шкалы, следует принимать за нулевые; отсчеты, идущие от них влево, будут отрицательными, а вправо — положительными.

2. Оцифровка делений на алидаде возрастает от одного конца другому (рис. 61, д). В этом случае нульпункту будет соответствовать отсчет $\frac{1}{2} m$, где m — число делений шкалы.

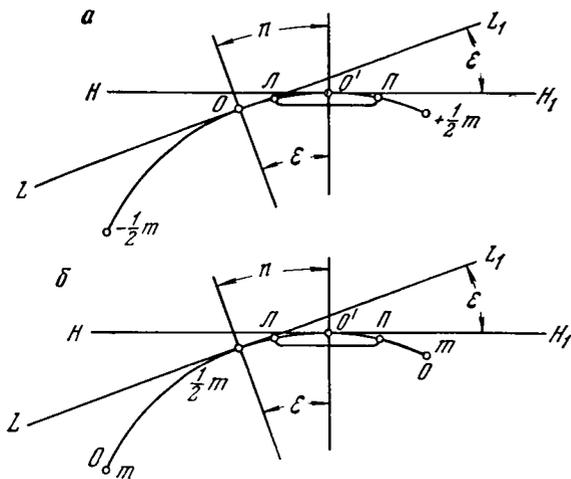


Рис. 63. Схема к определению наклонности оси уровня

Из рис. 63, б можно вывести две формулы для определения наклонности:

а) если нуль шкалы расположен слева от нульпункта, то

$$n = \frac{L + \Pi}{2} - \frac{1}{2} m = \frac{1}{2} [(L + \Pi) - m],$$

куда

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \tau [(L + \Pi) - m]; \quad (IV,5)$$

б) если нуль шкалы расположен справа от нульпункта, то

$$n = \frac{1}{2} m - \frac{L + \Pi}{2} = \frac{1}{2} [m - (L + \Pi)],$$

куда

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \tau [m - (L + \Pi)]. \quad (IV,6)$$

Пример. Пусть $\tau = 20''$, $L = 27,2$; $\Pi = 43,1$, нуль шкалы расположен слева и $m = 50$, тогда, в соответствии с формулой (IV,5), наклонность будет равна

$$\varepsilon = 10'' [(27,2 + 43,1) - 50] = 10'' \cdot 20,3 = +203''.$$

Для случая «нуль справа», очевидно, $L = 50 - 27,2 = 22,8$; $\Pi = 50 - 43,1 = 6,9$ и в соответствии с формулой (IV,6) наклонность будет равна

$$\varepsilon = 10'' [50 - (22,8 + 6,9)] = 10'' \cdot 20,3 = +203''.$$

В-25 § 44. УРОВНИ С ПРИЗМЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Для повышения точности выведения пузырька уровня на одну и совмещения во времени отсчета по рейке с наблюдением уровня в нивелирах используют уровни с призмными системами.

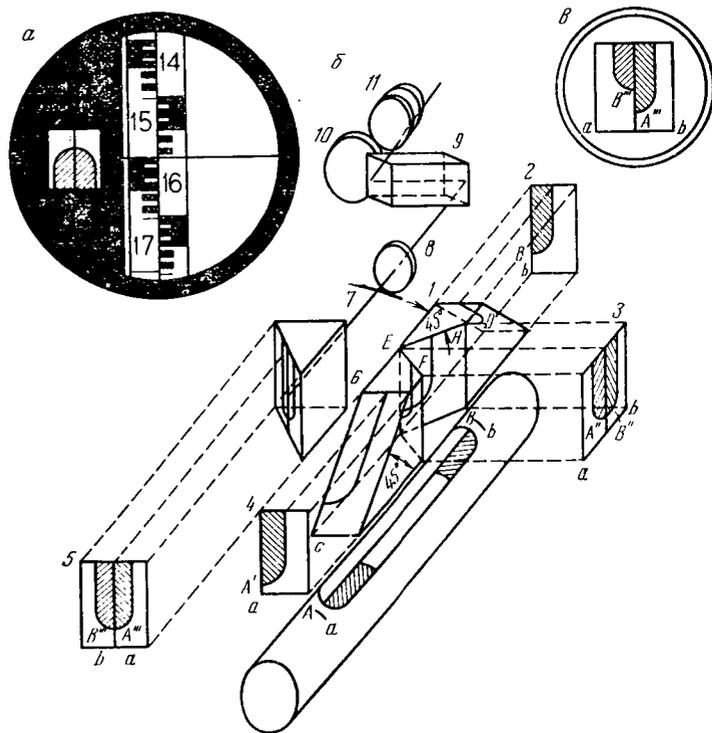


Рис. 64. Оптическая схема контактного уровня

На рис. 64, а показана схема совмещения изображений противоположных концов пузырька.

Призмы 1 и 6 (рис. 64, б) перекрывают правую половину пузырька, ограниченную линией АВ, и каждая призма в гранях Сб и ID создает мнимые изображения 4 и 2 концов пузырька. Эти изображения

в свою очередь, отражаются в гранях EF и EH этих же призм и совмещаются в одно изображение 3. Прямоугольная призма 7 строит мнимое изображение совмещенных концов пузырька в плоскости 5. Если ось уровня горизонтальна, то концы A''' и B''' будут совмещены, если ось уровня наклонена, то половинки концов разойдутся (рис. 64, e).

При этом используется способность глаза с высокой точностью оценивать совмещение одного штриха на продолжении другого. Точность установки пузырька на середину в контактном уровне возрастает в пять-шесть раз.

Правильная установка призмы относительно ампулы достигается совмещением штрихов a и b на изображении 5, расположенных симметрично относительно нуля ампулы.

Для совмещения изображений рейки и концов пузырька уровня в поле зрения трубы изображение 5 строится при помощи объектива 8 и призмы 9 в плоскости сетки нитей 10 и затем рассматривается через окуляр зрительной трубы 11.

Поэтому в поле зрения трубы (рис. 64, a) одновременно с рейкой мы видим изображение концов пузырька. Если увеличение объектива $8 \beta = 0,1$, а увеличение окуляра $\Gamma = 30\times$, то изображение концов пузырька будет рассматриваться с увеличением $\Gamma\beta = 3\times$.

§ 45. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ

Рассмотрим два способа определения цены деления уровня: на экзаменаторе и при помощи рейки.

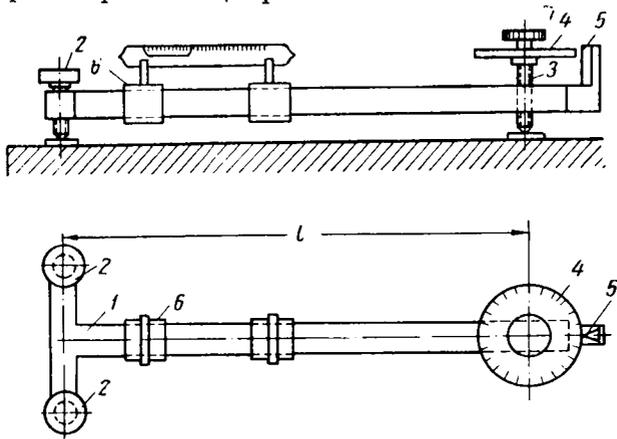


Рис. 65. Схема экзаменатора

Определение цены деления уровня на экзаменаторе. Экзаменатор представляет собой балку 1 (рис. 65), опирающуюся на три точки: на острия двух подъемных винтов 2 и острие микрометричного винта 3 с диском 4, на котором нанесено 120 или 180 делений. Балка несет

на себе две подвижные подставки (вилки) 6 для укладки уровня и индекс 5. Угол, на который наклоняется балка при повороте микрометренного винта на одно деление лимба (диска) 4, называется ценой деления лимба T . Шаг микрометренного винта, длина плеча l и число делений лимба подбираются так, чтобы $T = 1''$.

Основанием экзаменатора обычно служит металлическая станшина с тремя подъемными винтами и круглым уровнем, при помощи которых она приводится в горизонтальное положение. Основание экзаменатора должно устанавливаться на устойчивом каменном столбе в помещении с постоянной температурой воздуха во время исследования.

В табл. 6 приведен пример определения цены деления уровня на экзаменаторе при температуре воздуха $15^{\circ},7$ С.

Проследим порядок определения цены деления уровня.

Перед началом работы основание экзаменатора устанавливают горизонтально, а пузырек испытываемого уровня, уложенного на вилки экзаменатора, микрометренным винтом выводят на середину ампулы.

Рассчитав заранее, сколько полных оборотов n необходимо сделать микрометренным винтом (обычно каждый прием — один оборот), вывинчивают винт экзаменатора на $\frac{n}{2}$ оборотов и затем, вращая его на величину, меньшую полуоборота, устанавливают нуль лимба против индекса. После этого подъемными винтами экзаменатора устанавливают пузырек испытываемого уровня в положение, ближайшее к микрометренному винту, — крайнее положение (в пределах рабочей зоны), следя, чтобы при работе подъемными винтами не получилось бокового перекоса.

Эта предварительная установка делается для того, чтобы в процессе исследования работать только, ввинчивая микрометренный винт, и пользоваться витками его резьбы, расположенными симметрично относительно горизонтального положения балки.

В этом положении делают отсчеты по концам пузырька L_1 и P_1 и лимбу N_1 , а затем последовательно поворачивают микрометренный винт на 30 делений лимба и берут отсчеты: по диску N_1 , N_2 , N_3 и т. д. и по концам пузырька L_2 и P_2 , L_3 и P_3 и т. д., перегоняя постепенно пузырек уровня в крайнее (в пределах рабочей зоны) положение, ближайшее к подъемным винтам. Затем, действуя подъемными винтами, перегоняют его в крайнее положение, ближайшее к микрометренному винту, и снова ввинчивая последовательно микрометренный винт на 30 делений, делают отсчеты по концам пузырька. Эти действия повторяют до тех пор, пока микрометренный винт не сделает полный оборот (отсчет 180°). На этом заканчивается первый прием. Повторив эти действия еще два раза, завершают прямой ход трех приемов. Определение цены деления уровня выполняется минимум из трех приемов.

Для перехода к обратному ходу уровень переключают в вилках экзаменатора, микрометренный винт вывинчивают на n оборотов,

Таблица 6

№ приема	Прямой ход						Обратный ход					$v = n_{cp} - n_{m1}$	v^2	
	Отсчеты			Перемещение по в подде- лениях	Отсчеты		Перемещение по в подде- лениях	Длина пузырька	Длина пузырька	$n_{m1} = \frac{n_{11} + n_0}{2}$				
	эксам- патор	Л	П		эксам- патор	Л					П			
														2
1	0	9,3	24,6	45,3	16,80	180	24,7	9,4	15,3	16,80	16,80	16,80	+0,183	0,0336
	30	17,7	33,0	15,3	17,00	150	33,1	17,8	15,3	17,00	17,00	17,00	-0,017	0,0003
	60	26,2	41,5	15,3	17,00	120	41,6	26,3	15,3	16,90	16,90	16,95	+0,033	0,0010
	90	17,6	33,0	15,4	17,00	90	33,1	17,6	15,5	17,10	17,10	17,05	-0,067	0,0045
	120	26,1	41,5	15,4	16,80	60	41,6	26,2	15,4	17,20	17,20	17,00	-0,017	0,0003
	150	17,7	33,0	15,3	17,10	30	33,1	17,8	15,3	17,10	17,10	17,10	-0,117	0,0136
	180	26,2	41,6	15,4		0	41,7	26,3	15,4					
Из I приема $\frac{\tau}{2} = \frac{180}{101,90} = 1,77$											$n_{cp} = 16,983$	$\sum v^2 = -0,002$	$\sum v^2 = 0,0533$	
											$\sum n_{m1} = 101,90$			

$$m_{n_{cp}} = \pm \sqrt{\frac{0,0533}{6 \cdot 5}} = \pm 0,04$$

пройденных ввинчиванием в приемах прямого хода. Затем пузырек уровня перемещают подъемными винтами в крайнее положение, ближайшее к микрометричному винту. Далее в порядке, описанном для прямого хода, выполняют обратный ход.

После этого приступают к обработке наблюдений. По отсчетам концов пузырька вычисляют перемещения (n_n при прямом и n_o при обратном ходах) его в полуделениях по формуле

$$n = (J_i - J_{i-1}) + (II_i - II_{i-1}) \quad (IV,7)$$

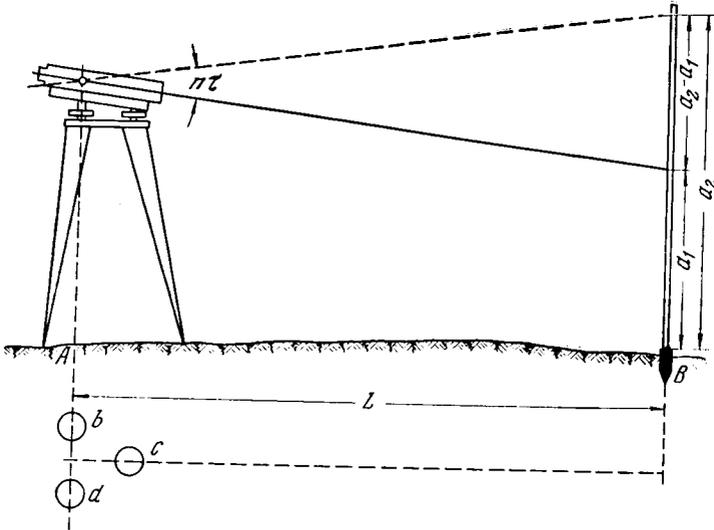


Рис. 66. Определение цены деления уровня по рейке

и их значения записывают в графы 6 и 11 табл. 6. Контролем служит постоянство длин пузырька, значения которых вписывают в графы 5 и 10. В графу 12 вписывают средние значения перемещений пузырька n_m из прямого и обратного хода. После вычисления среднего арифметического n_{cp} из значений n_m , в графу 13 вписывают вероятнейшие ошибки $v = n_{cp} - n_m$, а в графу 14 — их квадраты. Цена деления уровня из одного приема вычисляется по формуле

$$\frac{1}{2} \tau = \frac{TN}{\sum n_m} = \frac{180''}{101,90} = 1'',77.$$

В-26
 Определение по рейке цены деления уровня нивелира или уровня, укрепленного на трубе теодолита. Рейку устанавливают на прочно забитый в землю кол B , в верхнюю часть которого вбивается гвоздь со сферической шляпкой. Инструмент устанавливают на расстоянии $L = 40-50$ м от рейки в точке A так, чтобы один из подъемных винтов оказался на линии AB (рис. 66).

После нивелирования инструмента наводят его трубу на рейку и, ввинчивая подъемный винт c (элевационный или наводящий винт трубы), смещают пузырек уровня к концу ампулы и берут отсчеты по рейке a_1 и концам пузырька L_1 и P_1 . Действуя этим же винтом, изменяют отсчет на рейке и снова берут отсчеты концов пузырька L_2 и P_2 и т. д.

При переходе к другому приему рейку ставят на другой кол или изменяют горизонт инструмента.

Из рис. 66 легко установить, что

$$\tau = \frac{(a_2 - a_1)}{Ln} \rho, \quad (\text{IV}, 8)$$

где n — наклонность оси уровня в делениях.

В табл. 7 приведен пример определения цены деления уровня нивелира по рейке. Расстояние от нивелира до рейки 40 м. На испытываемом уровне нанесено 50 делений, и нуль шкалы уровня при наблюдении расположен слева. Поэтому наклонность в полуделениях вычислялась по формуле

$$n = (L + P - 50).$$

Обычно для определения цены деления производят не менее четырех полных приемов.

В табл. 8 приведен пример определения цены деления технического нивелира по рейке. Нуль шкалы уровня на середине, поэтому отсчетам слева от нуль-пункта приписывался знак «минус», а справа от нуль-пункта — знак «плюс».

После установки нивелира в рабочее положение середину пузырька перемещают подъемным винтом влево от нуль-пункта (или вправо) на несколько делений и берут отсчеты по рейке и по концам пузырька уровня L_1 и P_1 . Затем тем же подъемным винтом перемещают пузырек в другую сторону от нуль-пункта и вновь берут отсчеты по рейке и по концам пузырька уровня L_2 и P_2 .

По формуле (IV,3) вычисляют отклонения середины пузырька от нуль-пункта:

$$a_1 = \frac{L_1 + P_1}{2} \quad \text{и} \quad a_2 = \frac{L_2 + P_2}{2}.$$

Сумма абсолютных значений $|a_1| + |a_2| = p$ дает смещение середины пузырька уровня между двумя его установками.

Цена деления уровня определяется по формуле

$$\tau = \rho \frac{h}{dp},$$

где h — разность отсчетов по рейке;

d — расстояние от нивелира до рейки, мм;

p — смещение пузырька в делениях.

Между приемами изменяют расстояние от нивелира до рейки.

Таблица 7

№ призма	Отсчеты по рейке а	Отсчеты по концам лугзырька уровня				Наклонность оси уровня в полуделе-ниях		Среднее значение наклона из двух ходов	Расстояние по рейке в 1/2 мм $a_2 - a_1$	Число полуделе-ний n	Примечание
		Прямой ход		Обратный ход		Прямой ход	Обратный ход				
		Л	П	Л	П						
						Л	П				
I	34,6	28,3	7,9	28,3	7,9	-13,8	-13,8	10	14,20	$t_1 = +12^{\circ},6 \text{ C}$	
	34,5	35,3	14,9	35,5	15,1	+0,2	+0,6	10	14,70		
	34,4	42,7	22,3	42,8	22,4	+15,0	+15,2				
	34,6	27,6	7,1	27,5	7,0	-15,3	-15,5	10	14,20	Подъемными вин-тами немного из-менил горизонт инструмента.	
	34,5	34,7	14,2	34,6	14,1	-1,1	-1,3	10	14,60	$t_2 = +12^{\circ},9 \text{ C}$	
	34,4	42,0	24,5	44,9	24,4	+13,5	+13,3				
II	32,9	27,8	7,7	28,0	7,9	-14,5	-14,1	10	14,35	$t_3 = +13^{\circ},2 \text{ C}$	
	32,8	35,0	15,0	35,1	15,0	0,0	+0,1	10	14,80		
	32,7	42,4	22,4	42,5	22,4	+14,8	+14,9				
	32,9	26,1	6,1	26,1	6,0	-17,8	-17,9	10	14,25	Подъемными вин-тами немного из-менил горизонт инструмента	
	32,8	33,2	13,1	33,3	13,2	-3,7	-3,5	10	14,65	$t_4 = +13^{\circ},5 \text{ C}$	
	32,7	40,5	20,5	40,6	20,5	+11,0	+11,1				

$$\frac{\tau}{2} = \frac{80 \cdot 206 \cdot 265}{115,75 \cdot 40 \cdot 000 \cdot 2} = 1,782$$

$$\sum_{-a_1}^{a_2} = 80$$

$$\sum n = 115,75$$

Таблица 8

Отсчеты по рейке	Отсчеты по концам пузырька		$\frac{L+II}{2} = a$ $ a_1 + a_2 = p$
	L	II	
	I прием $d = 37,80$ м		
1828	-5,5	+2,3	$a_1 = -1,6$
1812	-1,3	+6,5	$a_2 = +2,6$
$h = 16$ мм	-4,2	-4,2	$p = 4,2$
	II прием $d = 31,04$ м		
1729	-6,1	+1,9	$a_1 = -2,1$
1716	-1,6	+6,3	$a_2 = +2,4$
$h = 13$ мм	-4,5	-4,4	$p = 4,5$
<p>Из I приема $\tau = \frac{206\ 265 \cdot 16}{37\ 800 \cdot 4,2} = 20",8;$</p> <p>Из II приема $\tau = \frac{206\ 265 \cdot 13}{31\ 040 \cdot 4,5} = 19",2;$</p> <p>$\tau_{cp} = 20",0.$</p>			

Порог чувствительности ампулы (ГОСТ 2386—62) определяется минимальным углом δ ее наклона, при котором перемещение пузырька становится заметным невооруженным глазом (0,2 мм). В этом случае угол наклона цилиндрической ампулы должен выражаться углом, не превышающим 15% ее цены деления, а угол наклона круглой ампулы — углом, не превышающим 20%.

Порог чувствительности ампулы зависит от ее цены деления, качества шлифовки и чистоты внутренней поверхности, длины пузырька, температуры и свойств наполнителя. Подвижность пузырька уровня прямо пропорциональна разности давлений на его концах, преодолевающей силу прилипания заполнителя к стеклу.

При данном угле наклона ϵ оси уровня разность давлений на концах длинного пузырька будет больше, чем на концах короткого. Порог чувствительности в первом случае меньше, чем во втором.

Порог чувствительности определяют на экзаменаторе. Уровень укладывается на вилки экзаменатора, приведенного в рабочее положение.

После установки пузырька уровня в пределах рабочей зоны и затухания его колебаний берут отсчеты L и II по концам пузырька и a_1 по диску микрометричного винта. Вращая микрометричный винт, смещают пузырек уровня и затем вновь устанавливают его в прежнее

положение, чтобы отсчеты по его концам были L и II , и снова берут отсчет по диску микрометричного винта a_2 . Такие измерения делают на различных частях ампулы. Разности отсчетов микрометричного винта $\delta\epsilon_1 = a_1 - a_2$ будут определять пороги чувствительности на разных частях рабочей зоны ампулы.

Порог чувствительности уровня определяется как среднее арифметическое из $\delta\epsilon_1$, $\delta\epsilon_2$ и т. д. для разных частей рабочей зоны.

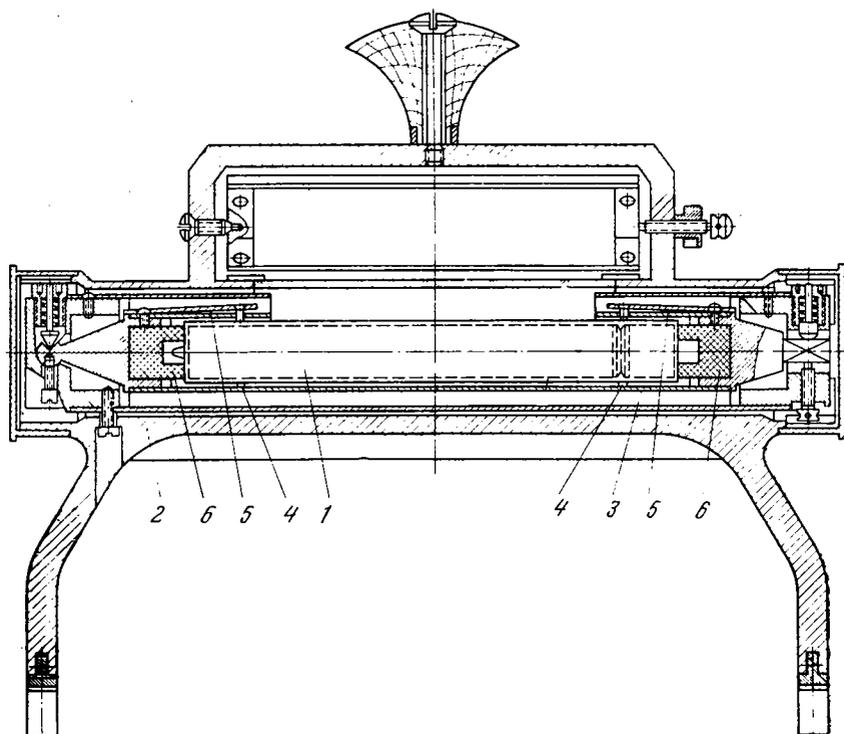


Рис. 67. Оправа цилиндрического уровня

Исследования ведут при температуре $+20^\circ\text{C}$ и при нормальной длине пузырька. Экзаменатор устанавливают на каменном столбе, не связанном с полом помещения.

На величину цены деления и порога чувствительности уровня большое влияние оказывают деформации ампулы. Основная причина деформации ампулы при жестком соединении ее с оправой — это деформация оправы под влиянием изменения температуры. Для соединения ампул с оправой пользуются гипсом, прокладками и точечными упорами. Гипс используют только в том случае, если цена деления ампул больше $20-30''$. Если цена деления ампул меньше этой величины, то следует крепить при помощи прокладок

и точечных упоров. Концы ампулы закрепляются двумя жесткими и одним пружинящим упорами.

На рис. 67 показана конструкция накладного цилиндрического уровня, ампула 1 которого защищена от внешних воздействий несколькими оправами. Оправа 2, соединенная с подставками, изготовлена из сплава алюминия. Ампула находится во внутренней оправе 3 и лежит на четырех точечных опорах 4 (по две с каждого конца) и прижимается к ним давлением плоских пружин 5. Поэтому деформации оправы не передаются на ампулу. С торцов ампула не закреплена и предохраняется от толчков пробковыми прокладками 6.

Исследованиями установлено, что пузырек уровня, не имеющего особых приспособлений, устанавливается на середине с ошибкой $\pm 0,14 \tau''$; контактного уровня — с ошибкой $\pm \frac{\tau''}{25}$ и контактного уровня с лупой — с ошибкой $\pm \frac{\tau''}{25\Gamma}$, где Γ — увеличение лупы, равное 2—3 \times .

Г Л А В А V

ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА В УГЛОМЕРНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

§ 46. ВИДЫ ОТСЧЕТНЫХ УСТРОЙСТВ

Измерения углов сопровождаются отсчетами. Отсчетом называется величина дуги между нулевым штрихом шкалы лимба и индексом (нулем алидады). Штрихи лимба, между которыми оказывается индекс, соответственно называются a — младшим штрихом и b — старшим (рис. 68).

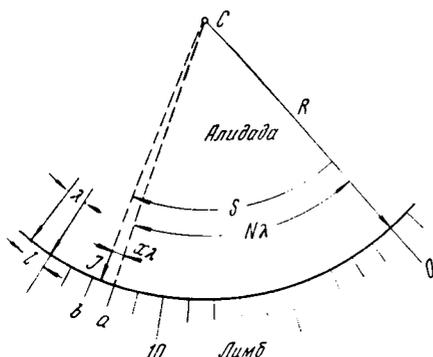


Рис. 68. Отсчет по горизонтальному лимбу

Полный отсчет складывается из величин интервала между нулевым и младшим штрихами лимба и интервала между младшим штрихом и индексом:

$$S = N\lambda + x\lambda, \quad (V,1)$$

где N — число делений между нулевым и младшим штрихами лимба;

λ — цена деления лимба;

x — интервал между младшим штрихом и индексом в долях деления лимба.

Для определения интервала $x\lambda$ между младшим штрихом a и индексом J служат отсчетные устройства. Отсчетные устройства различаются по способам измерения интервала $x\lambda$.

В современных угломерных инструментах применяются следующие виды отсчетных устройств:

верньеры, в которых используются свойства глаза с высокой точностью фиксировать совпадение одного штриха с продолжением другого;

микроскопы-оценщики, в которых используется способность глаза оценивать десятые доли интервала между штрихами;

шкаловые микроскопы, в которых для определения интервала λ используются специальные шкалы, размещенные в плоскости промежуточного изображения микроскопа;

оптические микрометры, в которых применяются оптические компенсаторы и используются свойства глаза точно вводить штрих в середину биссектора и точно совмещать один штрих с продолжением другого.

При применении трех последних отсчетных устройств легко осуществляется перенос изображения их шкал в поле зрения микроскопа, расположенного рядом с окуляром зрительной трубы, а иногда и в поле зрения трубы. Это значительно облегчает работу наблюдателя.

§ 47. ЛИМБЫ

Рабочим эталоном для измерения углов являются лимбы. Окружность лимба разделена на равные части.

По форме поверхности несущей шкалы лимбы подразделяются на конические, цилиндрические и плоские. Форма этой поверхности определяется видом и расположением отсчетных устройств.

Лимбы бывают металлические и стеклянные. В современных инструментах они обычно делаются из оптического стекла.

Металлические лимбы состоят обычно из двух частей: основания (диска из оловянистой бронзы) и соединенного с ним пайкой или завальцовкой кольца из нейзильбера или из сплава серебра (94%) и меди (6%), на котором нанесены деления. На металлические лимбы штрихи и цифровку наносят резцами из стали. Штрихи нарезают на делительной машине, а цифры наносят при помощи специального пантографа. В штрихи и цифры втирают краску.

Стеклянные лимбы представляют собой плоско-параллельную пластинку толщиной 3—5 мм, непараллельность плоскостей которой не превышает 5—10".

При нанесении делений на стеклянный лимб резцом прорезают тонкий слой воска, которым покрывают лимб. Затем обнаженные места штрихов и цифр травят парами плавиковой кислоты. После смывания воска штрихи и цифры затирают черной краской или лаком.

В последнее время освоен особый способ нанесения штрихов на стеклянные лимбы напылением хрома в вакууме. Штрихи в этом случае получаются более тонкими и четкими.

В СССР градуировка лимбов производится в градусной системе, за границей встречаются инструменты с лимбами, градуированными в градной * системе.

Штрихи наносятся на лимбы с ошибкой от $\pm 1,2$ до $\pm 10",0$. Толщина d штрихов зависит от увеличения Γ микроскопов и луп,

* Град составляет $1/400$ часть окружности. Он делится на 100 градных минут, а минута на 100 секунд. Град обозначается знаком g , минута — знаком c , секунда cc .

используемых в отсчетных устройствах. Если толщину штриха, выбранную для рассматривания невооруженным глазом, обозначить через d_0 , то

$$d = \frac{d_0}{\Gamma}. \quad (V,2)$$

Таблица 9

Отсчетное устройство	Расчетная формула	$\Gamma \times$	Толщина штриха, $\mu\text{м}$
Верньер	$\frac{0,15}{\Gamma}$	8	19
Микрометр с биссектором	$\frac{0,3}{\Gamma}$	25	12
Микрометр совмещения	$\frac{0,3}{\Gamma}$	36	8

Для отсчетных устройств с биссектором толщина штриха лимба должна быть втрое толще штриха биссектора. Толщина штрихов лимбов, в отсчетных устройствах которых используется принцип совмещения штрихов (см. § 46), делается несколько больше расчетной.

В табл. 9 приведена толщина штрихов современных инструментов.

ГОСТ 10529—63 предусматриваются диаметры стеклянных лимбов от 200 до 65 мм.

Установим связь между точностью отсчитывания, увеличением лупы или микроскопа, используемых в отсчетных устройствах, радиусом R лимба и разрешающей способностью глаза.

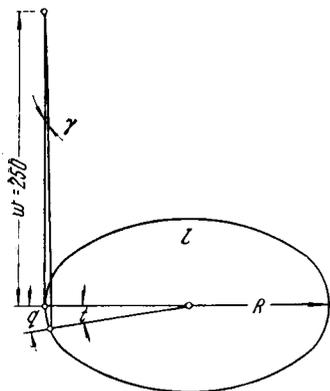


Рис. 69. Связь между радиусом и ценой деления лимба

Пусть на рис. 69 L — лимб радиусом R , t — точность отсчитывания в угловых единицах, q — линейная величина на окружности, соответствующая t , γ — разрешающая сила глаз — оптическая система отсчетного устройства и $w = 250$ мм — расстояние наилучшего видения, тогда

$$q = Rt = \gamma \cdot 250,$$

откуда

$$R = \frac{\gamma \cdot 250}{t}. \quad (V,3)$$

Но из формулы (II,21) следует, что $\gamma = \frac{\alpha}{\Gamma}$, где α — разрешающая способность глаза в данных условиях и Γ — увеличение оптической системы отсчетного устройства, поэтому

$$\Gamma = \frac{\alpha \cdot 250}{Rt}. \quad (V,4)$$

В 30 48. ВЕРНЬЕР

Из курса геодезии известно, что верньер представляет собой шкалу, соприкасающуюся со шкалой лимба. Дуга верньера содержит n делений, которые соответствуют $(n - 1)$ делениям лимба.

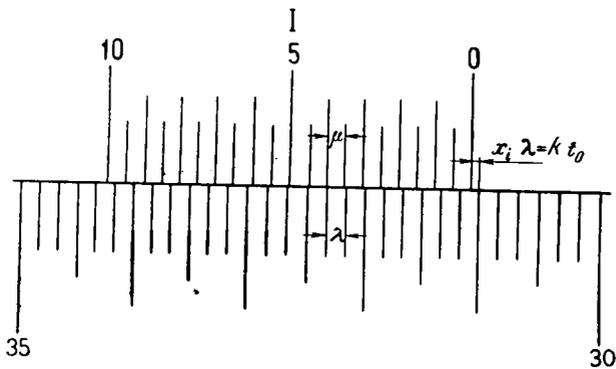


Рис. 70. Верньер теодолита ТТ-5:
Отсчет равен $31^{\circ}04'$

Если цену деления лимба обозначить λ , а цену деления верньера μ , то разность $\lambda - \mu$ называется точностью верньера.

$$t_0 = \lambda - \mu = \frac{\lambda}{n}. \quad (V,5)$$

В геодезических инструментах применяются верньеры 10, 30 и 60" точности.

Интервал $x\lambda$ между младшим штрихом лимба и нулем верньера определяется по формуле

$$x\lambda = kt_0, \quad (V,6)$$

где k — номер совпадающего штриха шкалы верньера.

На рис. 70 изображен верньер теодолита ТТ-5, точность которого

$$t_0 = \frac{10'}{20} = 30''.$$

Для того чтобы верньер обеспечивал номинальную точность отсчета, должны быть соблюдены следующие условия:

а) ширина штрихов лимба и верньера должна быть одинакова и соразмерна с интервалом между ближайшими штрихами (не более $1/10 - 1/8$ интервала);

б) зазор между лимбом и верньером не должен быть более половины ширины штриха;

в) между лимбом и алидадой не должно быть вертикального смещения;

г) увеличение Γ лупы должно определяться из соотношения (V,4)

$$\Gamma = \frac{\alpha \cdot 250}{Rt}, \quad (V,7)$$

где α — наименьший угол, под которым невооруженный глаз различает несовпадение штрихов, принимаемый равным $20-30''$;

$$t = \frac{1}{2} t_0.$$

Рассчитаем увеличение Γ лупы для верньера горизонтального круга теодолита ТТ-5 учитывая, что $R = 50$ мм, $t_0 = 30''$, $\alpha = 30''$;

$$\Gamma = \frac{2 \cdot 250 \cdot 30''}{50 \cdot 30''} = 10 \times.$$

В соответствии с этим увеличением по формуле (II,5) определим фокусное расстояние лупы

$$f' = \frac{250}{10} = 25 \text{ мм.}$$

В-32

§ 49. МИКРОСКОП-ОЦЕНЩИК

Микроскоп-оценщик — это отсчетное устройство, в котором интервал λ между младшим штрихом лимба и индексом оценивается на глаз до десятых долей деления лимба.

Микроскоп строит увеличенные действительные изображения шкал лимбов в плоскости индекса — штриха, выгравированного на плоско-параллельной пластинке. Видимая величина делений лимбов обычно составляет 2 мм.

В современных теодолитах в поле зрения микроскопа-оценщика строятся одновременно изображения шкал горизонтального и вертикального кругов так, что отсчитывание интервалов λ производится по одному индексу-штриху на обоих кругах. Отсчеты берутся по одной стороне кругов, при этом точность отсчитывания обычно составляет $\pm 1'$.

Рассмотрим оптическую схему микроскопа-оценщика отечественного теодолита ТОМ.

В теодолитах ТОМ (рис. 71) лучи света, отразившись от зеркала 1 и пройдя защитное стекло 2, освещают штрихи вертикального круга 3. При помощи призмы 4, объектив, состоящий из двух компонентов 5 и 6, строит изображение шкалы вертикального круга в плоскости шкалы горизонтального круга 7. Диаметры колец шкал лимбов одинаковы, а увеличение объектива 5—6 равно единице, поэтому размеры делений горизонтального и вертикального кругов равны.

При помощи призм 8 и 10 объектив 9 строит изображения шкал горизонтального и вертикального кругов в плоскости коллектива 11, на которой нанесен индекс-штрих. Полученные изображения после отражения в призме 12 рассматриваются через микроскоп, расположенный рядом с окуляром зрительной трубы. Микроскоп состоит из объектива 13 и окуляра 14.

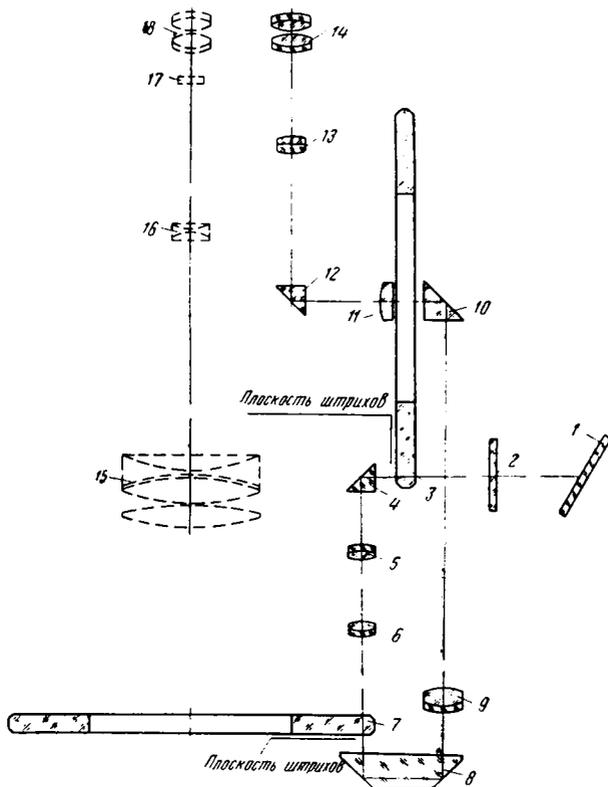


Рис. 71. Оптическая схема теодолита ТОМ

На рис. 72 показано поле зрения микроскопа-оценщика теодолита ТОМ.

Величина наименьшего деления лимба $l = R\lambda$ (см. рис. 68), где R — радиус кольца шкалы лимба и λ — цена деления лимба. Обозначим видимую величину деления лимба l' , тогда увеличение микроскопа

$$\Gamma = \Gamma_{об}\Gamma_{ок} = \frac{l'}{l} = \frac{l'}{R\lambda}. \quad (V,8)$$

Если увеличение объектива принять равным 3^x , то увеличение окуляра

$$\Gamma_{ок} = \frac{l'}{3R\lambda} \quad (V,9)$$

и фокусное расстояние окуляра

$$f_{\text{ок}} = \frac{250}{\Gamma_{\text{ок}}} = \frac{250 \cdot 3 \cdot R\lambda}{l'}. \quad (\text{V}, 10)$$

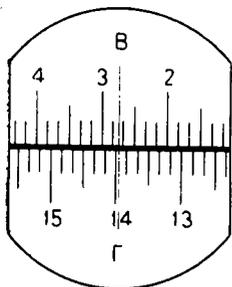


Рис. 72. Поле зрения микроскопа-оценщика теодолита ТОМ:

отсчет по горизонтальному кругу $13^{\circ}57'$, отсчет по вертикальному кругу $2^{\circ}44'$

Определим увеличение микроскопа-оценщика теодолита Theo-120, если $R = 30,5$ мм; $\lambda = 10'$; видимая величина деления лимба $1,7$ мм.

По формуле (V,8) вычисляем увеличение микроскопа

$$\Gamma = \frac{1,7 \cdot 3438'}{30,5 \cdot 10'} = 19 \times.$$

Юстировка микроскопа-оценщика включает в себя следующие этапы (см. рис. 71):

- установку компонентов объектива 5—6 так, чтобы изображение делений вертикального круга в плоскости горизонтального круга было резким;
- установку объектива 9 по высоте с таким расчетом, чтобы изображение штрихов кругов совместилось с плоскостью коллектива 11;
- такую установку коллектива 11, чтобы индекс-штрих был параллелен изображениям штрихов делений лимбов.

§ 50. ШКАЛОВЫЙ МИКРОСКОП

В шкаловом микроскопе интервал $x\lambda$ между младшим штрихом и индексом определяется при помощи специальной шкалы, расположенной в плоскости промежуточного изображения штрихов лимбов. Размер шкалы и увеличение микроскопа выбираются с таким расчетом, чтобы в поле зрения последнего длина отсчетной шкалы точно равнялась одному делению лимба и видимая величина деления отсчетной шкалы была равна $0,75—1,00$ мм.

В современных инструментах в поле зрения шкалового микроскопа, как правило, видны одновременно штрихи горизонтального и вертикального кругов. Высокая точность нанесения делений лимбов и изготовление осей в современных оптических теодолитах средней точности позволяют ограничиваться взятием отсчетов по одной стороне кругов.

На рис. 73 приведена оптическая схема шкалового микроскопа отечественного оптического теодолита Т20. Лучи света, отразившись от зеркала 1, проходят через пластинку 2, призмы 3 и 4 освещают штрихи горизонтального круга 5. Объектив 6 при помощи призмы 14 строит изображение штрихов горизонтального круга в плоскости пластинки 8, на которой нанесены отсчетные шкалы микроскопа. Другой пучок лучей, идущий от зеркала 1 через призму 10, освещает деления вертикального круга 11. Объектив 13 с помощью призм 12 и 7 строит изображения штрихов вертикального круга в плоскости

пластинки 8. Далее изображения штрихов лимбов и отсчетных шкал рассматриваются в отсчетный микроскоп 9.

Рассмотрим оптическую схему отечественного теодолита Т10 (рис. 74). Лучи света, отразившись от зеркала 1, через иллюминатор 2 направляются призмой с коллективом 3 на вертикальный лимб 4.

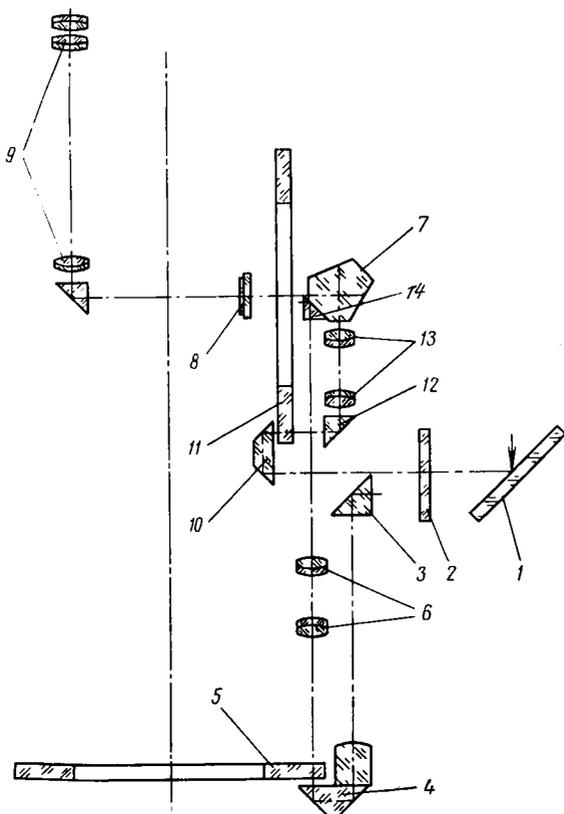


Рис. 73. Оптическая схема шкалового микроскопа теодолита Т20

Изображение штрихов вертикального круга с помощью призмы 5 проектируется объективом 6—7 через призму 8 в плоскость коллектива 9, на которой нанесены отсчетные шкалы. На этот же коллектив с помощью призмы 15 объективом 16—17 через призму 18 проектируется и изображение штрихов горизонтального круга 14, подсвечиваемого через призму 12 и конденсор 13. Изображения штрихов обоих лимбов и отсчетных шкал рассматриваются через микроскоп, состоящий из объектива 10 и окуляра 11.

На рис. 75 показаны поля зрения шкаловых микроскопов теодолитов Т20 и Т10.

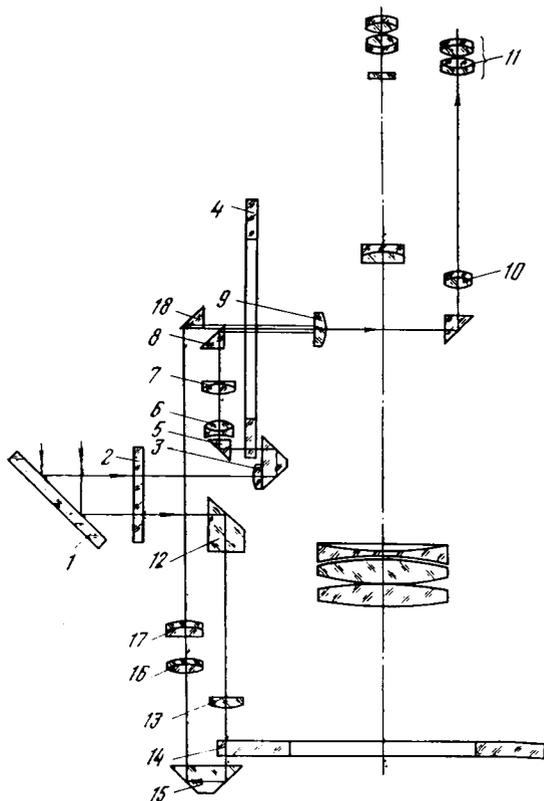


Рис. 74. Оптическая схема шкалового микроскопа теодолита Т10

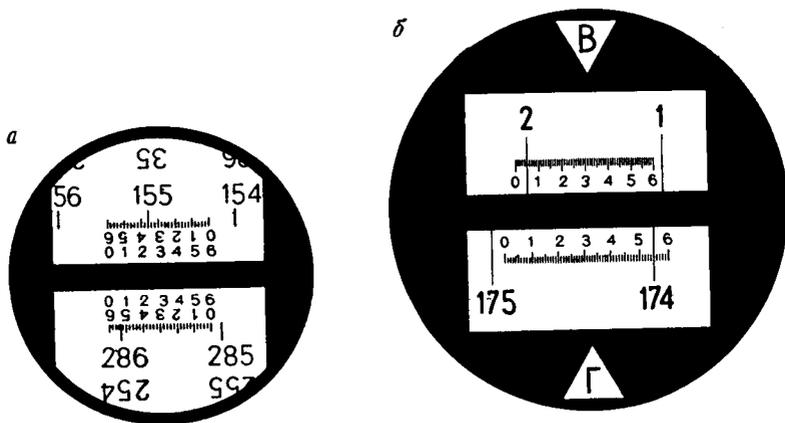


Рис. 75. Поля зрения шкаловых микроскопов теодолитов Т20 и Т10:

а — отчет по горизонтальному кругу $155^{\circ}24',0$; отчет по вертикальному кругу $286^{\circ}07',0$;
 б — отчет по горизонтальному кругу $174^{\circ}55',0$; отчет по вертикальному кругу $2^{\circ}05',1$.

Полный отсчет по шкаловому микроскопу определяется по формуле

$$S = N\lambda + kv + yv, \quad (V,11)$$

где $N\lambda$ — отсчет младшего штриха, являющегося индексом для отсчета по шкале микроскопа;

k — число целых делений шкалы;

v — цена деления шкалы, равная $\frac{\lambda}{n}$;

y — число десятых долей деления шкалы, оцениваемое на глаз.

В соответствии с формулой (V,13) отсчет по горизонтальному кругу (рис. 75, б) складывается

$$S = 174 \cdot 1^\circ + 55 \cdot 1' + 0,0 \cdot 1' = 174^\circ 55' 0.$$

Если обозначить видимую величину одного деления шкалы микроскопа через q , то вся длина шкалы будет равна $l' = qn$, где n — число делений шкалы.

Если увеличение микроскопа $\Gamma = \Gamma_{об}\Gamma_{ок}$, то, очевидно,

$$qn = R\lambda\Gamma = R\lambda\Gamma_{об}\Gamma_{ок}, \quad (V,12)$$

где R — радиус лимба, мм;

λ — цена деления лимба.

Из формулы (V,12) следует, что увеличение микроскопа

$$\Gamma = \frac{qn}{R\lambda}$$

и увеличение окуляра

$$\Gamma_{ок} = \frac{qn}{R\lambda\Gamma_{об}}. \quad (V,13)$$

Определим увеличение шкаловых микроскопов теодолитов Т20 и Т10. Если положить, что:

1) $R_1 = 32$ мм, $\lambda_1 = 1^\circ$, $n_1 = 30$, $q_1 = 1,35$ мм;

2) $R_2 = 45$ мм, $\lambda_2 = 1^\circ$, $n_2 = 60$, $q_2 = 0,92$ мм,

то по формуле (V,13) получим увеличение микроскопа:

$$\Gamma_1 = \frac{1,35 \cdot 30 \cdot 3438'}{32 \cdot 60'} \approx 72\times;$$

$$\Gamma_2 = \frac{0,92 \cdot 60 \cdot 3438'}{45 \cdot 60'} \approx 70\times,$$

где 3438 — число минут в радиане (ρ').

Юстировка шкалового микроскопа. В правильно установленном микроскопе плоскость изображения делений лимбов должна быть совмещена с плоскостью отсчетных шкал и при этом длины шкал должны быть точно равны изображениям соответствующих делений кругов. Кроме того, штрихи шкал должны быть параллельны изображениям штрихов лимбов. Для облегчения выполнения этих требований в современных оптических теодолитах объективы, участвующие в построении изображений в заданном масштабе, состоят

из двух компонентов. В соответствии с формулой (I,80) это позволяет изменять их эквивалентные фокусные расстояния за счет изменения промежутков d между компонентами.

В зависимости от оптической схемы отсчетного устройства порядок юстировки может меняться.

Рассмотрим основные этапы юстировки шкалового микроскопа теодолита Т20 (см. рис. 73):

а) компоненты объектива 6 устанавливаются так, чтобы величина изображения делений горизонтального круга точно равнялась длине отсчетной шкалы и чтобы изображение штрихов было резким;

б) компоненты объектива 13 устанавливаются таким образом, чтобы изображение деления вертикального круга точно равнялось общей длине отсчетной шкалы и чтобы изображение штрихов лимба было резким;

в) пластинка 8 со шкалами устанавливается так, чтобы штрихи шкал были параллельны изображениям штрихов шкал лимбов.

Юстировка производится на заводе или в специальной мастерской.

Исследование шкалового микроскопа заключается в проверке равенства длины qn шкалы микроскопа величине изображения l' одного деления лимба. Если окажется, что $qn \neq l'$, то цена деления будет отличаться от расчетной.

Допустим, что в одном делении l' лимба укладывается $n - r$ делений шкалы микроскопа, где r — малая величина. Тогда цена деления шкалы будет

$$v = \frac{\lambda}{n-r} = \frac{\lambda}{n \left(1 - \frac{r}{n}\right)}.$$

Раскладывая правую часть в степенной ряд и ограничиваясь членами первой степени (по малости $\frac{r}{n}$), получим

$$v = \frac{\lambda}{n} \left(1 + \frac{r}{n}\right) = \frac{\lambda}{n} + \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{r}{n}, \quad (\text{V},14)$$

где $\frac{\lambda}{n} = v_0$ — расчетная цена деления шкалы.

Учитывая это, перепишем уравнение (V,14)

$$v = v_0 + v_0 \frac{r}{n}. \quad (\text{V},15)$$

Возьмем отсчет N , соответствующий k делениям шкалы, относительно младшего штриха лимба. Он будет равен

$$N = kv = kv_0 + kv_0 \frac{r}{n} = N_0 + N_0 \frac{r}{n}, \quad (\text{V},16)$$

где N_0 — отсчет, соответствующий расчетной цене деления шкалы v_0 .

Следовательно, чтобы получить истинный отсчет N , нужно к отсчету N_0 прибавить поправку, равную $N_0 \frac{r}{n}$.

Отсчеты		Величина рена $r = n - (n - r)$	Примечание
по лимбу, град	по шкале микроскопа $n - r$		
0	59,8	+0,2	$\lambda = 60'$ $n = 60$ $v_0 = 1'$
30	59,9	+0,1	
60	60,0	0,0	
90	59,8	+0,2	
120	59,7	+0,3	
150	59,9	+0,1	
180	60,0	0,0	
210	60,0	0,0	
240	59,9	+0,1	
270	59,9	+0,1	
300	59,8	+0,2	
330	59,8	+0,2	

$$\sum r = +1,5;$$

$$r_{\text{ср}} = \frac{\sum r}{12} = +\frac{1,5}{12} = +0,125$$

или в секундах

$$r_{\text{ср}} = +7'',5; \quad \frac{r_{\text{ср}}}{n} = +\frac{7'',5}{60} = +0'',125.$$

Приведем поправки к отсчетам, взятым по шкаловому микроскопу

Rv_0	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'
$Rv_0 \frac{r_{\text{ср}}}{n}$	+0'',125	+0'',25	+0'',38	+0'',50	+0'',62	+0'',75	+0'',88

Rv_0	8'	9'	10'	20'	30'	40'	50'	60'
$Rv_0 \frac{r_{\text{ср}}}{n}$	+1'',00	+1'',12	+1'',25	+2'',5	+3'',75	+5'',0	+6'',25	+7'',5

Пример. Отсчет по шкаловому микроскопу $N_0 = 55' 12''$;

$$\text{Поправка} \quad N_0 \frac{r_{\text{ср}}}{n} = +6'',9$$

$$\text{Исправленный отсчет } N = 55' 19''.$$

Исследование шкалового микроскопа производится на различных частях лимба. Если величина r , которая называется **реном микроскопа**, превышает по абсолютной величине расчетную точность отсчитывания, то в этом случае составляют таблицу поправок, которые вводятся в отсчеты по шкалам.

Рен определяется как разность между расчетным числом делений n шкалы и действительным числом делений $n - r$, укладываемым в видимом интервале между штрихами лимба,

$$r = n - (n - r).$$

В табл. 10 дан пример определения рена шкалового микроскопа.

Во время исследования на разных частях лимба нуль шкалы микроскопа совмещают с изображением штриха лимба и относительно изображения штриха лимба, расположенного справа от первого, берут отсчет по правому концу шкалы микроскопа.

В-110

§ 51. ОДНОСТОРОННИЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОМЕТР

В оптических микрометрах для измерения интервала между младшим штрихом лимба и индексом используются оп т и ч е с к и е компенсаторы — подвижные детали оптической системы отсчетного устройства, связанные со шкалой, по которой определяются их смещения.

Во время измерения при помощи компенсатора изображение штрихов лимба смещается относительно нуля-пункта микроскопа (на величину интервала $x\lambda$) и величина этого смещения определяется по шкале.

В качестве компенсаторов в оптических микрометрах могут быть использованы вращающиеся или качающиеся плоско-параллельные пластинки, подвижные клинья или линзы.

Выбирая механическую связь отсчетной шкалы с компенсатором (непосредственно или через передаточный механизм), можно небольшое перемещение изображения штрихов лимба фиксировать по шкале большей длины.

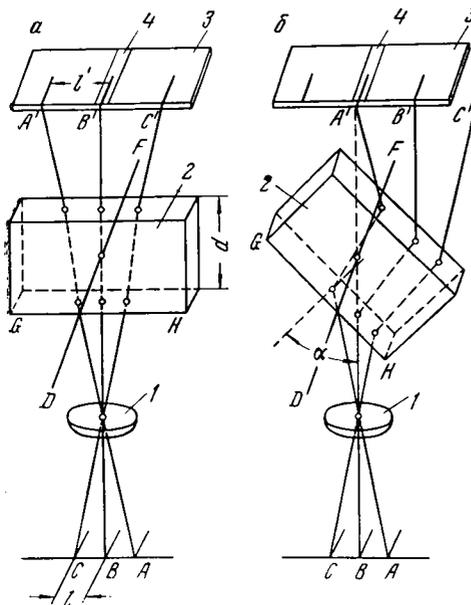


Рис. 76. Схема оптического микрометра с плоско-параллельной пластинкой

Односторонний оптический микрометр с плоско-параллельной пластинкой. На пути лучей, идущих от объектива 1, поместим пло-

ско-параллельную пластинку 2 (рис. 76). Объектив строит изображение A' , B' и C' штрихов лимба A , B и C на неподвижной стеклянной пластинке 3 с биссектором 4. Плоско-параллельная пластинка может вращаться вокруг оси DF .

На рис. 76, *a* показан момент, когда грань GH перпендикулярна оптической оси объектива 1 и когда изображение B' штриха B лимба находится в середине биссектора 4, а на рис. 76, *б* — момент после

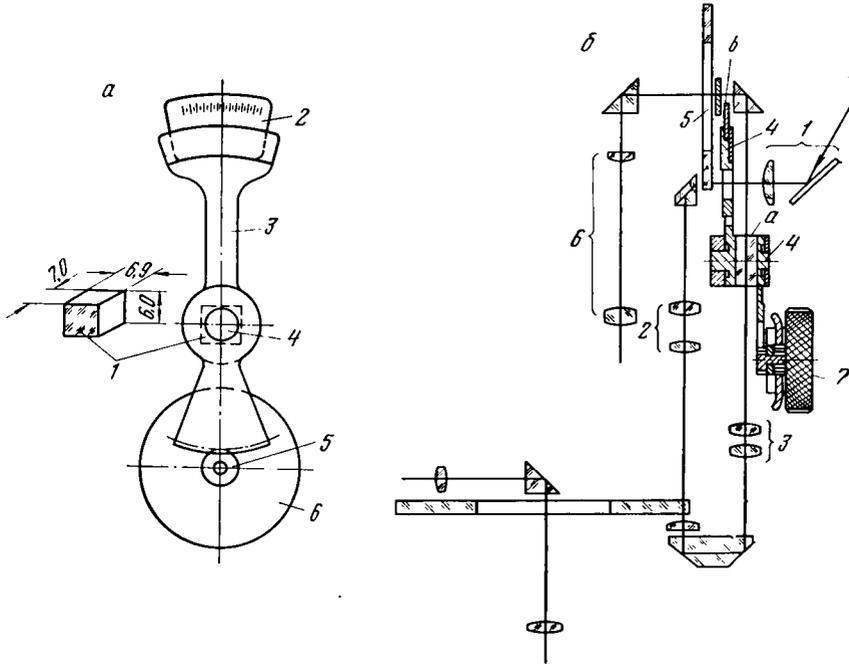


Рис. 77. Кинематическая и оптическая схемы одностороннего микрометра

поворота плоско-параллельной пластинки на угол α . В этом положении луч, идущий вдоль оптической оси объектива 1, составит с нормалью к грани GH угол α и в соответствии с формулой (1,12) будет смещен параллельно своему первоначальному положению на величину

$$h = d \frac{n-1}{n} \alpha.$$

Если положить, что $h = l'$, и задаться толщиной d плоско-параллельной пластинки и ее показателем преломления n , то можно определить угол поворота α , при котором происходит смещение изображения штрихов лимба на видимую величину одного деления l' .

Величина смещения h будет прямо пропорциональна углу поворота α пластинки. Однако эта пропорциональность сохраняется только до определенных пределов изменения.

Поэтому чаще всего задаются допустимым углом поворота α и толщиной пластинки или показателем преломления n стекла.

На рис. 77, *a* показана возможная схема связи плоско-параллельной пластинки 1 со шкалой 2 в одностороннем оптическом микрометре. Ось вращения пластинки совмещена с осью вращения 4 рычага 3, нижний конец которого сделан в виде сектора-шестерни, входящей в зацепление с ведущей шестерней 5 барабана 6 микрометра.

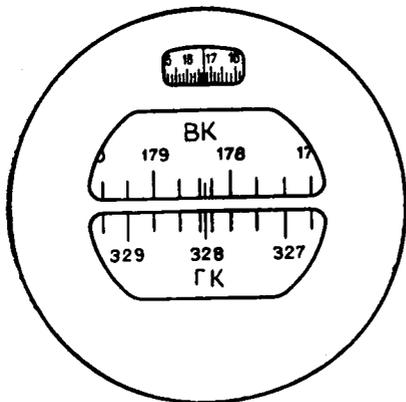


Рис. 78. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита ТТ-4:

отсчет по горизонтальному кругу $328^{\circ}16'45''$; отсчет по вертикальному кругу $178^{\circ}36'45''$

Рассмотрим теперь полную схему одностороннего оптического микрометра (рис. 77, *б*). Здесь: 1 — осветительное устройство; 2 — объектив, строящий изображение штрихов вертикального круга в плоскости штрихов горизонтального круга; 3 — объектив, строящий изображение кругов на плоско-параллельной пластинке 5 с биссектором и штрихом; 4 — микрометр с плоско-параллельной пластинкой *a* и шкалой *b*; 6 — отсчетный микроскоп.

В отсчетный микроскоп через окна диафрагм пластинки 5 видны изображения горизонтального и

вертикального кругов, биссектор, штрих и шкала микрометра.

Отсчет делается в следующем порядке. Вращением барабана микрометра 7 вводят младший штрих горизонтального или вертикального круга в биссектор. Это приводит к повороту рычага 3 (рис. 77, *a*) со шкалой, отсчет по которой определяет интервал $x\lambda$.

На рис. 78 показано поле зрения отсчетного микроскопа отечественного теодолита ТТ-4.

Отсчет по горизонтальному кругу равен $328^{\circ}16'45''$ и по вертикальному $178^{\circ}36'45''$.

При расчетах и юстировке одностороннего микрометра нужно выбрать увеличение и установить объектив 2 (см. рис. 77, *б*) так, чтобы величина изображения делений вертикального круга точно равнялась величине делений горизонтального круга. Только в этом случае можно использовать один оптический микрометр для отсчитывания по обоим кругам. Кроме того, увеличение объектива 3 должно быть таким, чтобы смещение изображений штрихов лимба на величину одного деления точно соответствовало перемещению шкалы микрометра от ее нулевого штриха до конечного.

В противном случае рен микроскопа не будет равен нулю.

Общее увеличение отсчетного микроскопа одностороннего микрометра вычисляется по формуле (V,4)

$$\Gamma = \frac{\alpha \cdot 250}{R \cdot 3t}, \quad (V,17)$$

где $3t$ — предельная ошибка отсчитывания, сек.

Если положить $\alpha = 10''$, $R = 40 \text{ мм}$, $t = 2''$, то увеличение составит

$$\Gamma = \frac{10 \cdot 250}{40 \cdot 3 \cdot 2''} \approx 10,4 \times.$$

6 В-39

§ 52. ДВУСТОРОННИЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОМЕТРЫ

Принцип совмещенного отсчитывания. При точных измерениях углов для исключения влияния эксцентриситета алидады (лимба) приходилось производить отсчитывание направлений по двум отсчетным устройствам, расположенным на противоположных частях лимба, что вынуждало наблюдателя перемещаться вокруг инструмента. Принцип совмещенного отсчитывания позволяет получить

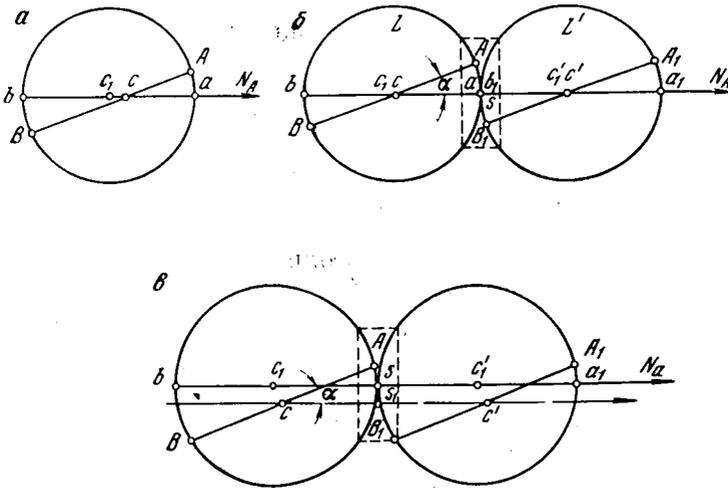


Рис. 79. К принципу совмещенного отсчета

отсчет, свободный от эксцентриситета, по одному отсчетному микроSCOпу.

При определении направления N_A по двум отсчетным устройствам (рис. 79, а) определяют интервалы для первого Aa и второго Bb отсчетных устройств. Тогда

$$N_A = A + \frac{Aa + Bb}{2}, \quad (V,18)$$

где $A = B \pm 180^\circ$.

При совмещенном отсчитывании с помощью оптической системы рядом со штрихами лимба или их изображениями строят прямое (незеркальное) изображение штрихов противоположной части лимба.

Пусть L — лимб, L' — его прямое изображение в масштабе 1 : 1, расположенное относительно лимба так, что точки a и b_1 совпадают в точке s (рис. 79, б), а изображение диаметра a_1b_1 является продолжением диаметров ab . Возьмем диаметр AB , ближайший к точке s , соответствующий отсчету целых интервалов лимба (градусов или частей градусов). Определим отсчет в точке s . Допустим, что отсчету s на лимбе соответствует направление N_A , проходящее через центр лимба c и точку s . Тогда

$$N_A = A + \frac{As + Bb}{2},$$

а так как $Bb = B_1s$, то

$$N_A = A + \frac{AB_1}{2}. \quad (V,19)$$

В формулу (V,19) входят только значения A и B , поэтому при определении направления N_A не нужно знать положение индекса.

Отрезок AB_1 измеряют при помощи компенсаторов. Для этого ограниченная пунктиром часть изображения переносится в плоскость измерительной шкалы оптического микрометра.

Повернем диаметр лимба AB относительно алидады (центр лимба c и центр алидады c_1 совпадают) по ходу часовой стрелки на угол α , тогда точки A и B_1 совместятся с точкой s и окажутся на линии N_A . Следовательно, при совмещенном отсчете повороту лимба на угол α соответствует удвоенное линейное смещение, т. е. при совмещении штрихов, расположенных на расстоянии l' (соответствующем цене деления λ), лимб поворачивают (или алидаду в противоположном направлении) на величину $\frac{\lambda}{2}$. Поэтому при совмещенном отсчитывании цену деления можно принимать равной половине значения фактической.

Покажем, что при совмещенном отсчете автоматически исключается влияние эксцентриситета алидады (или кольца делений лимба) на измеряемое направление.

Допустим, что оси вращения лимба c и алидады c_1 не совпадают, тогда при повороте диаметра лимба AB (рис. 79, в) на угол α по ходу часовой стрелки точка встречи штрихов A и B_1 окажется не в точке s , лежащей на направлении N_A , а в точке s_1 . Но так как точка s_1 будет лежать на линии cs' , параллельной N_A , то отсчет в точке s_1 будет соответствовать тому же направлению N_A . Следовательно, при совмещенном отсчитывании эксцентриситет не оказывает влияния на измеряемое направление N_A , а следовательно, и на величину измеряемого угла. Отрезок ss_1 характеризует параллельное смещение визирной оси $c_1c'_1$ относительно диаметра лимба cs_1 , определяющего отсчет, свободный от влияния эксцентриситета.

При определении увеличения отсчетных устройств, работающих по принципу совмещения, необходимо учитывать, что повороту алидады на угол α соответствует двойное линейное смещение, т. е. увеличение микроскопа может быть вдвое меньше:

$$\Gamma = \frac{\alpha \cdot 250}{2R \cdot 3t}. \quad (V,20)$$

Рассчитаем увеличение микроскопов для горизонтальных кругов теодолитов ОТ-02М и Т2:

1) для ОТ-02М: $R = 67,5$ мм, $\alpha = 10''$, $3t = 0'',5$. Поэтому

$$\Gamma = \frac{10'' \cdot 250}{2 \cdot 67,5 \cdot 0'',5} \approx 37\times;$$

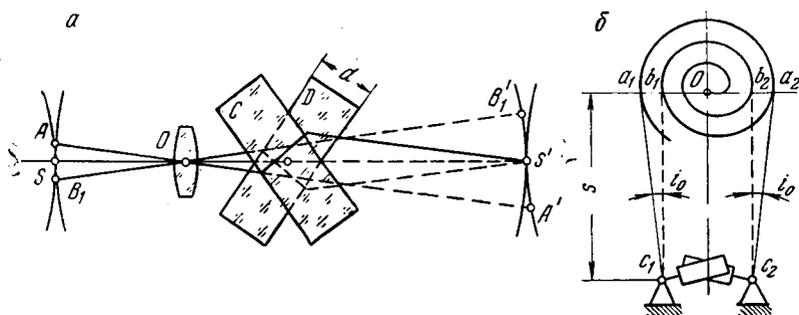


Рис. 80. Оптический микrometer с двумя плоско-параллельными пластинками

2) для Т2: $R = 45$ мм, $\alpha = 10''$, $3t = 0'',6$. Поэтому

$$\Gamma = \frac{10'' \cdot 250}{2 \cdot 45 \cdot 0'',6} \approx 46\times.$$

Для измерения отрезка AB_1 при совмещенном отсчитывании применяют двойные оптические микromетры: с двумя наклоняющимися плоско-параллельными пластинками; с поступательно перемещающимися оптическими клиньями.

Оптический микrometer с двумя наклоняющимися плоско-параллельными пластинками. Пусть AB_1 (рис. 80, а) — совмещенные изображения штрихов противоположных частей лимба, O — объектив, строящий изображение $A'B'_1$ частей лимба AB_1 в плоскости полевой диафрагмы отсчетного устройства, C и D — две плоско-параллельные пластинки, вращающиеся в плоскости чертежа в противоположные стороны. При повороте пластинки C на некоторый угол луч, идущий от точки A , будет смещен на величину $A's'$ и попадет в точку s' , а при повороте пластинки D в противоположную сторону на угол α луч, идущий от точки B_1 , также сместится и попадет в точку s' . Если $AB_1 = \delta$ — интервал между ближайшими, противо-

положными штрихами лимба, а $A'B'_1 = \Delta$ — расстояние между изображениями этих же штрихов, то

$$\Delta = \delta \Gamma_{об}. \quad (V,21)$$

Учитывая формулу (I,12), запишем

$$\Delta = 2d \frac{n-1}{n} \alpha, \quad (V,22)$$

где $\Gamma_{об}$ — увеличение объектива;
 d — толщина плоско-параллельных пластинок;
 n — показатель преломления стекла.

С плоско-параллельными пластинками посредством передаточного механизма соединяется круговая шкала, по которой отсчитывается величина смещения изображений штрихов лимба. Смещение изображений штрихов лимба происходит в результате поворота пластинок при их совмещении.

Поворот пластинок на наибольший угол α_0 , соответствующий полному повороту круговой шкалы, должен вызывать смещение изображений штрихов на один интервал l' между ними.

В существующих конструкциях микрометров поворот пластинок осуществляется с помощью механизма при увеличении угловой скорости поворота шкалы почти в 60 раз по отношению к угловой скорости поворота плоско-параллельных пластинок.

Схема механизма представлена на рис. 80, б. Два рычага a_1c_1 и a_2c_2 , вращающиеся вокруг осей c_1 и c_2 , несут плоско-параллельные пластинки. Концы рычагов a_1 и a_2 входят в паз, который проточен на диске и имеет форму спирали архимеда. Диск может вращаться вокруг оси O при помощи маховичка, укрепленного на этой же оси. Ось O является осью вращения стеклянного кольца со шкалой микрометра. При вращении диска вокруг этой оси концы рычагов смещаются пазом. После поворота диска на один оборот концы рычагов переместятся в точки b_1 и b_2 . Так как $a_1b_1 = a_2b_2 = a$, где a — шаг спирали, то

$$i_0 = \frac{a}{s} \rho'.$$

Если $a = 3$ мм, $s = 30$ мм, то угол $i_0 = 344'$. Отсчетное стеклянное кольцо оптического микрометра теодолита ОТ-2М разделено на 600 делений. При фактической цене деления горизонтального лимба $10'$ ввиду удвоения линейного смещения при совмещенном отсчитывании принимаем цену деления равной $5'$. Поэтому цена деления отсчетной шкалы составит $5' : 600 = 0''{,}5$.

Оптический микрометр с поступательно перемещаемыми оптическими клиньями. Между лимбом AB_1 и плоскостью изображения $A'B'_1$ поместим оптический клин I . Если перемещать его вдоль оптической оси объектива O , то изображение штрихов в плоскости диафрагмы отсчетного устройства будет смещаться (рис. 81, а).

Перемещению клина на расстояние e будет соответствовать перемещение изображения на отрезок Δ в соответствии с формулой (I,18):

$$\Delta = \frac{e}{\rho} \sigma (n - 1), \quad (V,23)$$

где e — величина перемещения клина вдоль оптической оси объектива;
 σ — преломляющий угол клина в минутах дуги;
 n — показатель преломления стекла клина.

Задаваясь величиной $\Delta = l'$, можно подобрать нужное сочетание величин e , σ и n . Обычно для уменьшения отрезка e и угла σ в

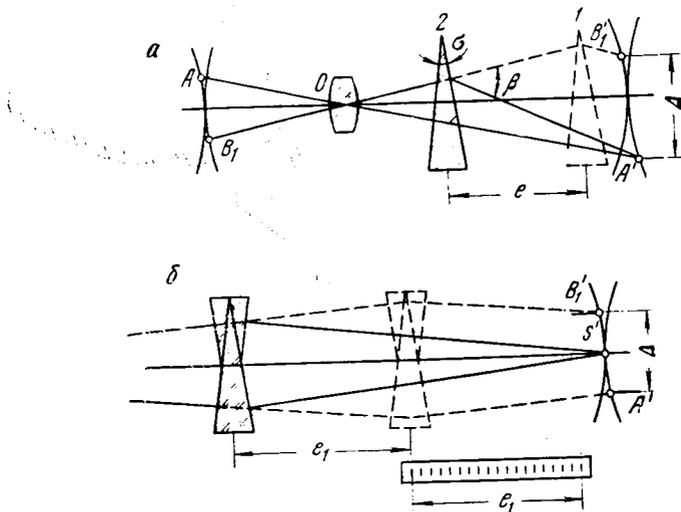


Рис. 81. Оптический микрометр с двумя оптическими клиньями

оптических микрометрах пользуются не одним, а двумя оптическими клиньями, один из которых смещает изображение штрихов одной стороны лимба, а другой — противоположной.

Для этого в одной оправе устанавливают два клина, направленные преломляющими ребрами в противоположные стороны (рис. 81, б). При движении клиньев вдоль оптической оси получается смещение изображений штрихов A' и B'_1 на расстояние Δ при меньших e и σ .

Величина перемещения клиньев определяется по прямолинейной шкале, нанесенной на стеклянную пластинку, укрепленную на оправе клиньев.

Рассчитаем величину шкалы e для оптического микрометра теодолита Т2, если известны: радиус горизонтального круга 45 мм, цена деления лимба $20'$, цена наименьшего деления шкалы микрометра $1''$, общее увеличение отчетной системы $\Gamma = 46\times$ и увеличение объектива микроскопа $\Gamma_{об} = 3,13\times$.

Найдем сначала $\Delta = l'$ — величину изображения деления лимба:

$$l' = l\Gamma_{об}, \quad (V, 24)$$

где l — линейный интервал между ближайшими штрихами лимба.

$$\text{Но } l = R\lambda = 45 \frac{20'}{3438'} = 0,262 \text{ мм, а } \Gamma_{об} = 3,13\times,$$

поэтому

$$\Delta = 0,262 \cdot 3,13 = 0,820 \text{ мм.}$$

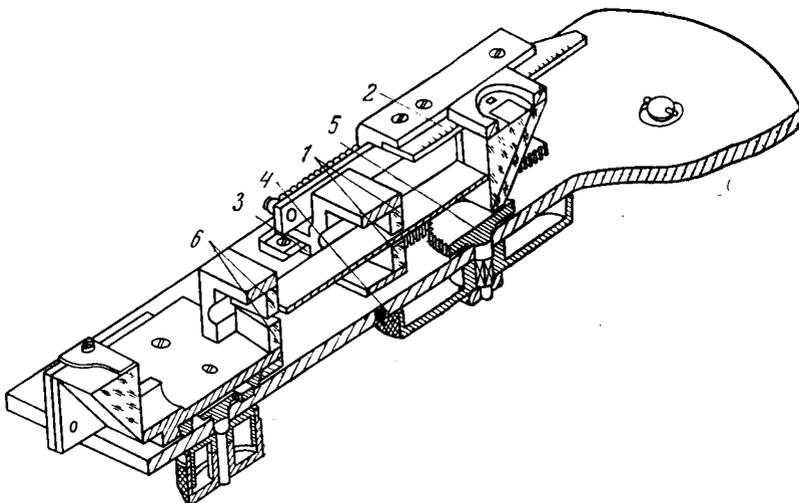


Рис. 82. Клиновой оптический микрометр

Для оценки на глаз десятых долей отсчетной шкалы видимую величину одного деления этой шкалы выбрали равной $1,0 \text{ мм}$. Шкала должна быть отградуирована на $10'$, так как истинная цена деления составляет $20'$, а совмещенное отсчитывание приводит к удвоению линейных смещений. При цене деления $1''$ шкала от 0 до $10'$ должна содержать 600 делений. Если $\Gamma_{ок} = 14,7\times$, то длина шкалы $e = \frac{600 \cdot 1}{14,7} \text{ мм} \approx 41 \text{ мм}$.

На рис. 82 показана конструкция оптического микрометра с клиньями. Клинья 1 в оправе, с которой соединена шкала 2 , могут перемещаться вдоль направляющих 3 . Их перемещение осуществляется маховичком (барabanом) 4 посредством шестерни 5 , передающей движение на рейку, соединенную с оправой клиньев. Для устранения свободного хода служит спиральная пружина, действующая на рейку.

Для того чтобы пучки лучей направлять в середину поля зрения, а также для лучшей ахроматизации в микрометре установлены неподвижные клинья 6 примерно с такими же преломляющими углами,

что и у подвижных клиньев. Клинья *б* направлены преломляющими ребрами в противоположные стороны относительно подвижных клиньев.

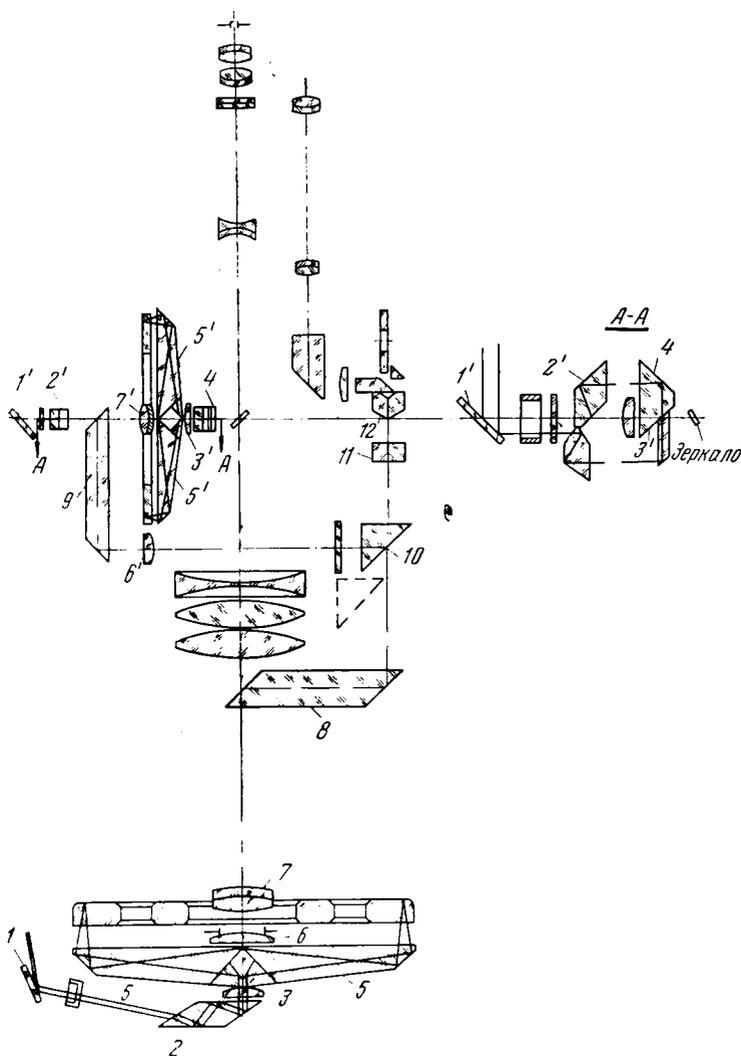


Рис. 83. Оптическая схема теодолита ОТ-02М

Для совмещенного отсчитывания необходимо в оптические схемы отсчетных устройств включать системы совмещения изображений двух сторон лимбов и разделительных блоков.

В системы совмещения теодолита ОТ-02М (рис. 83) входят алидадные призмы горизонтального круга *5* и алидадные призмы

вертикального круга $5'$. Лучи света, отразившись от зеркал 1 и $1'$ и пройдя призмы 2 , $2'$ и 4 , освещают штрихи на стеклянных кругах, нанесенные на слое серебра. Отражаясь от поверхности кругов и поглощаясь штрихами, лучи, претерпев двойное отражение в призмах 5 и $5'$, попадают в двухкомпонентные объективы 6 , 7 и $6'$, $7'$, которые

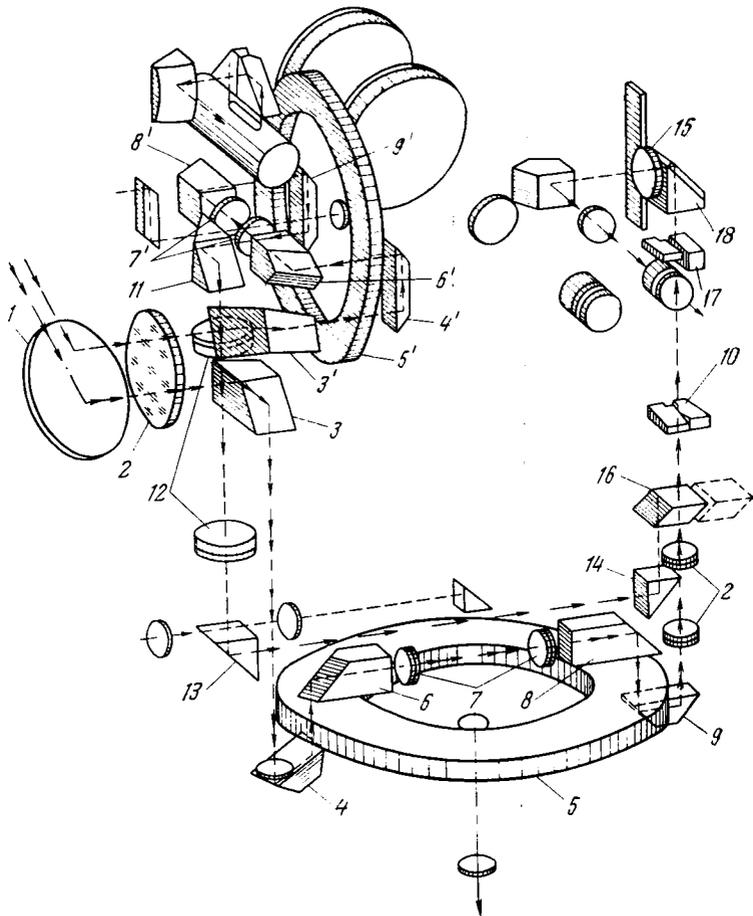


Рис. 84. Оптическая схема теодолита Т2

с помощью призм 8 и $9'$ строят изображения горизонтального и вертикального кругов в выходных плоскостях разделительного блока 12 . Включение или выключение изображений вертикальный круга осуществляется перемещением призмы 10 .

Система совмещения теодолита Т2 показана на рис. 84. Лучи света, отразившись от зеркала 1 , пройдя матовое стекло 2 и призмы 3 , 4 и $3'$, $4'$, освещают штрихи лимбов 5 и $5'$ и, отразившись в крышеобразных призмах 6 и $6'$, попадают в двухкомпонентные объективы

7 и 7', которые при помощи призм 8 и 8' строят прямые изображения в плоскости штрихов противоположных частей лимбов. Далее, пройдя призмы 9, 9' и 11, лучи попадают в объективы 12 и 12', которые при помощи призм 13 и 14 строят совмещенные изображения кругов в плоскости диафрагмы 15 отсчетного микроскопа. Переключение кругов осуществляется перемещением призмы 16.

Построенные системой совмещения изображения обеих частей лимба имеют вид двух шкал с неоформленными краями. В микроскопах-оценщиках, шкаловых микроскопах и одинарных оптических

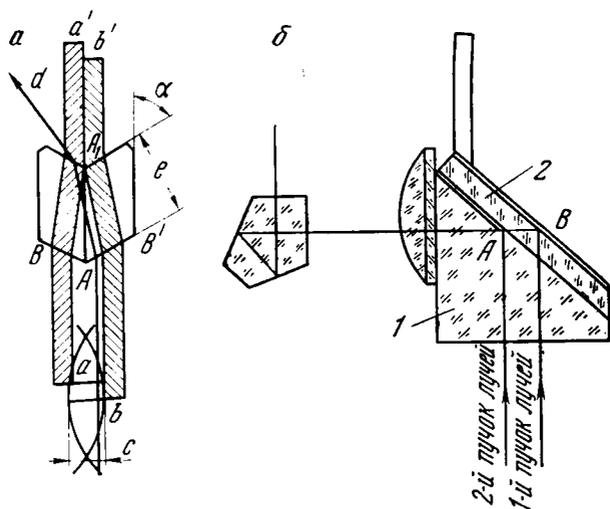


Рис. 85. Разделительные системы

микрметрах для получения оформленных изображений применяются диафрагмы, устанавливаемые в плоскости их изображений (см. рис. 72, 75 и 78).

При отсчитывании по принципу совмещения штрихов нужна тонкая разделительная грань. Такую грань можно получить при помощи разделительных блоков. Рассмотрим наиболее распространенные схемы разделительных блоков.

1) Разделительная система состоит из двух призм, склеенных по грани AA_1 . Пучки лучей, падающие на грани AB и AB' , преломляются, а лучи, находящиеся в зоне ab , отклоняются и после прохождения блока не попадают в поле зрения микроскопа (луч cd , рис. 85, а). Разделительной гранью является проекция плоскости соприкосновения призм.

2) Разделительная система состоит (рис. 85, б) из призмы 1 и приклеенного к ее гипотенузной грани оптического клина 2 с преломляющим углом $\sigma \leq 50'$. Двойными линиями показаны посеребренные грани призмы и клина.

Первый пучок лучей, отражающийся от посеребренной грани клина, несет изображение штрихов одной части круга; второй пучок лучей, отражающийся от посеребренной грани призмы, несет изображение другой части круга, противоположной первой.

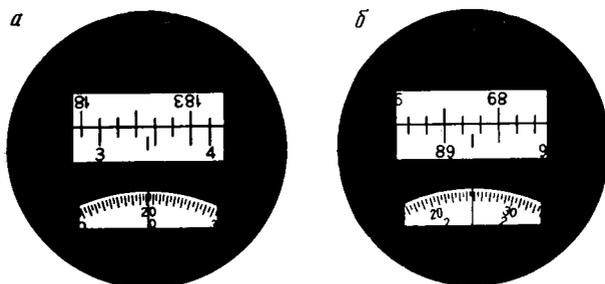


Рис. 86. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита ОТ-02М:

a — отсчет по горизонтальному кругу $3^{\circ}25'19'',4$; *b* — отсчет по вертикальному кругу $89^{\circ}17'24'',7$.

Разделяющая грань в виде тонкой черты, видимая в поле зрения микроскопа, есть изображение края *A* серебрения призмы. Пучок лучей *AB*, попадающий на посеребренную грань клина, отсекается посеребренной частью призмы и не попадает в поле зрения микроскопа.

Лучи, несущие совмещенные изображения противоположных частей лимба, проходят через компенсаторы: в теодолите ОТ-02М — через плоскопараллельные пластинки *11* (см. рис. 83), а в теодолите Т2 — через оптические клинья *10* и *17* (см. рис. 84). Далее эти лучи проходят разделительные блоки: в теодолите ОТ-02М — склеенные призмы *12*, а в теодолите Т2 — склеенные призму и клин *18* и дают изображения в плоскостях полевых диафрагм отсчетных микроскопов.

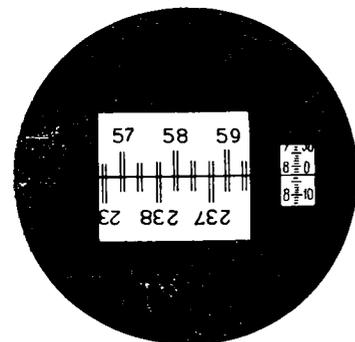


Рис. 87. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т2:

отсчет равен $57^{\circ}58'02'',4$

На рис. 86 и 87 приведены изображения полей зрения отсчетных микроскопов теодолитов ОТ-02М и Т2.

Отсчет по горизонтальному кругу ОТ-02М (рис. 86, *a*) равен $3^{\circ}25'19'',4$, а по вертикальному $89^{\circ}17'24'',7$. Нужно отметить, что, в отличие от горизонтального круга, фактическая цена деления вертикального круга теодолита ОТ-02М равна $20'$. При горизонтальном положении трубы отсчет по вертикальному кругу равен 90° . Диаметрально противоположные штрихи круга, соответствующие одному и тому же зенитному расстоянию, подписаны от 55 до 125

одинаковыми числами через каждые два градуса (через 6 делений круга). Поэтому зенитным расстояниям 88° , 86° , 84° и т. д. на круге соответствуют подписи 89, 88, 87 и т. д., а зенитным расстояниям 92° , 94° , 96° и т. д. соответствуют подписи 91, 92, 93 и т. д. Такая система подписей делений вертикального круга дает возможность использовать тот же отсчетный микрометр, что и для горизонтального круга. Формулы для вычисления места зенита MZ , зенитных расстояний Z и вертикальных углов ν в связи с этим принимают вид:

$$MZ = KL + KP - 180^\circ;$$

$$Z = KP - KL + 90^\circ;$$

$$\nu = KL - KP,$$

где KL и KP — отсчеты по вертикальному кругу при круге «лево» и круге «право».

Общее увеличение отсчетных систем для горизонтального круга $37\times$, а для вертикального — $28\times$.

2. Исследование оптического микрометра. Реном оптического микрометра называется разность номинальной величины полуделения лимба и величины полуделения, определенной с помощью микрометра. Так как пучки лучей, идущих от диаметрально противоположных частей лимба, приходят к микрометру различными путями, то могут отличаться и величины рена для верхнего и нижнего изображений лимба в поле зрения микрометра. Чтобы определить рен оптического микрометра, устанавливают шкалу последнего на отсчет, близкий нулю. Затем приблизительно совмещают с помощью наводящего винта алидады диаметрально противоположные штрихи A и $(A + 180^\circ)$ верхнего и нижнего изображений круга. После этого по барабану оптического микрометра берут по два раза отсчеты при трех точных совмещениях штрихов:

a — при совмещении штрихов A и $(A + 180^\circ)$;

b — при совмещении штрихов $(A - \lambda)$ и $(A + 180^\circ)$;

c — при совмещении штрихов A и $(A + 180^\circ - \lambda)$;

где λ — цена деления лимба.

Тогда рены верхнего и нижнего изображений, выраженные в секундах, будут соответственно равны:

$$r_{\text{в}} = (a - b) \nu + \frac{\lambda}{2};$$

$$r_{\text{н}} = (a - c) \nu + \frac{\lambda}{2}.$$

Прямой ход						Обратный ход					
Установка алидады	a	$b-10'$	$c-10'$	$r_1 = a-b+10'$	$r_2 = a-c+10'$	Установка алидады	a	$b-10'$	$c-10'$	$r_1 = a-b+10'$	$r_2 = a-c+10'$
0° 00'	+0,2	-0,2	-1,9	+0,4	+2,1	22° 20'	-2,0	-2,2	-3,0	+0,2	+1,0
	+0,8	-0,2	-1,3	+1,0	+2,1		-2,0	-2,0	-2,5	0,0	+0,5
45° 20'	0,0	0,0	-1,0	0,0	+1,0	67° 40'	+1,6	+1,9	+0,4	-0,3	+1,2
	-0,7	-0,2	-1,0	-0,5	+0,3		+1,6	+1,3	+0,6	+0,3	+1,0
90° 40'	+0,9	-0,8	-0,2	-0,25	+0,65	113° 00'	0,0	+0,3	+0,4	0,00	+1,10
	+0,8	-0,9	-0,2	+1,7	+1,0		0,0	+0,3	+0,2	-0,3	-0,4
135° 00'	+1,8	+2,2	+2,6	+1,70	+1,05	157° 20'	-1,0	+0,8	+0,9	-0,30	-0,30
	+1,4	+2,4	+2,0	-0,4	-0,6		-0,4	+1,3	+0,6	-1,8	-1,9
				-0,70	-0,70					-1,75	-1,45

180° 20'	+0,5 +1,2	+0,6 +1,1	+0,7 +1,0	-0,1 +0,1	-0,2 +0,2	202° 40'	+1,4 +0,7	+0,6 -0,2	-0,9 -1,0	+0,8 +0,9	+2,3 +1,7
225° 40'	+0,2 +0,8	+1,2 +1,2	+0,5 +1,0	0,00 -1,0 -0,4	0,00 -0,3 -0,2	248° 00'	0,0 -0,4	-0,9 -0,4	-0,2 -1,0	+0,85 +0,9 0,0	+2,00 +0,2 +0,6
270° 00'	-2,0 -2,0	-2,2 -2,4	-1,0 -1,9	+0,2 +0,4	-1,0 -0,1	292° 20'	-0,8 -1,0	-0,5 -1,4	-1,2 -0,9	+0,45 -0,3 +0,4	+0,40 +0,4 -0,1
315° 20'	-1,0 -1,2	-1,4 -2,0	-2,1 -1,9	+0,4 +0,8	+1,1 +0,7	337° 40'	+1,1 +0,9	-0,2 -0,6	-0,8 -0,7	+0,05 +1,3 +1,5	+0,15 +1,9 +1,6
				+0,60	+0,90					+1,40	+1,75
		Средние	$r_1 = +0,21$	$r_2 = +0,40$					Средние	$r'_1 = +0,10$	$r'_2 = +0,55$

$$r_0 = \frac{1}{2} (r_1 + r'_1) = +0'',16; \quad r_H = \frac{1}{2} (r_2 + r'_2) = +0'',48; \quad r = \frac{1}{2} (r_B + r_H) = +0'',32; \quad \Delta r = r_B - r_H = -0'',32$$

Здесь ν — цена деления шкалы оптического микрометра. Значения $r = \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{н}}}{2}$ и $\Delta r = r_{\text{в}} - r_{\text{н}}$ не должны превышать $0",5$ у теодолитов ОТ-02М и $1"$ у теодолитов Т2.

Если величина рена превышает указанные допуски, то в результаты измерений вводят поправки

$$\Delta r = \frac{2r}{\lambda} c,$$

где c — отсчет по микрометру.

При больших значениях Δr следует отъюстировать оптическую систему микрометра.

В табл. 11 приведен пример определения рена теодолита Т2.

В-44

ГЛАВА VI
ОПТИЧЕСКИЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

§ 53. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДАЛЬНОМЕРОВ.
ПРЕДРАСЧЕТ ТОЧНОСТИ

В основе определения расстояния D оптическими дальномерами лежит решение параллактического треугольника ABC (рис. 88). Это очень вытянутый треугольник, в котором отношение $\frac{D}{b} = k$ — есть коэффициент дальномера.

Коэффициент дальномера обычно равен 100 и иногда 200.

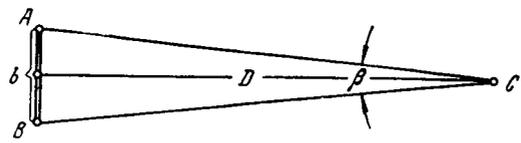


Рис. 88. Параллактический треугольник

Если $k = 100$, то параллактический угол $\beta_1 = \frac{206\ 265''}{100} = 2062'',5$, а если $k = 200$, то $\beta_2 = \frac{206\ 265}{200} = 1031'',3$.

Расстояние D может быть вычислено по формуле

$$D = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}, \quad (\text{VI},1)$$

где b — базис.

Оптические дальномеры можно классифицировать по расположению базиса и по принципу измерения элементов треугольника ABC , входящих в формулу (VI,1).

Различают оптические дальномеры с базисом:

- а) у определяемой точки;
- б) у прибора.

По принципу измерения различают дальномеры:

- а) с постоянным базисом b и переменным (измеряемым) углом β ;
- б) с переменным (измеряемым) базисом b и постоянным углом β .

Для определения расстояния D из решения треугольника ABC (см. рис. 88) нужно знать величины базиса b и параллактического угла β .

Если эти величины будут измерены с ошибками db и $d\beta$, то расстояние D будет вычислено с ошибкой dD . Дифференцируя выражение (VI,1) по b и β , будем иметь

$$dD = \frac{db}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} - \frac{bd\beta}{2 \sin^2 \frac{\beta}{2}}.$$

Разделив обе части полученного равенства на D , получим

$$\frac{dD}{D} = \frac{db}{b} - \frac{2d\beta}{\sin \beta} = \frac{db}{b} - \frac{2d\beta}{\beta}. \quad (\text{VI},2)$$

ГОСТ 11356—65 «Дальномеры оптические двойного изображения», который введен с 1 января 1967 г., устанавливает следующие типы дальномеров:

ДН-04, позволяющий определять расстояния со средней квадратической ошибкой ± 4 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 2500;

ДНР-06, позволяющий определять горизонтальные (редуцированные) расстояния со средней квадратической ошибкой ± 6 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 1600;

ДН-08, позволяющий определять расстояния со средней квадратической ошибкой ± 8 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 1250;

ДН-10, позволяющий определять расстояния со средней квадратической ошибкой ± 10 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 1000;

ДВ-20 (с базисом при инструменте), позволяющий определять расстояния со средней квадратической ошибкой ± 20 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 500.

Первые четыре дальномера используются в виде насадок к зрительным трубам теодолитов и кипрегелей, а последний — в виде самостоятельного инструмента.

Существующий отечественный дальномер типа ОТД позволяет определять расстояния со средней квадратической ошибкой ± 2 см на 100 м или с относительной ошибкой 1 : 5000.

Рассмотрим вопрос о точности измерения параметров параллактического треугольника b и β при вычислении расстояния D с относительными ошибками 1 : 500 и 1 : 5000. Для этого необходимо, чтобы элементы параллактического треугольника были измерены с ошибками, не превышающими величин:

для измерений с относительной ошибкой $\frac{dD}{D} = 1 : 500$

$$\frac{db}{b} < 2 \text{ мм}/1 \text{ м}; \quad \frac{d\beta}{\beta} < \frac{1}{1000}; \quad d\beta < \frac{2062",6}{1000} = \pm 2",0;$$

для измерений с относительной ошибкой $\frac{dD}{D} = 1 : 5000$

$$\frac{db}{b} < \frac{0,2 \text{ мм}}{1 \text{ м}}; \quad \frac{f d\beta}{\beta} < \frac{1}{10000}; \quad d\beta < \frac{2062''}{10000} = \pm 0'',2.$$

Длина базиса b при выполнении ряда условий может быть измерена с необходимой точностью. К точности измерения параллактического угла β приходится предъявлять очень высокие требования. Например, при измерении расстояний с относительной ошибкой $1 : 2500$ и коэффициенте дальномера $k = 200$ $d\beta = \frac{1031'' \cdot 8}{5000} = 0'',2$.

§ 54. НИТЯНОЙ ДАЛЬНОМЕР В ТРУБЕ С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Нитяной дальномер относится к оптическим дальномерам с постоянным углом и переменным базисом при определяемой точке.

До разработки Б. В. Фефиловым теории дальномерных труб с внутренней фокусировкой применение их встречало возражения. Вызывалось это переменным характером f_D и d и сложностью связей параметров зрительной трубы с коэффициентом нитяного дальномера k и c .

Пусть на рис. 89, *a* представлена оптическая система телеобъектива, состоящая из двух компонентов: H_1 — объектива и H_2 — фокусирующей линзы. Линия VV_1 — вертикальная ось вращения инструмента, l и m — дальномерные нити; точки L и M — проекции дальномерных нитей на плоскость рейки.

Расстояние D от рейки до оси вращения инструмента VV_1 будет равно

$$D = -x - a_F + \delta. \quad (\text{VI},3)$$

Из подобия треугольников LMF и ABF , в которых $LM = n$ — отрезок рейки между проекциями нитей и $AB = lm = p$ — расстояние между нитями на сетке, следует

$$x = -\frac{f_D}{p} n,$$

где f_D — фокусное расстояние телеобъектива, когда система отфокусирована на рейку LM .

Подставляя x в формулу (VI,3), получим

$$D = \frac{f_D}{p} n + (\delta - a_F). \quad (\text{VI},4)$$

Обозначим величину эквивалентного фокусного расстояния телеобъектива при фокусировании системы на бесконечность через f . Тогда

$$f_D = f + \Delta f_D.$$

В соответствии с этим формула (VI,4) примет вид

$$D = \frac{f}{p} n + \left(\frac{\Delta f_D}{p} n + \delta - a_F \right). \quad (\text{VI,5})$$

В формуле (VI,5) отношение $\frac{f}{p}$ остается постоянным независимо от фокусировок, его обозначают через k . Выражение в скобках содержит переменные величины Δf_D и a_F . Поэтому второй член формулы (VI,5), который обозначим c'_D , — величина переменная.

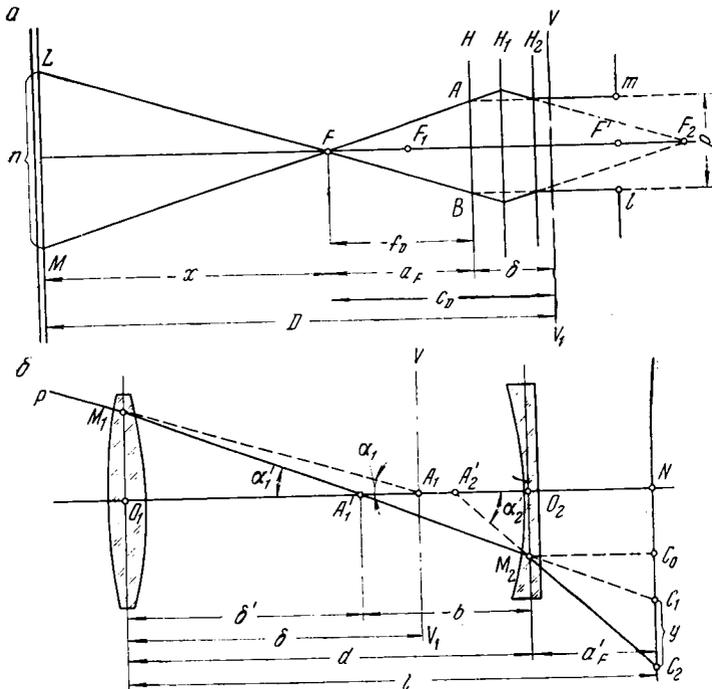


Рис. 89. Схемы к теории нитяного дальномера в трубе с внутренней фокусировкой

С учетом сказанного формула (VI,5) можно придать вид

$$D = \frac{f}{p} n + c'_D. \quad (\text{VI,6})$$

В трубах с внутренней фокусировкой член c'_D не может быть равен нулю. Однако его величина даже при малых расстояниях D может принимать малые значения по сравнению с D , которыми можно пренебречь.

Найдем наиболее выгодное положение фокусирующей линзы, вблизи которого ее перемещения будут вызывать минимальные изменения члена c'_D (рис. 89, б).

Рассмотрим луч PM_1 , направленный в аналлатическую * точку A_1 . Отметим, что направление луча PA_1 , положение аналлатической точки A_1 , величина угла α_1 , а также положение изображения A'_1 точки A_1 через объектив O_1 и величина угла α'_1 не зависят от перемещения фокусирующей линзы O_2 . С другой стороны, луч M_2C_2 меняет свое положение при фокусировке, вследствие чего изменяются положение точки A'_2 и величина угла α'_2 (рис. 89, б).

Очевидно, что расстояние $A'_1N = -b + a'_F$ при фокусировании остается постоянным.

Продолжение луча M_1M_2 в пересечении с плоскостью сетки нитей дает точку C_1 . При перефокусировках отрезок NC_1 остается неизменным, в то время как отрезок C_1C_2 изменяет свою величину за счет перемещения точки C_2 . Если отрезок $NC_0 = O_2M_2$, то из треугольников $M_2C_2C_0$ и $M_2C_1C_0$ имеем:

$$C_0C_2 = M_2C_0 \operatorname{tg} \alpha'_2 = a'_F \operatorname{tg} \alpha'_2;$$

$$C_0C_1 = M_2C_0 \operatorname{tg} \alpha'_1 = a'_F \operatorname{tg} \alpha'_1.$$

Тогда

$$C_1C_2 = C_0C_2 - C_0C_1 = a'_F (\operatorname{tg} \alpha'_2 - \operatorname{tg} \alpha'_1). \quad (\text{VI},7)$$

Из треугольников $A'_1O_2M_2$ и $A'_2O_2M_2$ следует, что

$$O_2M_2 = A'_1O_2 \operatorname{tg} \alpha'_1 = A'_2O_2 \operatorname{tg} \alpha'_2,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{A'_1O_2}{A'_2O_2} \operatorname{tg} \alpha'_1. \quad (\text{VI},8)$$

Учитывая, что точки A'_1 и A'_2 являются относительно фокусирующей линзы сопряженными точками, можно на основании формулы отрезков (I,41) написать, что

$$A'_2O_2 = \frac{A'_1O_2 f'_2}{A'_1O_2 + f'_2}.$$

Тогда, подставляя значение A'_2O_2 в (VI,8), можно написать

$$\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{A'_1O_2 + f'_2}{f'_2} \operatorname{tg} \alpha'_1 = \frac{f'_2 - b}{f'_2} \operatorname{tg} \alpha'_1.$$

После подстановки значения $\operatorname{tg} \alpha'_2$ в формулу (VI,7) находим

$$C_1C_2 = -a'_F \frac{b}{f'_2} \operatorname{tg} \alpha'_1. \quad (\text{VI},9)$$

Определим условия, при которых значение $C_1C_2 = y$ будет экстремальным и, следовательно, изменение этого значения при

* Аналлатическая точка — вершина параллacticеского угла, находящаяся вблизи проекции оси вращения инструмента VV_1 на оптическую ось зрительной трубы.

фокусировании — минимальным. Для этого продифференцируем выражение (VI,9):

$$dy = -\frac{\operatorname{tg} \alpha'_1}{f'_2} (a'_F db + b da'_F),$$

а так как $-b + a'_F = \text{const}$, то дифференциал этого выражения равен нулю, т. е.

$$-db + da'_F = 0,$$

откуда

$$db = da'_F.$$

Поэтому

$$dy = -\frac{\operatorname{tg} \alpha'_1}{f'_2} (b + a'_F) db.$$

Исследуем функцию на максимум и минимум. Так как f'_2 — величина отрицательная (заднее фокусное расстояние рассеивающей линзы), а $\operatorname{tg} \alpha'_1$ — величина положительная, то $-\frac{\operatorname{tg} \alpha'_1}{f'_2} > 0$.

Если абсолютное значение $|b| > |a'_F|$, то $\frac{dy}{db} < 0$ (так как $b < 0$, а $a'_F > 0$). Если по абсолютной величине $|b| < |a'_F|$, то $\frac{dy}{db} > 0$. Следовательно, имеет место минимум функции.

Приравнявая первую производную $\frac{dy}{db}$ нулю, получим

$$\frac{dy}{db} = -\frac{\operatorname{tg} \alpha'_1}{f'_2} (b + a'_F) = 0. \quad (\text{VI}, 10)$$

При конечном значении величины $\frac{\operatorname{tg} \alpha'_1}{f'_2}$ уравнение (VI,10) может быть удовлетворено условием

$$b + a'_F = 0,$$

откуда

$$b = -a'_F. \quad (\text{VI}, 11)$$

Следовательно, изменение величины y , а значит и величины s_D дальномера будет минимальным при условии равенства абсолютных величин расстояний a'_F от фокусирующей линзы до сетки нитей и b от фокусирующей линзы до изображения A'_1 через объектив точки A_1 — проекции вертикальной оси вращения инструмента на оптическую ось трубы (см. рис. 89, б).

Точки A_1 и A'_1 являются сопряженными относительно объектива O_1 , поэтому по формуле отрезков (I,41) можно написать

$$\delta' = \frac{\delta f'_1}{\delta + f'_1},$$

где δ' и δ — расстояние точек A'_1 и A_1 до объектива.

Из рис. 89, б следует, что

$$b = \delta' - d,$$

где d — расстояние между объективом и фокусирующей линзой.

Подставляя значение δ' в последнее выражение, получим

$$b = \frac{\delta f'_1}{\delta + f'_1} - d.$$

Учитывая формулу (VI,11), на основании последнего выражения можно написать

$$-a'_F = \frac{\delta f'_1}{\delta + f'_1} - d.$$

Имея в виду, что $l - d = a'_F$ (см. рис. 89, б), последнюю формулу можно переписать в виде

$$\frac{\delta f'_1}{\delta + f'_1} + l - 2d = 0. \quad (\text{VI},12)$$

Трубы с внутренней фокусировкой, у которых член c'_D формулы (VI,6) хотя и не равен нулю, но пренебрегаемо мал по сравнению с короткими расстояниями D , могут быть рассчитаны при совместном решении уравнений (I,80а), (I,84) и (VI,12):

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d};$$

$$l = d + f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right);$$

$$\frac{\delta f'_1}{\delta + f'_1} + l - 2d = 0.$$

Заданными величинами при этом являются f' , l и δ , определяемыми — f'_1 , f'_2 и d .

§ 55. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАЛЛАКТИЧЕСКОГО УГЛА β И БАЗИСА b В ДАЛЬНОМЕРАХ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В современных оптических дальномерах с постоянным базисом b у определяемой точки для измерения параллактического угла β используются линзовые компенсаторы.

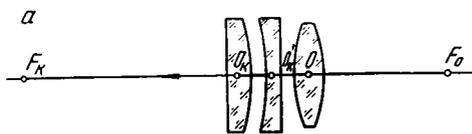
Пусть O — объектив зрительной трубы, F_0 — его задний фокус (рис. 90, а). Поместим перед объективом O две линзы: плоско-выпуклую O_k и плоско-вогнутую O'_k , имеющие одинаковые по абсолютной величине фокусные расстояния f_k и f'_k . Такая система афокальна — она не влияет на масштаб изображения, даваемого зрительной трубой. При совпадении оптических осей объектива O и линз O_k и O'_k изображение точки визирования в зрительной трубе будет видно в середине поля зрения. Если одну из линз компенсатора сместить относительно оси зрительной трубы на величину Δ , то луч, идущий вдоль этой оси, будет отклонен на угол ε (рис. 90, б и в)

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{f_k} \rho \quad (\text{VI},13)$$

и изображение точки визирования сместится.

Если подвижную линзу разрезать по диаметру и одну из этих половин сместить вдоль разреза, то в поле зрения трубы будем наблюдать два изображения точки визирования, смещенных на некоторую величину. С подвижной полулинзой соединяется шкала, по которой отсчитывается величина ее смещения Δ .

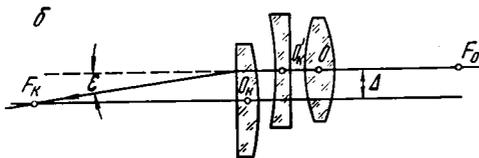
Передвигая одно изображение марок при помощи подвижной полулинзы, соединенной со шкалой так, чтобы изображения левой и правой марок совместились, делают отсчет по шкале и определяют Δ . Зная b , можно вычислить расстояние до рейки по формуле



$$D = b \operatorname{ctg} \varepsilon$$

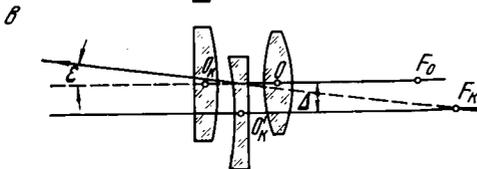
или по малости ε — по формуле

$$D = \frac{b}{\Delta \rho} f_k = \frac{k}{\Delta}, \quad (\text{VI}, 14)$$



где $k = \frac{b f_k}{\rho}$ — коэффициент дальномера;

Δ — параллактический угол ε , выраженный в делениях шкалы и их долях.



В оптических дальномерах с постоянным параллактическим углом β и переменным базисом b постоянный параллактический угол получают, используя в сочетании со зрительной трубой: оптиче-

Рис. 90. Линзовые компенсаторы

ский клин или децентрированные полулинзы. В первом случае перед объективом устанавливается ахроматический клин, перекрывающий часть свободного отверстия (рис. 91, а). Если теперь навести трубу на рейку, установленную в плоскости параллактического треугольника перпендикулярно визирной оси трубы, то в поле зрения будут видны два изображения: одно — полученное через свободную половину объектива, другое — смещенное клином на величину, пропорциональную расстоянию D — s . Величина сдвига (величина базиса $b = nq$) отсчитывается по шкале смещенного клином изображения рейки. Отсчет берется против изображения индекса J , видимого через свободную часть объектива (рис. 91, в).

Во втором случае перед объективом устанавливаются две полулинзы L_1 и L_2 с одинаковыми фокусными расстояниями, оптические центры которых O_1 и O_2 смещены в противоположные стороны относительно оптической оси зрительной трубы на постоянные величины Δ_1 и Δ_2 (рис. 91, б). В результате этого в поле зрения трубы получаются два изображения на расстоянии $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{f_L} f_{об}$ одно от

ого, где f_d — фокусное расстояние децентрированных линз; f_o — фокусное расстояние объектива зрительной трубы.

разделение совмещенных двойных изображений. Для того чтобы избежать взаимные помехи двух изображений одного предмета или совмещенных изображений разных предметов, находящихся

на расстоянии зрения одной трубы (рис. 92, а), необходимо вводить особую раскладку реек или включать дополнительные элементы в оптическую систему зрительных труб.

При наложении двух изображений разных частей одного предмета на другое это приведет к следующим смещениям цветов: при наложении белого на белый получается белый цвет;

при наложении черного на черный получается черный цвет;

при наложении белого на черный получается серый цвет.

Чтобы избежать наложения изображений шкалы на другое, нужно сделать рейку вдоль на две половины (рис. 92, б).

На одной половине (верхней) наносят деления основной шкалы, а на другой (нижней) наносят штрихи

шкалы нониуса. Противоположные части шкалы закрасивают

одну половину штрихов (на рис. 92, б — черным, а на рис. 92, в — белым). Если деления основной шкалы и деления нониуса нанесены на противоположных частях рейки, то при совмещении изображений они отчетливо видны раздельно, независимо от того, нанесены ли в виде черных штрихов на белом фоне или в виде белых штрихов на черном фоне: при наложении получают черные штрихи на белом фоне или белые штрихи на сером фоне.

При постоянном параллактическом угле β индекс или нулевой штрих шкалы нониуса смещается так, что оказывается против

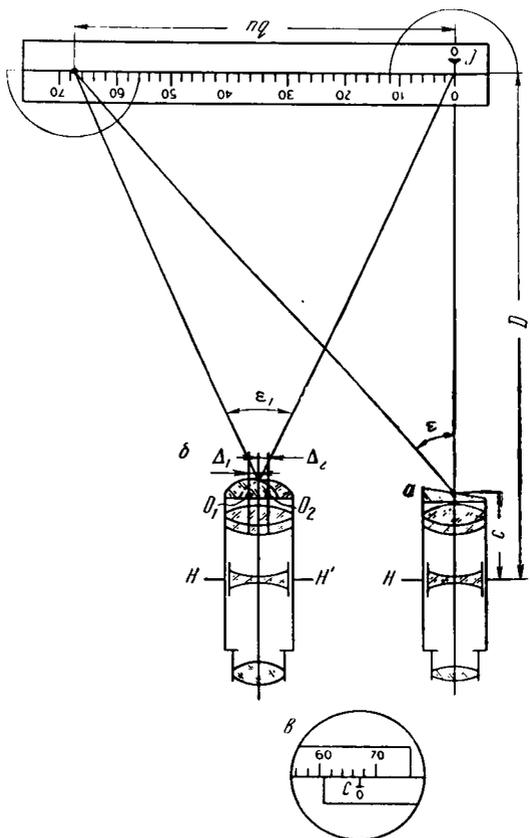


Рис. 91. Дальномер с постоянным параллактическим углом

участка рейки, соответствующего отсчету, равному длине b . Отсчет этот производится непосредственно по шкале нониуса.

Если же измерение ведется с постоянным базисом и переменным углом β , то концы базиса следует отмечать марками, нанесенными на рейку так, чтобы при совмещении они не мешали друг другу. Эти марки можно нанести в виде черных штрихов, направленных от разделительной линии рейки в противоположные стороны. В

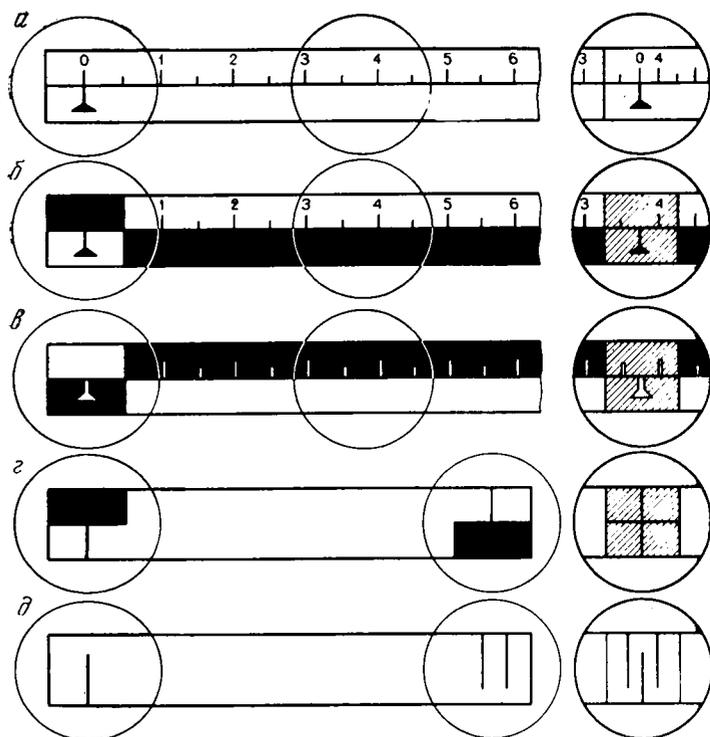


Рис. 92. Разделение совмещенных изображений применением особой окраски реек

случае противоположные части рейки должны быть закрашены тем цветом (на рис. 92, z — черный цвет). Иногда одну марку делают в виде одинарного штриха, другую — в виде двойного (рис. 9).

В тех случаях, когда нужно полностью избежать наложения одного изображения на другое, пользуются бипризмой, которую располагают в плоскости промежуточного изображения трубки щелевой диафрагмой, расположенной в плоскости выходного зрительной трубы. Ребро бипризмы и ось щели диафрагмы расположены параллельно линии разделения объектива клином или разделом линз.

На рис. 93, *a* AB — рейка; EH — ахроматический клин; CD — объектив трубы; $A'B'$ — изображение рейки, построенное объективом, в передней фокальной плоскости окуляра O_2 ; $C'D'$ — выходной зрачок трубы (изображение оправы объектива CD окуляром).

В построении любой точки изображения рейки $A'B'$ участвуют все лучи, вышедшие из соответствующей точки рейки AB и прошедшие через входной зрачок CD .

Например, в построении изображения точки A' участвуют все лучи, заключенные в четырехугольнике $ACA'DA$, а в построении

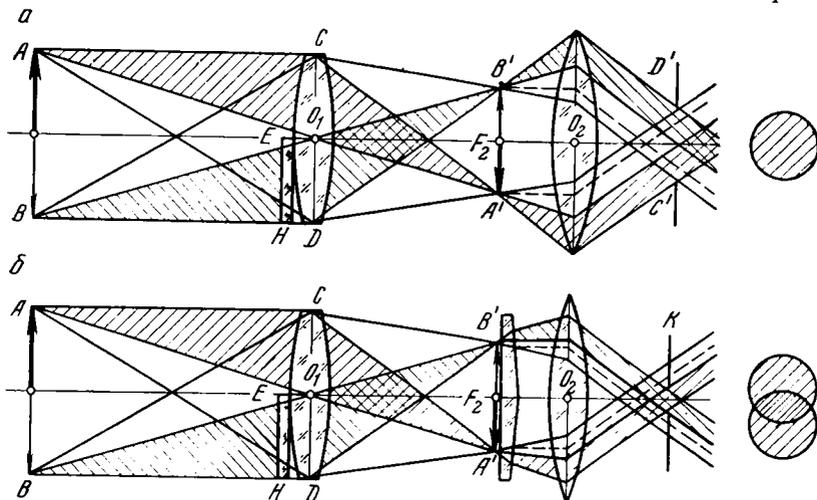


Рис. 93. Разделение совмещенных изображений при помощи бипризмы и щелевой диафрагмы

точки B' — все лучи, ограниченные четырехугольником $BCB'DB$. При этом в построении изображения каждой точки участвуют два полупучка: один, идущий через верхнюю половину объектива, например $ACA'O_1A$, и другой полупучок, идущий через нижнюю половину объектива ($AO_1A'DA$). Оба полупучка проходят через окуляр и через выходной зрачок попадают в глаз.

Поместим в плоскости изображения $A'B'$ бипризму (рис. 93, *б*) так, чтобы ее ребро было параллельно грани клина, делящей объектив на две части. Бипризма отклонит пучки лучей, идущих в нижнюю и верхнюю половины окуляра, и образует два выходных зрачка, смещенные относительно друг друга.

Если теперь на пути лучей в плоскости выходного зрачка поместить диафрагму K в виде щели, параллельной ребру бипризмы, то она отсечет лучи, идущие от стрелки A через нижнюю половину объектива, и лучи, идущие от стрелки B через верхнюю половину объектива. В результате этого глаз будет видеть только несмещенное изображение стрелки A , так как до него дойдут лучи, прошедшие

только через верхнюю половину объектива, и только смещенное изображение стрелки *B*, так как до глаза от нее дойдут лучи, прошедшие только через *B*, нижнюю половину объектива, перекрытую клином.

§ 56. ДАЛЬНОМЕРЫ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМ БАЗИСОМ ПРИ ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ТОЧКЕ

Конструкция дальномера с переменным углом и постоянным базисом должна обеспечить высокую точность измерения угла. Необходимую точность измерения угла можно получить при помощи

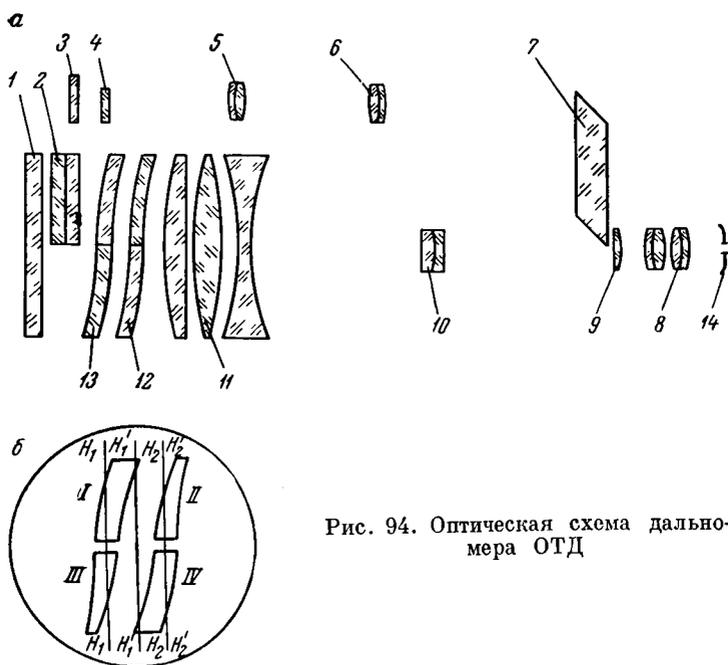


Рис. 94. Оптическая схема дальномера ОТД

компенсатора с подвижными полулинзами. Наиболее совершенным представителем этого типа дальномеров является оптический топографический дальномер ОТД.

В дальномере применено комбинированное устройство, позволяющее точно измерять сравнительно большие параллактические углы (до 5200").

Это устройство состоит из постоянного оптического клина 2, которым можно перекрывать попеременно одну или другую половины входного отверстия трубы; измерительной части компенсатора 13 и вспомогательной части компенсатора 12 (рис. 94, а). Поэтому величина параллактического угла определяется по формуле

$$\beta = \beta_k + \beta_n, \quad (\text{VI}, 15)$$

где β_k — постоянная часть параллактического угла, определяемая с помощью перекидного клина;

$\beta_{\text{и}}$ — переменная часть параллактического угла, измеряемая компенсатором. Угол $\beta_{\text{и}}$ может иметь знак «плюс» или «минус».

Каждая компонента линзового компенсатора (рис. 94, б) состоит из двух половин линз: полулинзы I и IV являются частями разрезанной пополам отрицательной вогнуто-выпуклой линзы; полулинзы II и III являются частями положительной выпукло-вогнутой линзы. Фокусные расстояния отрицательной и положительной линз равны между собой по абсолютной величине.

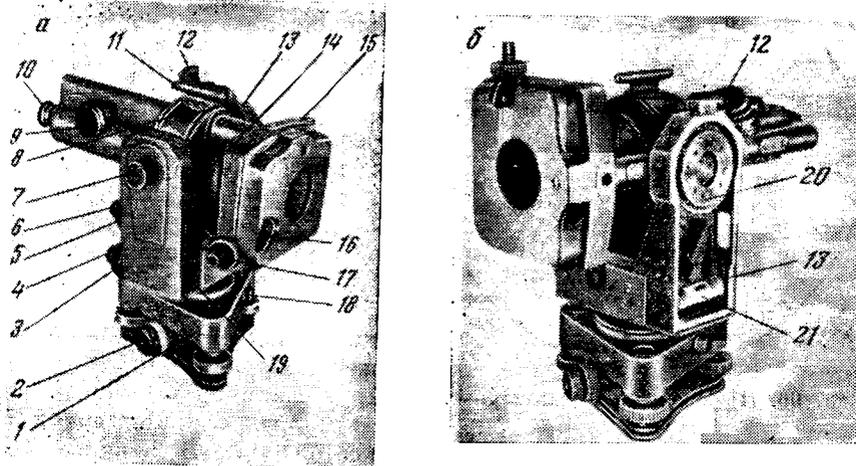


Рис. 95. Дальномер ОТД

Расстояние между компонентами компенсатора выбрано так, что задняя главная плоскость первой компоненты совмещена с передней главной плоскостью второй компоненты. Линзы первой компоненты заключены в общую оправу, и с ними жестко связана дальномерная шкала 4 (см. рис. 94, а), при помощи которой измеряется переменная часть параллактического угла и поэтому первая компонента называется измерительной частью компенсатора. Изображение шкалы строится объективом 5, 6 при помощи призмы 7 в плоскости би-призмы. Линзы второй компоненты заключены в другую оправу и дают возможность вести измерения на разных частях дальномерной шкалы. При таком устройстве компенсатора перемещение одной из компонент в плоскости, перпендикулярной визирной оси трубы и параллельной плоскости разреза линз, вызывает раздвоение изображения предмета и симметричное смещение в противоположные стороны. Оптический клин установлен в каретке, которая перемещается по вертикальным направляющим при повороте флажка 16 (рис. 95. а).

Оптические детали компенсатора и отсчетного микроскопа preserved from external influences by flat-parallel plates 1 and 3 (рис. 94, а). Зрительная труба consists of a three-lens objective 11, focusing lens 10, biconvex lens 9 and eyepiece 8, on which a glass diaphragm 14 (см. рис. 94, а) is mounted.

The image of the range scale is introduced into the field of vision of the eyepiece of the visual tube. The counting microscope consists of flat-parallel plates 3 and 4, two-component objective 5 and 6, prism 7 and biconvex lens and eyepiece. On the upper surface of the biconvex lens a scale of the microscope with ten divisions, the length of which is equal to one division of the range scale, is applied.

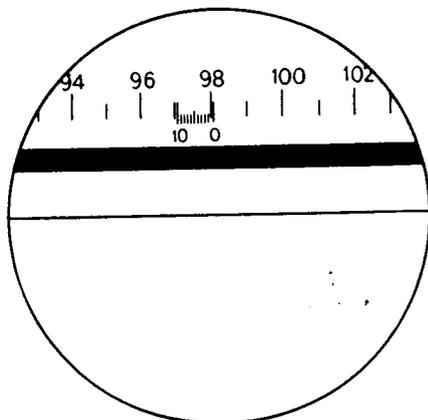


Рис. 96. Поле зрения дальномерных шкал:

98 — отсчет по дальномерной шкале;
0,05 — отсчет по вспомогательной шкале;
98,05 — полный отсчет

The range meter OTD is made in the form of a separate instrument. On the stands 13 and 19 on the axis a ring 8 is fixed, in which a shellac body 14 of the range meter (рис. 95, а) is placed. In the front part of the body a lens compensator is located, behind it — details of the visual tube, and in the upper part — details of the counting microscope. The body of the range meter can be rotated in the ring 8 around the line of sight of the tube by 90° and fixed in this position by the biconvex lens 7. In the upper part of the ring a optical sighting device 11 is fixed. The range meter is mounted on the tripod 1 and fixed

by the screw 18. The tripod is provided with an optical plumb line 2, intended for centering the range meter over the points of the locality (рис. 95, а).

In the stand 13 (рис. 95, б) at the end of the horizontal axis a vertical glass limb 20 with a division value of 10' for measuring vertical angles is fixed. The reading is done by the microscope-estimator 12 with an accuracy of $\pm 1'$. Inside the stand a level 21 with a division value of 45" is fixed. The leveling screws 3 and 5 allow to accurately level the range meter in the horizontal and vertical planes. Correspondingly to them are fixed the screws 4 and 6 (см. рис. 95, а).

The measuring part of the compensator is moved by the rotation of the screw 17, and the auxiliary part — by the rotation of the screw 15. The focusing of the visual tube is done by the rotation of the drum 9. The field of vision of the range scales is shown in fig. 96.

To the range meter a bar of length 2,16 m (рис. 97) is attached. On the bar two sighting tubes 1 are fixed from both sides.

марки 2 (с каждой стороны по шесть штук), представляющие собой пластины, окрашенные в желтый цвет с черной полосой.

Расстояния между осями черных полос (базы) на одной стороне равны 0,400 м, а на другой стороне 0,404 м. Все марки пронумерованы. Рейка снабжена двумя круглыми уровнями 4 и 6 для установки ее в горизонтальное и вертикальное положение. На рейке укреплены оптический визир 5 для установки плоскости рейки перпендикулярно оси визирования дальномера и термометр 3. Рейка так же, как дальномер или марка, может укрепляться на подставке — треножнике в горизонтальном и вертикальном положении с помощью цилиндрических втулок 7.

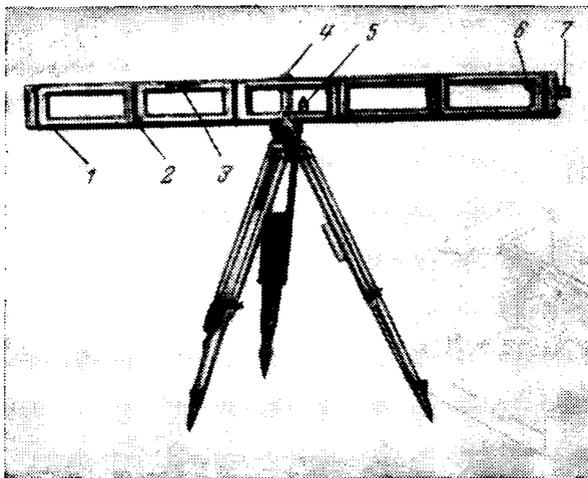


Рис. 97. Дальномерная рейка

На рис. 98 показана схема определения расстояния дальномером ОТД. Расстояние от вершины параллактического угла до плоскости марок рейки вычисляется по формуле

$$D' = \frac{k}{\beta}, \text{ м}, \quad (\text{VI}, 16)$$

где k — коэффициент дальномера ($k = \frac{bf_k}{\rho}$);

β — величина параллактического угла, выраженная в делениях и долях дальномерной шкалы.

Полное расстояние от вертикальной оси вращения дальномера до точки, на которой установлена рейка,

$$D = D' + c = D' + c_1 + c_2, \quad (\text{VI}, 17)$$

где $c = c_1 + c_2 = 0,119$ м.

В измеренное расстояние необходимо ввести две поправки: за наклон линии ΔD , и за температуру рейки ΔD_t . Поэтому формула для определения горизонтального проложения будет иметь вид

$$d = \frac{Nk}{\beta} + c - \Delta D, + \Delta D_t, \quad (\text{VI}, 18)$$

где N — число малых базисов, используемых при измерении расстояния, так как k определяется для малого базиса.

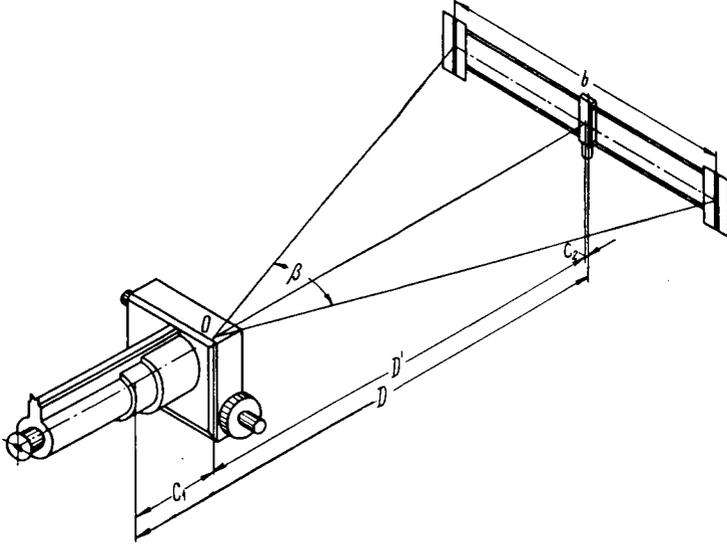


Рис. 98. Схема к определению расстояний дальномером ОТД

Поправка за наклон линии определяется по формулам: при горизонтально расположенной рейке

$$\Delta D_v = 2D \sin^2 \frac{\nu}{2};$$

при вертикально установленной рейке

$$\Delta D_v = D \cos^2 \nu,$$

где ν — угол наклона визирной оси при наведении на высоту установки дальномера. При углах наклона до 10° ошибка измерения угла наклона может составлять $\pm 1'$, а при больших углах углы наклона следует измерять теодолитом с ошибкой, не превышающей $\pm 20''$.

Поправка за температуру определяется по формуле

$$\Delta D_t = D \left[0,000016 (t - t_0) + \frac{\beta_k 0,000007 (t - t_0)}{\beta} \right], \quad (\text{VI}, 19)$$

где D — измеренное расстояние, m ;

t — температура во время измерения расстояния D ;

t_0 — температура, при которой определялся коэффициент дальности k и угол β_k .

Температуру следует определять с точностью $\pm 3^\circ C$. Для определения расстояний необходимо знать величины k и β_k .

Постоянную часть β_k параллактического угла, выраженную в делениях и долях дальномерной шкалы, можно определить на основании следующих соображений.

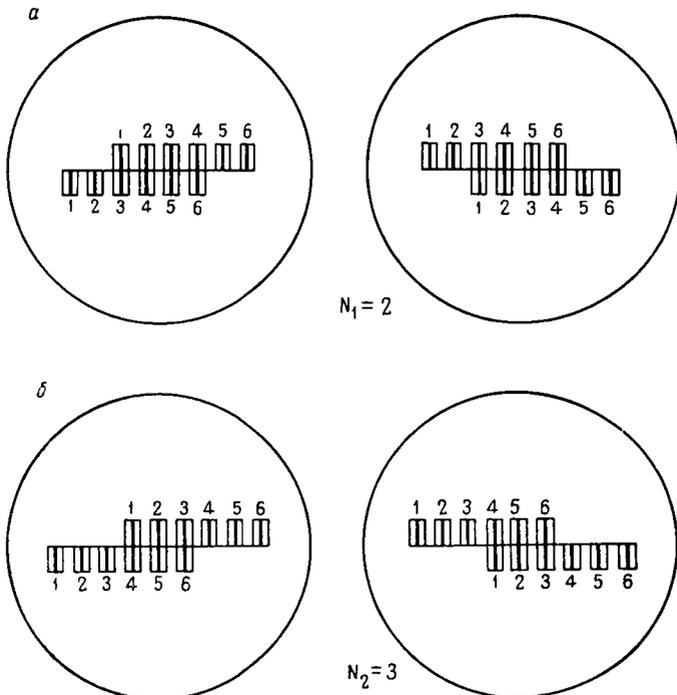


Рис. 99. Схема к определению постоянного угла β_k

Определим, пользуясь формулой (VI, 16), одно и то же расстояние D' , измерив β_{n_1} и β_{n_2} соответственно при N_1 и N_2 малых базисах:

$$D' = \frac{N_1 k}{(\beta_k + \beta_{n_1})} = \frac{N_2 k}{(\beta_k + \beta_{n_2})},$$

откуда следует, что

$$\beta_k = \frac{N_1 \beta_{n_2} - N_2 \beta_{n_1}}{N_2 - N_1}. \quad (\text{VI}, 20)$$

Порядок определения постоянного угла β_k перекидного клина следующий.

1. Наведя дальномер на рейку, совмещают полуизображения марок винтом 17, направляя флажок 16 (см. рис. 95, а) вверх, и делают отсчет n_1 по дальномерной шкале (см. рис. 96). Поворачивают флажок 16 вниз, совмещают полуизображения марок винтом 17 и вновь делают отсчет n_2 по дальномерной шкале. Оба отсчета n_1 и n_2 производят при одном и том же числе малых базисов N_1 (разность между номерами совмещенных марок, рис. 99, а). Определяют переменную часть параллактического угла $\beta_{н1}$:

$$\beta_{н1} = n_1 - n_2.$$

2. Те же самые операции повторяют при другом числе малых базисов (рис. 99, б) и определяют переменную часть угла $\beta_{н2}$.

3. Затем вычисляют β_k по формуле (VI,20).

Для определения коэффициента дальномера измеряют базис длиной 400 м с интервалами 50, 100, 200 и 300 м с относительной ошибкой не более 1 : 20 000. Величина k определяется несколько раз для различных интервалов базиса и вычисляется по формуле

$$k = (D_0 - c + \Delta D_v - \Delta D_t) \frac{\beta_{ср}}{N}, \quad (\text{VI},21)$$

где D_0 — горизонтальное проложение интервалов базиса;

c — постоянное слагаемое, равное 0,119 м;

ΔD_v — поправка за наклон линии;

ΔD_t — поправка за температуру;

$\beta_{ср}$ — среднее значение измеренного параллактического угла ($\beta_{ср} = \beta_k + \beta_{н,ср}$);

N — число малых базисов, использованных при определении $\beta_{ср}$.

Определив несколько значений k для различных интервалов базиса по двум сторонам рейки, вычисляют его среднее значение.

§ 57. ДАЛЬНОМЕРЫ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ПАРАЛЛАКТИЧЕСКИМ УГЛОМ

Дальномеры двойного изображения с постоянным углом и переменным базисом получили широкое распространение после того, когда были найдены способы точного отсчитывания величины базиса по рейке.

В дифференциальном дальномере использовано свойство пары оптических клиньев давать увеличенное изображение. При прохождении пучка параллельных лучей через два клина параллельность его сохраняется, но пучок увеличивается в главном сечении. Увеличение системы клиньев равно отношению $v = \frac{h_1}{h_3}$ (рис. 100).

Для определения увеличения v рассмотрим прохождение пучка параллельных лучей через один клин.

Пусть σ — преломляющий угол клина; i_1, i'_1, i_2, i'_2 — углы падения и преломления (рис. 100).

В соответствии с рис. 100 напомним следующие соотношения:

$$i_1' + i_2 = \sigma; \quad h_2 = h_1 \frac{\cos i_1'}{\cos i_1};$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_1'} = \frac{\sin i_2'}{\sin i_2} = n; \quad h_3 = h_2 \frac{\cos i_2'}{\cos i_2},$$

из которых следует, что

$$v = \frac{h_1}{h_3} = \frac{\cos i_1 \cos i_2}{\cos i_1' \cos i_2'}. \quad (\text{VI},22)$$

При $i_1 = 0$ из формулы (VI,22) получим

$$v = \frac{\cos \sigma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \sigma}}, \quad (\text{VI},23)$$

где n — показатель преломления стекла клина.

Дифференциальный дальномер ДДЗ (ДН-04), построенный по этому принципу, представляет собой насадку к теодолитам с внешним диаметром оправы объектива трубы 46 мм.

Два оптических клина 1 и 2 перекрывают одну половину объектива, вторую половину объектива перекрывает плоско-параллельная пластинка. Клинья и плоско-параллельная пластинка заключены в общей оправе 3, прикрепленной к корпусу насадки 4 четырьмя винтами 5.

Винты закрыты колпачком 6 со шторкой 7, которой можно перекрывать половину отверстия объектива с клиньями (рис. 101).

При измерении горизонтальных и вертикальных углов шторка закрывается. Дальномерная насадка укрепляется на оправе объектива при помощи винта 8. При работе с вертикальной рейкой головка винта 8 должна быть направлена вверх, а при работе с горизонтальной рейкой насадку поворачивают на 90° . Для уравнивания зрительной трубы к кольцу фокусирующей линзы прикрепляется противовес 1 (рис. 102).

Оптическая система клиньев рассчитана и отъюстирована так, что обеспечивает:

постоянный параллактический угол $\beta = 34', 38$ при коэффициенте дальномера $k = 100$;

увеличение $v = 1 \frac{1}{89}$;

отсутствие хроматической аберрации.

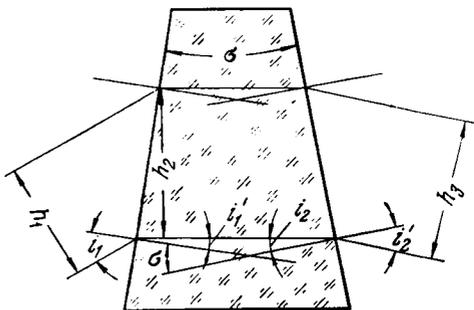
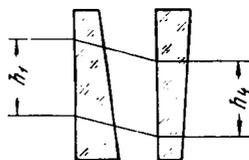


Рис. 100. Схемы к определению увеличения v

Направим зрительную трубу с дальномерной насадкой на вертикальную дальномерную рейку, установленную в плоскости парал-

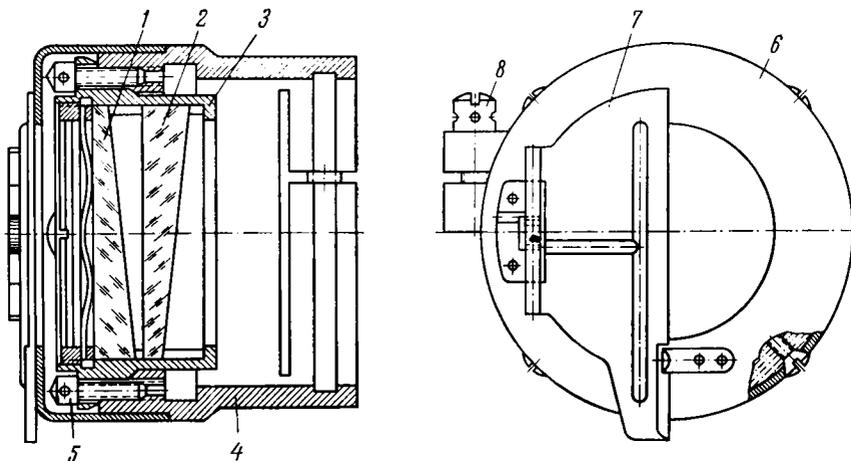


Рис. 101. Дальномерная насадка ДДЗ (ДН-04)

лактического треугольника перпендикулярно биссектрисе параллактического угла β (рис. 103, а). Визирная ось трубы, пройдя свободную часть объектива, пересечет рейку в точке B . Эта же ось, проходя перекрытую клиньями половину объектива, отклонится и пересечет рейку в точке A , в районе которой на рейке нанесена шкала нониуса. В поле зрения трубы мы увидим картину, показанную на рис. 103, б.

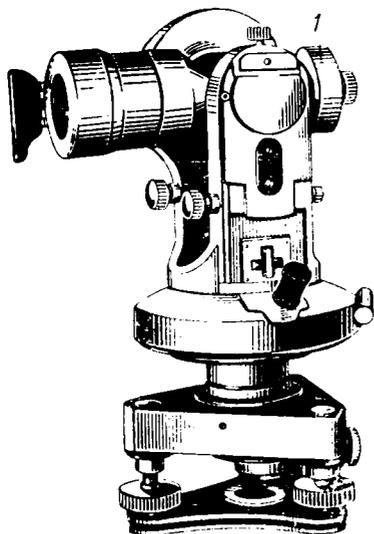


Рис. 102. Дальномер ДДЗ (ДН-04)

Повернем трубу в вертикальной плоскости на некоторый угол γ . Визирные оси пересекут рейку в точках A' и B' , изображения которых совпадут с нитью сетки, так же как раньше совпадали с ней точки A и B . При этом смещения визирных осей относительно рейки AA' и BB' будут равны между собой. Однако отрезок AA' рассматривается через систему клиньев, увеличение которой $v > 1$, поэтому он будет виден увеличенным и, следовательно, при

совпадении в поле зрительной трубы точек A' и B' точки A и B совпадать не будут. Поэтому при повороте трубы мы будем наблюдать не только перемещение двух изображений рейки относительно

нити сетки, но и смещение этих изображений относительно друг друга.

Если обозначить $AA' = BB' = r$, то смещение Δ этих изображений будет равно

$$\Delta = vr - r = r(v - 1). \quad (\text{VI}, 24)$$

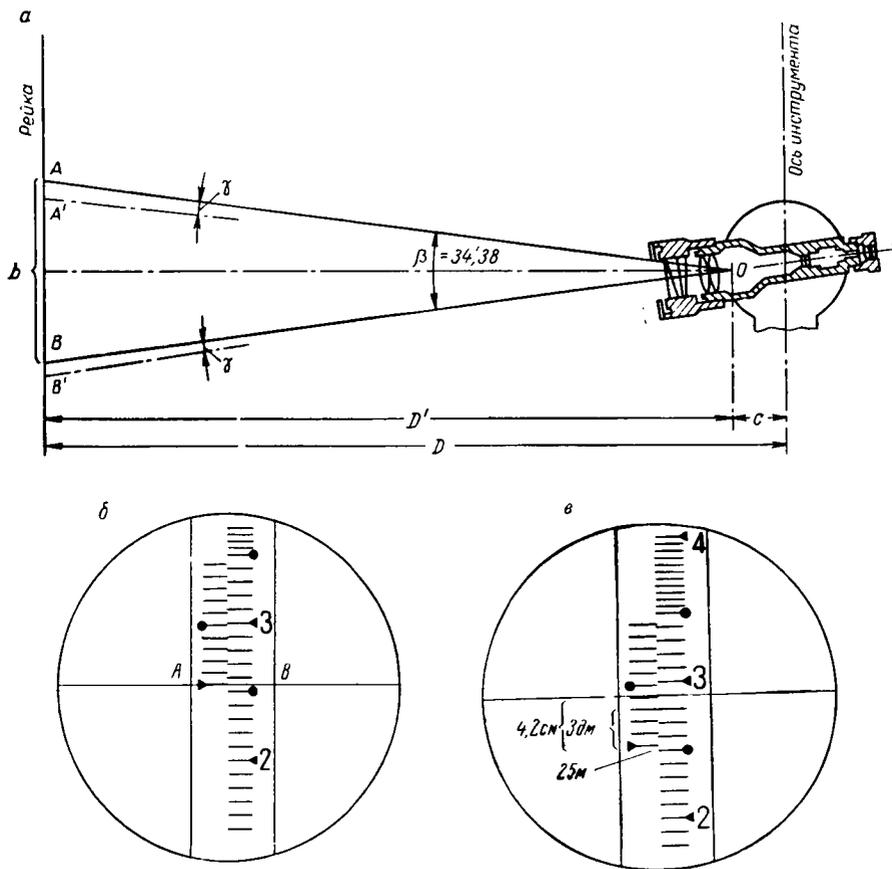


Рис. 103. Схема измерения расстояний дальномерной насадкой ДДЗ и поле зрения трубы:

$$S \text{ равно } 25,342 \times 2 = 50,684 \text{ м}$$

Длина шкалы нониуса рейки, видимая в трубу, определяется по формуле

$$L' = a(n - 1),$$

где a — величина деления рейки;
 n — число делений верньера.

Верньер рейки рассматривается в зрительную трубу через клинья с увеличением v , поэтому его фактическая длина на рейке должна быть равна

$$L = \frac{L'}{v} = \frac{a(n-1)}{v}. \quad (\text{VI,25})$$

В общем случае при отсчитывании расстояний по рейке с помощью нониуса ни один из штрихов его не будет точно совпадать ни с одним штрихом рейки.

Интервал между штрихом нониуса и штрихом шкалы рейки можно определить по формуле (VI,24). Для этого предварительно совмещают эти штрихи поворотом трубы и измеряют величину перемещения нити по шкале нониуса.

Пусть при перемещении нити по рейке на всю длину L шкалы нониуса изображение последнего переместится на величину точности нониуса t , равную

$$t = \frac{a}{n}.$$

Принимая $\Delta = t$, $r = L$ и учитывая уравнение (VI,24), в соответствии с формулой (VI,25) можно написать

$$\frac{a}{n} = \frac{v-1}{v} a(n-1),$$

откуда после несложных преобразований получим

$$v = \frac{n(n-1)}{n(n-1)-1}. \quad (\text{VI,26})$$

Принимая число делений $n = 10$, определяем по формуле (VI,26) увеличение $v = \frac{90}{89}$. Такое увеличение принято в насадке ДДЗ.

Если шкала рейки имеет двухсантиметровые деления, то в соответствии с формулой (VI,25) нониус при $n = 10$ должен иметь длину

$$L = \frac{89}{90} 20(10-1) = 178 \text{ мм.}$$

Повернем трубу так, чтобы нить переместилась на длину нониуса L , и тогда точка A сместится относительно точки B на величину Δ . Смещение Δ определим по формуле (VI,24)

$$\Delta = 178 \left(\frac{90}{89} - 1 \right) = 2 \text{ мм.}$$

В соответствии с этим в комплект дальномерной насадки ДДЗ входят две двусторонние деревянные рейки с натянутыми на них инварными лентами, на которых нанесены шкалы с двухсантиметровыми делениями и шкалы нониуса (рис. 104). Одна сторона рейки оцифрована от 1 до 9, а другая от 2 до 9. Рейки устанавливаются на отделевающей подставке высотой 0,5 м, и каждая из них снабжается двумя подпорками, длины которых регулируются вра-

щением рукояток. Установка реек в вертикальное положение осуществляется при помощи круглых уровней.

Наличие сдвига Δ позволяет совместить в ДДЗ две важные функции: создание постоянного параллактического угла β и измерение величины базиса b (в сто раз более точное, чем при обычном использовании нониуса).

При измерении расстояния трубу наводят на рейку так, чтобы горизонтальная нить совместилась с нулевым штрихом нониуса (см. рис. 103, б), а затем поворачивают ее в вертикальной плоскости до совмещения штриха нониуса со штрихом шкалы рейки (см. рис. 103, в). При этом нужно следить, чтобы нить сетки не вышла за пределы шкалы нониуса.

Отсчет складывается из трех величин:

1. Из числа целых метров, равного числу целых делений, расположенных до нулевого штриха нониуса.

2. Из числа целых дециметров, равного номеру совпавшего штриха нониуса.

3. Из числа сантиметров и их долей, равного числу делений нониуса и их долей от нулевого штриха нониуса до средней горизонтальной нити сетки.

При двухсантиметровой рейке (см. рис. 103, в) берут два отсчета, сумма которых дает измеренное расстояние $D = 25,342 \cdot 2 = 50,684$ м.

В сочетании ДДЗ с теодолитом ТТ-5 постоянное слагаемое $c = 0$ для одной стороны рейки и $c_1 = 11,111$ м для другой стороны.

Расстояние определяется по формуле

$$D = D' + c. \quad (\text{VI}, 27)$$

Приведение коэффициента дальномера к величине $k = 100$ производится в следующем порядке.

1. Измеряют горизонтальный базис длиной около 140 м с относительной ошибкой не более 1 : 7000.

2. Измеряют этот базис дальномером тремя-четырьмя приемами.

3. Если расстояние, определенное дальномером, будет отличаться больше чем на 1 : 5000, то необходима юстировка. Для этого поворачивают оправу с клиньями (см. рис. 101) в вертикальной

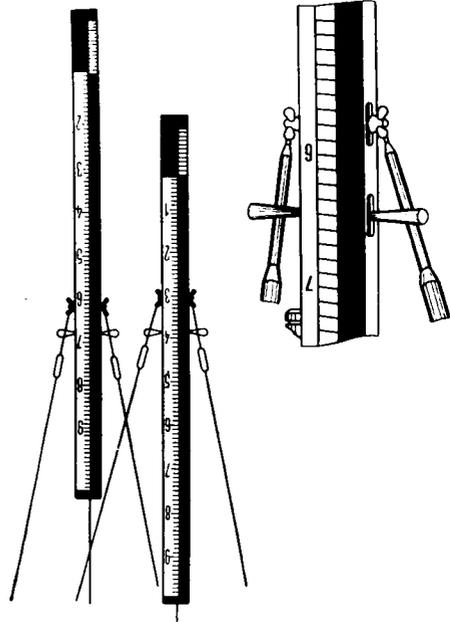


Рис. 104. Рейки дальномерной насадки ДДЗ

плоскости при помощи винтов 5 до тех пор, пока дальномерное расстояние не будет равно длине базиса. Увеличение отсчета по рейке достигается ослаблением нижнего и закреплением верхнего винтов; уменьшение — обратным вращением этих винтов.

Для приведения измеренных дальномером линий к горизонту измеряются вертикальные углы при закрытых шторкой клиньях. Горизонтальное проложение линий вычисляется по формуле

$$d = D \cos (v - 17'),$$

где v — угол наклона измеряемой линии.

При углах наклона $10-20^\circ$ рейку следует устанавливать вертикально по уровню с точностью $\pm 5'$, а при углах $\pm 20-30^\circ$ с точностью $\pm 3'$. При углах наклона более 30° дальномером ДДЗ пользоваться не рекомендуется.

Дифференциальный дальномер ДД5 (ДН-10) является дальномером двойного изображения с постоянным параллактическим углом, создаваемым при помощи линзового компенсатора. Компенсатор вследствие избыточного увеличения одной полуплинзы служит также оптическим микрометром. Насадка ДД5 применяется в сочетании с теодолитом ТОМ и может быть использована с теодолитами,

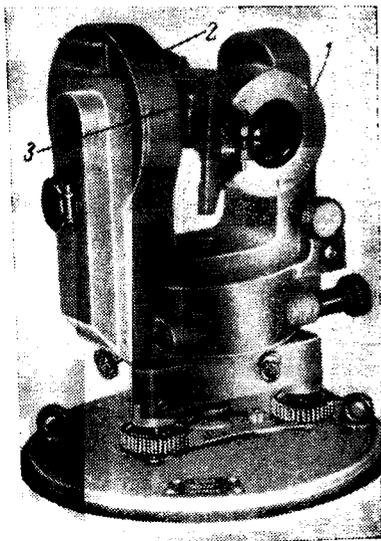


Рис. 105. Дальномерная насадка ДД5 (ДН-10) на теодолите ТОМ

у которых диаметр оправы объектива равен 38 мм. На рис. 105 показаны насадка 1 и противовес 2 на теодолите ТОМ.

Величина образуемого компенсатором параллактического угла $\beta = 17',19$ (рис. 106, а), что соответствует коэффициенту дальномера $k = 200$. Насадка может применяться с вертикально и горизонтально расположенными рейками. При вертикальной рейке зажимной винт 3 (см. рис. 105) должен находиться справа, и его головка направлена вверх. При горизонтально расположенной рейке насадку поворачивают на 90° .

Дальномер ДД5 предназначен для измерения расстояний от 40 до 200 м с относительной средней квадратической ошибкой $1 : 1200$ (при применении вертикальной рейки).

Теория дальномера ДД5 та же, что и дальномера ДДЗ. Отличие состоит в том, что изображения относительно визирной оси трубы в дальномере ДД5 смещаются симметрично.

Величина сдвига изображения нониуса относительно изображения шкалы рейки при поворотах трубы с насадкой в вертикальной плоскости определяется по формуле (VI,24)

$$\Delta = r (v - 1).$$

В комплект дальномера входят две рейки длиной по 1,5 м (рис. 107) с круглыми уровнями. Каждая рейка представляет собой деревянный брус с натянутыми на нем инварными шкалами (по одной с каждой стороны) и нониусами. Расстояния между осями штрихов на одной стороне рейки равны 2 см, а на другой — 5 см.

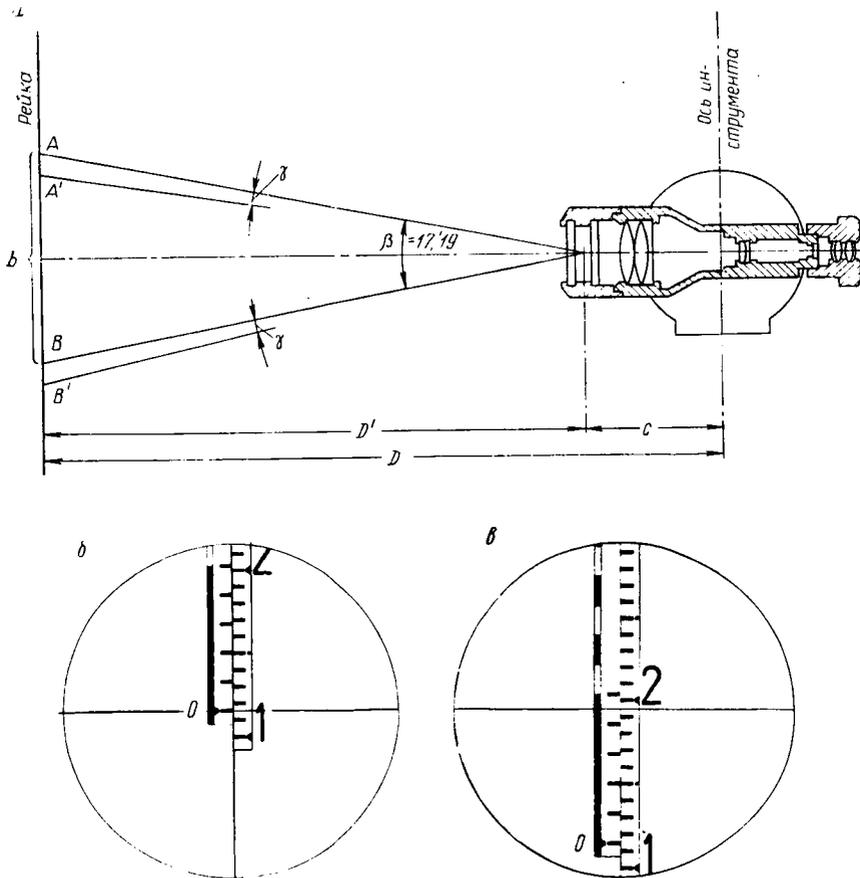


Рис. 106. Схема к определению расстояний насадкой ДД5 и поле зрения трубы

По первой стороне измеряют расстояния от 40 до 130 м, а по второй — от 100 до 200 м. Нониусы на рейках построены так, что их десяти делениям соответствуют восемнадцать делений рейки. Поэтому видимая в зрительную трубу длина нониуса будет вдвое больше, чем в дальномере ДД3, и выразится формулой

$$L' = 2a(n - 1), \quad (\text{VI}, 28)$$

где a — величина деления шкалы рейки;
 n — число делений нониуса.

В соответствии с этой формула (VI,25) принимает вид

$$L = \frac{L'}{v} = \frac{2a(n-1)}{v}. \quad (\text{VI},29)$$

Вычислим увеличение v по формуле (VI,26), учитывая, что число делений нониуса на обеих сторонах рейки равно 10:

$$v_{2,5} = \frac{10(10-1)}{10(10-1)-1} = \frac{90}{89}.$$

Определим длину нониуса для двух- и пятисантиметровой реек по формуле (VI,29):

$$L_2 = \frac{89}{90} \cdot 2 \cdot 20(10-1) = 356 \text{ мм};$$

$$L_5 = \frac{89}{90} \cdot 2 \cdot 50(10-1) = 890 \text{ мм}.$$

Точности нониусов $t = \Delta = L(v-1)$ для двух- и пятисантиметровой реек:

$$t_2 = 356 \left(\frac{90}{89} - 1 \right) = 4 \text{ мм};$$

$$t_5 = 890 \left(\frac{90}{89} - 1 \right) = 10 \text{ мм}.$$

Для того чтобы первая половина изображения удлиненной шкалы нониуса не накладывалась на вторую половину, вторая половина нониуса в виде пяти шапек нанесена на обкладке рейки.

При использовании насадки ДД5 с теодолитом ТОМ постоянное слагаемое дальности для обеих сторон реек равно нулю.

Определение расстояний дальномером ДД5 производится в следующем порядке.

1. Средняя горизонтальная нить сетки нитей трубы наводится на нулевой штрих нониуса рейки (см. рис. 106, б).

2. Поворачивая микрометрический винт, трубу наклоняют до тех пор, пока один из штрихов нониуса не совместится со штрихом шкалы рейки. При этом нужно следить, чтобы средняя нить не выходила за пределы делений и шапек нониуса.

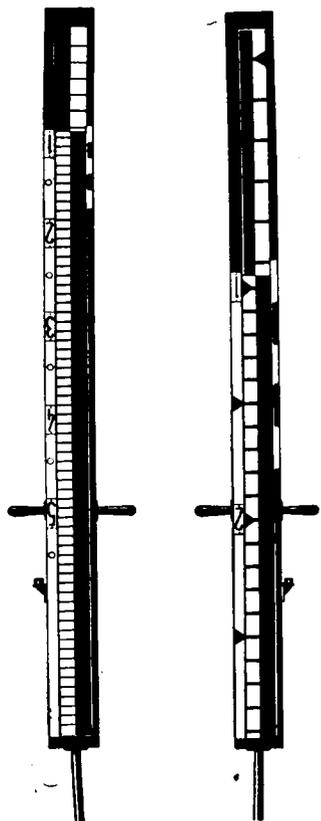


Рис. 107. Рейка к дальномерной насадке ДД5 (ДН-10)

3. Отсчет складывается:

а) при двухсантиметровой рейке (см. рис. 106, в) из:

Числа делений до нуля верньера	11,0
Номера совпавшего штриха нониуса плюс число целых делений нониуса и их долей, пройденных средней нитью сетки от нулевого штриха нониуса при первом совмещении	0,245
То же, при втором совмещении (на рис. 106, в не показано)	0,248
	11,493

Полученный результат следует умножить на 4, так как деления рейки равны 2 см, а коэффициент $k = 200$ — $11,493 \cdot 2 \cdot 2 = 45,972$ м.

б) при пятисантиметровой рейке (используя отсчет рисунка 106, в) из:

Числа делений рейки до нуля верньера	110,0
Номера совпавшего штриха нониуса плюс число делений нониуса и их долей, пройденных горизонтальной нитью при первом совмещении	2,45
То же, при втором совмещении	2,48
	114,93 м

При определении угла наклона для приведения измеряемого расстояния к горизонту средняя нить наводится на совпавший штрих нониуса и угол наклона приводится к биссектрисе параллактического угла. В соответствии с этим горизонтальное проложение вычисляется по формуле

$$d = D \cos (\nu - 8',6).$$

√/ § 58. ДАЛЬНОМЕРЫ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕДУКЦИОННЫЕ

Редукционные дальномеры автоматически приводят отсчеты на рейке к величинам, соответствующим горизонтальному проложению луча визирования. Наиболее удачное и конструктивно простое решение было получено Г. К. Бесчастным, использовавшим для этой цели свободно подвешенный оптический клин. Сущность этого решения заключается в следующем.

Пусть параллактический угол, образованный неподвижным клином B , перекрывающим половину отверстия объектива зрительной трубы A , равен β и отсчет на рейке, соответствующий наклонному расстоянию D , равен n (рис. 108, а). Если между объективом трубы A и постоянным клином B свободно подвесить оптический клин C с преломляющим ребром, обращенным книзу (рис. 108, б), то под действием силы тяжести его ось симметрии совместится с направлением силы тяжести G и составит с плоскостью, нормальной визирной оси зрительной трубы, угол, равный углу наклона ν . При этом клин C

будет отклонять лучи кверху, т. е. уменьшать параллактический угол до величины β_0 .

Можно подобрать такие параметры редуционного клина C , при которых уменьшение параллактического угла $\Delta\beta$ будет приводить отсчет на рейке n к отсчету n_0 , соответствующему горизонтальному расстоянию d .

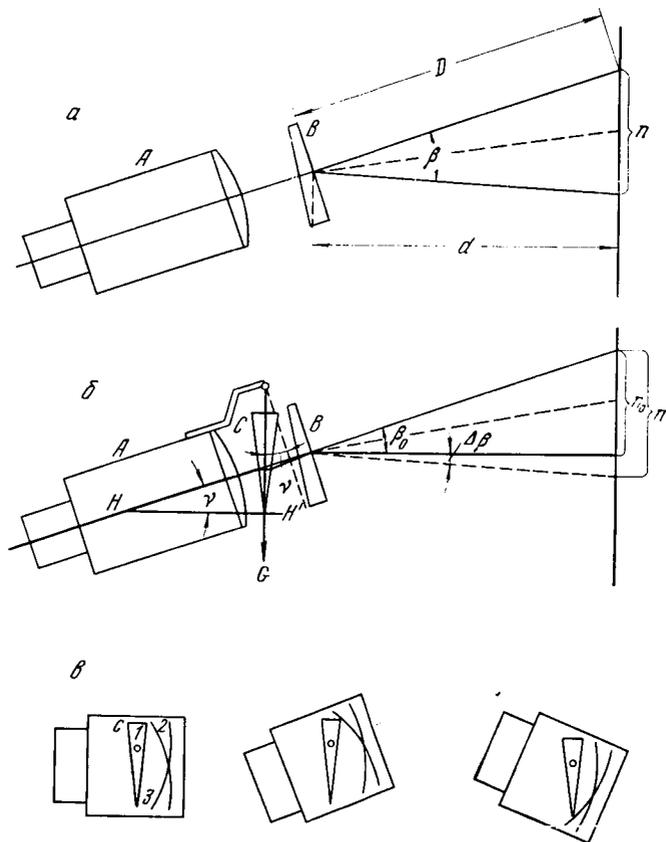


Рис. 108. Схемы работы подвесного клина и компенсирующих пружин:

1 — ось вращения редуционного клина; 2 и 3 — компенсирующие пружины

Исследования показали, что погрешность редуцирования m_3 при увеличении угла наклона $\pm\nu$ при соответствующем выборе параметров редуционного клина не выходит за пределы: 1 : 5000 длины измеряемой линии при $\nu = \pm 11^\circ$; 1 : 2000 при $\nu = \pm 14^\circ$ и 1 : 500 при $\nu = \pm 18^\circ$.

При увеличении углов наклона больше $\pm 14^\circ$ действие редуционного клина становится чрезмерным. Для расширения диапазона

работы редукционного клина до $\pm 21^\circ$ наклоны подвесной системы уменьшают применением специальных плоских пружин, которые постепенно усиливают торможение подвесной системы клина при увеличении углов наклона ν .

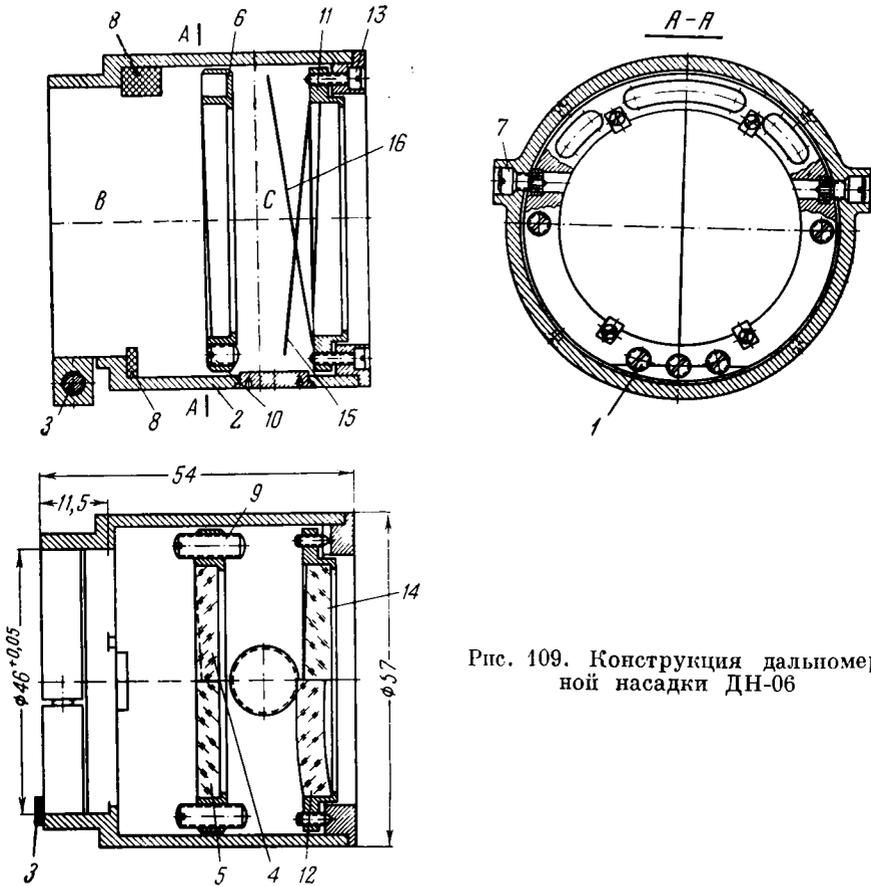


Рис. 109. Конструкция дальномерной насадки ДН-06

На рис. 108, в показаны схемы работы компенсирующих пружин.

Редукционный клин автоматически ликвидирует разномасштабность изображений рейки, даваемую парой клиньев. Для создания оптического микрометра применена афокальная линза 12 (рис. 109), аналогичная примененной в дальномере ДД5. Для увеличения длины шкалы нониуса применен обратный нониус, длина которого равна $n + 1$ делениям рейки, а не $n - 1$.

На основании этих соображений создана дальномерная насадка ДН-06.

Дальномерная насадка ДН-06 позволяет определять горизонтальные проложения расстояний с относительной ошибкой 1 : 1600.

Насадка может применяться с теодолитами, у которых наружный диаметр оправы объектива трубы равен 46 мм. Насадка закрепляется на теодолите винтом 3 (рис. 109). Для уравнивания веса насадки на зрительную трубу со стороны окуляра надевается противовес.

Оптическая система насадки (рис. 109) состоит из двух ахроматических клиньев 4 и 14, перекрывающих левую (со стороны окуляра) часть объектива зрительной трубы;

плоско-параллельной пластинки 5, перекрывающей правую половину отверстия объектива и укрепленной в общей оправе с клином 4, и афокальной линзы 12, укрепленной в одной оправе 11 с оптическим клином 14 и служащей оптическим микрометром.

Рис. 110. Рейки к дальномерной насадке ДН-06 и поле зрения трубы

Редукционный клин 4 заключен в оправу — маятник 6, подвешенную на двух шарикоподшипниковых опорах 7, и может поворачиваться в корпусе насадки на угол $\pm 21^\circ$. Балансировка оправы клина осуществляется винтами 1. Ограничителями служат поропластиковые подушки 8. Оправа — маятник делит пространство в корпусе насадки на две камеры В и С, соединяющиеся узким кольцевым зазором (шириной около 0,5 мм) между оправой 6 и корпусом насадки 2. Движение воздуха через этот зазор при наклонах насадки способствует демпфированию колебаний качающейся оправы. Винты 9 и 10 служат для придания редукционному клину необходимого положения относительно отвесной линии.

Приведение коэффициента дальномера к значению $k = 100$ достигается поворотом винтов 13. Компенсация чрезмерного редуцирования осуществляется пружинами 15 и 16.

Дальномерная рейка длиной 2,15 м имеет шкалы с двух сторон. Цена деления с одной стороны рейки 2 см, а с другой 3 см. Нониус на рейке обратный — десяти делениям нониуса соответствует одиннадцать делений рейки (рис. 110, а).

Принцип отсчитывания расстояний тот же, что в дальномерах ДДЗ и ДД5 (рис. 110, б).

1. Насадку укрепляют на трубе теодолита так, чтобы изображения концов штрихов рейки и нониуса соприкасались.

2. Поворачивая трубу в вертикальной плоскости, совмещают штрих нониуса со штрихом шкалы рейки так, чтобы средняя нить сетки не вышла за пределы шкалы нониуса.

3. Отсчет складывается из:

Числа полных делений рейки, пройденных нулем нониуса	72,0
Числа делений нониуса между нулевым и совмещенным штрихам	0,4
Числа делений нониуса, пройденных от нулевого штриха средней нитью сетки	0,074

Полный отсчет равен: $72,0 + 0,4 + 0,074 = 72,474$.

Отсчет повторяют после нового совмещения штрихов. Сумма двух отсчетов при двухсантиметровой рейке дает горизонтальное проложение линии $72,474 \cdot 2 = 144,948$ м.

5. По второй стороне рейки делают три совмещения штрихов и берут три отсчета. Затем суммируют их и вычисляют горизонтальное проложение.

Приведение коэффициента дальномера к 100 выполняется так же, как и в дальномере ДДЗ.

§ 59. ДАЛЬНОМЕРЫ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ БАЗИСОМ ПРИ ИНСТРУМЕНТЕ

Дальномеры с постоянным углом и переменным базисом в приборе работают по схемам, показанным на рис. 111.

Расстояние до точки местности *A* определяется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} D' &= b \operatorname{ctg} \beta; \\ D' &= \frac{b_1}{2} \operatorname{ctg} \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI}, 30)$$

Коэффициент дальномера $k = \operatorname{ctg} \beta$ может иметь значения 50, 100, 200, 300, 500 и 1000. Базис дальномера обычно не превышает 800 мм. Постоянный параллактический угол создается при помощи оптических клиньев. Обычно к дальномеру прилагается набор оптических клиньев с различными коэффициентами k .

На рис. 111, *a* мы имеем дальномер с одной подвижной призмой 3 — «концевым отражателем» и одной неподвижной призмой 2; на рис. 111, *б* — дальномер с двумя подвижными призмами 8 и 9 и двумя неподвижными призмами 10 и 11.

Для концевых отражателей рекомендуется применять пентапризмы, так как их повороты при движении по базисной линейке мало влияют на величину параллактического угла.

Разделение двойных изображений в дальномерах такого типа производят обычно при помощи бипризм 4 и 12 и щелевых диафрагм 5 и 13.

В первой схеме (рис. 111, *a*) клин 1 перекрывает одну половину объектива (например, верхнюю), а пентапризма 2 — вторую

половину (нижнюю). Верхняя половина объектива при помощи клина *1* строит одно изображение предмета в поле зрения трубы; нижняя половина объектива при помощи призм *2* и *3* — второе. Эти изображения будут совмещены в том случае, если лучи, идущие от клина *1* и призмы *3*, пересекутся в точке *A*. Совмещение этих изображений достигается перемещением призмы *3* вдоль базисной линейки. После установки базиса равным *b* расстояние *D'* определится по первой формуле (VI,30).

Во второй схеме (рис. 111, б) клин *6*, призмы *8* и *10* соответствуют по высоте верхней половине объектива зрительной трубы, а клин *7*,

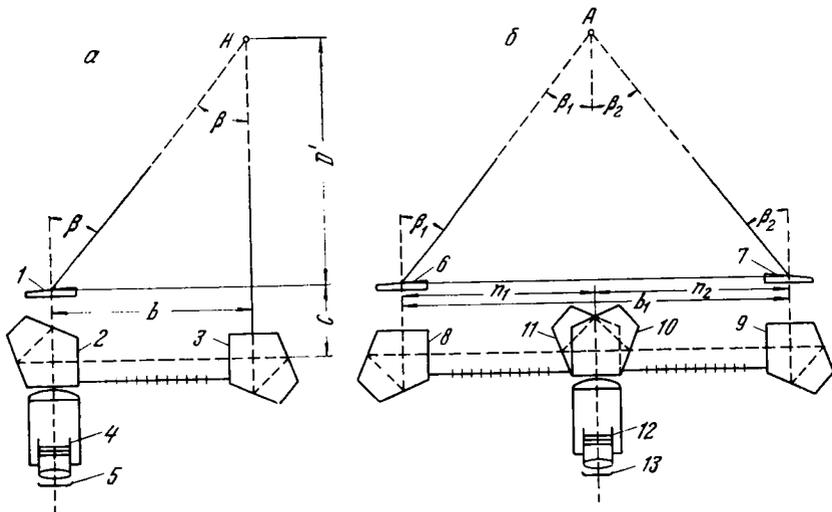


Рис. 111. Схема работы дальномеров с базисом при инструменте

призмы *9* и *11* — нижней половине объектива зрительной трубы. Они строят два изображения точки *A* в поле зрения трубы. Визирные оси пересекутся в точке *A* тогда, когда призмы *8* и *9* окажутся на расстоянии $b_1 = n_1 + n_2$ одна от другой. В этом случае два изображения точки *A* совместятся и расстояние *D'* будет определяться по второй формуле (VI,30).

Расстояние от оси вращения дальмера до точки местности определится соответственно по формулам:

$$D = bk + c;$$

$$D = b_1 k_1 + c_1. \quad (\text{VI,31})$$

Горизонтальные проложения с учетом поправки за температуру вычисляются по формуле

$$d = bk + c - \Delta D_v + \Delta D_t, \quad (\text{VI,32})$$

где $\Delta D_v = 2D \sin^2 \frac{\nu}{2}$ — поправка за наклон;

ΔD_t — поправка за температуру. Поправка за температуру выбирается из таблиц, прилагаемых к прибору.

К дальномерам этого типа относятся отечественные инструменты ДВ-20 и Д1М.

Дальномер **внутрибазный** ДВ-20 (рис. 112) представляет собой прибор типа простого теодолита с лимбом, жестко скрепленным с подставкой — треножником 1, в котором вращается алидадная

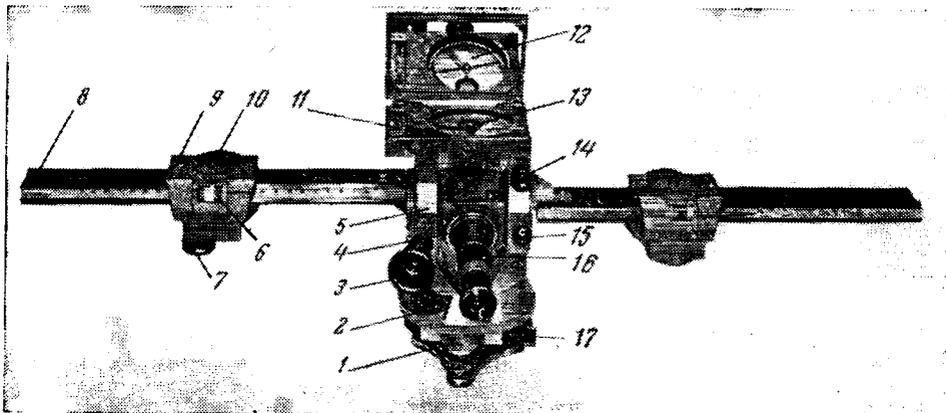


Рис. 112. Дальномер ДВ-20

часть, имеющая закрепительный и микрометрический 17 винты. Цена деления лимба 1° . Отсчеты производятся по индексу алидады с оценкой на глаз до $0^\circ,1$ через окошко в кожухе 2. В подставках алидады вращается горизонтальная ось зрительной трубы 4, на которой укреплены вертикальный круг 5 и базисные линейки 8. Вдоль базисных линеек могут перемещаться каретки 9, в которых закреплены оптические клинья и пентапризмы. На базисных линейках нанесены шкалы, а на каретках имеются индексы, по которым через лупы 6 можно делать отсчеты с точностью $\pm 0,1$ мм. Цена деления шкал 1 мм. Общая длина базисных линеек 600 мм. Зрительная труба с внутренней фокусировкой, осуществляемой при помощи кольца 16, имеет зажимной 15 и наводящий 14 винты. Дальномер снабжен круглым уровнем 13, видимым в зеркало 12 буссоли, — для предварительной установки и цилиндрическим уровнем 11 — для точной установки прибора. Вертикальный круг имеет шкалу с ценой деления $10'$, по которой берутся отсчеты при помощи микроскопа-оценщика 3 с точностью $\pm 1'$. Вместо сетки нитей в зрительной трубе установлена бипризма.

Ребро бипризмы является горизонтальной нитью, а для измерения горизонтальных углов на ее грани нанесен вертикальный штрих.

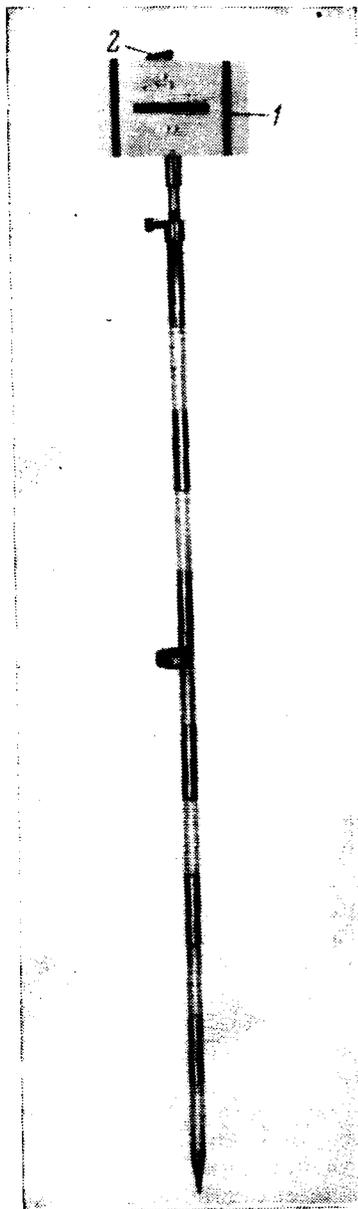


Рис. 113. Дальномерная марка

Дальномер ДВ-20 приспособлен для работы с тремя коэффициентами: 100, 200 и 500. Коэффициент дальномера 100 и 200 устанавливается поворотами клиньев при вращении оправ *10*, на которых нанесены деления с цифрами 1 и 2, соответствующими коэффициентам 100 и 200. Оправы поворачивают до совмещения цифры 1 и 2 с красной точкой, нанесенной на корпусе каретки. Чтобы устранить двоение изображений по высоте, используют барабанчик, 7.

Коэффициент 500 получают, устанавливая на правую каретку насадку с дополнительным оптическим клином. В этом случае на обеих каретках должен быть установлен коэффициент дальномера $k_2 = 200$.

Для увеличения диапазона измеряемых расстояний к дальномеру ДВ-20 прилагается веха (рис. 113) с маркой в виде пластины *1*, окрашенной в желтый цвет, с двумя вертикальными и одним горизонтальным черными штрихами. Расстояние между осями вертикальных штрихов равно 150 мм и является дополнительным базисом дальномера.

Марка снабжена оптическим визиром 2, при помощи которого плоскость марки устанавливается перпендикулярно линии визирования дальномера. Высоту марки можно менять, раздвигая веху.

Рассмотрим порядок измерения расстояний дальномером ДВ-20.

Без применения марки.

Коэффициент дальномера устанавливают в зависимости от измеряемого расстояния:

от 17 до 60 м	$k_1 = 100$
от 60 до 120 м	$k_2 = 200$
от 120 до 300 м	$k_5 = 500$

Трубу дальномера наводят на предмет местности или на веху. Затем,

перемещая левую и правую каретки, совмещают два полуизображения предмета. При этом отсчеты по левой и правой базисным линейкам должны быть приблизительно равны. Полуизображения по высоте совмещают винтом 7. После этого по базисным линейкам делают отсчеты n_1 и n_2 , сумма которых $n_1 + n_2 = b$ дает расстояние в метрах при коэффициенте $k_1 = 100$. При коэффициентах 200 и 500 сумма $n_1 + n_2$ умножается соответственно на 2 и 5.

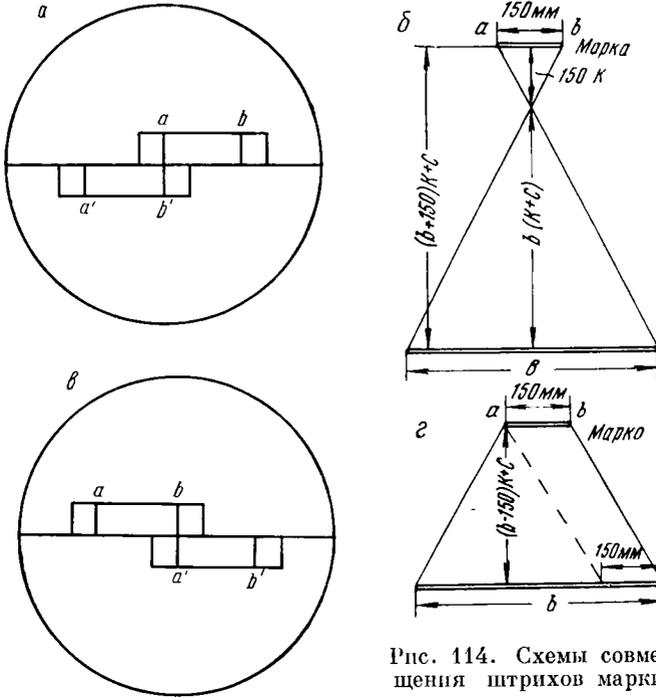


Рис. 114. Схемы совмещения штрихов марки

В дальномере ДВ-20 при коэффициенте 200 постоянное слагаемое $c_{200} = 0$. Для коэффициентов 100 и 500 постоянные слагаемые равны соответственно $c_{100} = +0,012$ м; $c_{500} = -0,037$ м.

С применением марки.

В зависимости от измеряемого расстояния устанавливают коэффициент дальномера:

от 2 до 75 м	$k_1 = 100$
от 75 до 150 м	$k_2 = 200$
от 150 до 375 м	$k_5 = 500$

Наводят трубу на марку. Совмещение полуизображений марки может производиться по двум схемам:

а) правый штрих нижнего полуизображения совмещается с левым штрихом верхнего полуизображения (рис. 114, а и б).

Расстояние вычисляется по формуле

$$d = (b + 150)k + c - \Delta D_v + \Delta D_t; \quad (\text{VI},33)$$

б) левый штрих нижнего полуизображения совмещается с правым штрихом верхнего полуизображения (рис. 114, в и г). Расстояние вычисляется по формуле

$$d = (b - 150)k + c - \Delta D_v + \Delta D_t. \quad (\text{VI},34)$$

Вторая схема применяется для измерения расстояний короче 17 м.

При измерении горизонтальных и вертикальных углов совмещают полуизображения предмета по горизонтали и вертикали и с сеткой нитей. После этого производят отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам.

Относительные ошибки измерения расстояний дальномером ДВ-20: до 120 м — 1 : 500; до 300 м — 1 : 300.

Дальномер Д1М для съемки подземных камер. Дальномер работает по схеме, показанной на рис. 111, а. Он предназначен для съемки подземных камер при расстояниях от 2 до 60 м. Дальномер снабжен сменными оптическими клиньями с коэффициентами 50, 100, 200, 500 и 1000, что при базисе 300 мм позволяет измерять расстояния до 300 м.

Относительная ошибка измерения расстояния от 2 до 60 м составляет 1 : 200—1 : 100.

На рис. 115 приведена оптическая схема дальномера. Параллактический угол образован двумя оптическими клиньями 1, установленными перед объективом зрительной трубы. Лучи, идущие от точки А, проходят клинья 1, пентапризму 2, прямоугольную призму 3 и попадают в объектив 4. При этом клинья 1 и пентапризма перекрывают только верхнюю половину объектива. Лучи, идущие от точки А через подвижную пентапризму 8, попадают через призму 3 в нижнюю половину объектива. Далее оба пучка лучей проходят фокусирующую линзу 5, бипризму 6, окуляр 7 и щелевую диафрагму. Полученные в поле зрения окуляра 7 два полуизображения совмещаются перемещением пентапризмы 8 вдоль базисной линейки 9. Для работы в затемненных подземных камерах дальномер снабжен специальной системой, проектирующей светящуюся точку — марку на внутреннюю поверхность выработки. Проектирующая система состоит из перемещающегося объектива 10 и лампочки накаливания 11.

Расстояние до точки А определяется по формуле

$$D = b \operatorname{ctg} \beta + c.$$

В дальномере Д1М постоянное слагаемое $c = 3,5$ см.

Лимб 1 дальномера (рис. 116) жестко скреплен с треножником-подставкой 2. Деления шкалы лимба нанесены через 1° , отсчет производится по индексу 3 через лупу 4 с оценкой на глаз до $\pm 0^\circ, 1$. Дальномер закрепляется относительно вертикальной оси при помощи

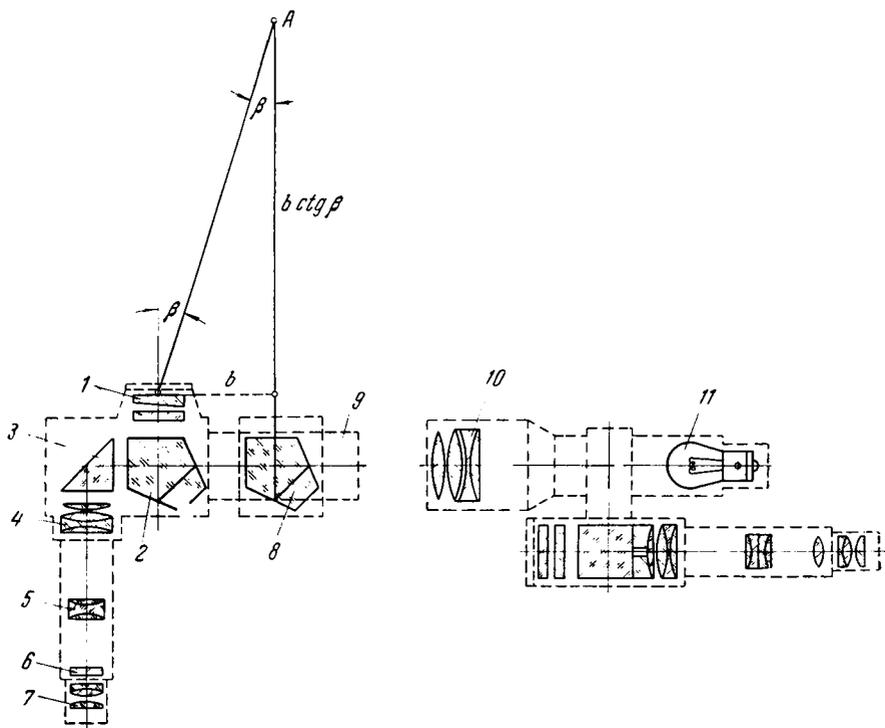


Рис. 115. Оптическая схема дальномера Д1М

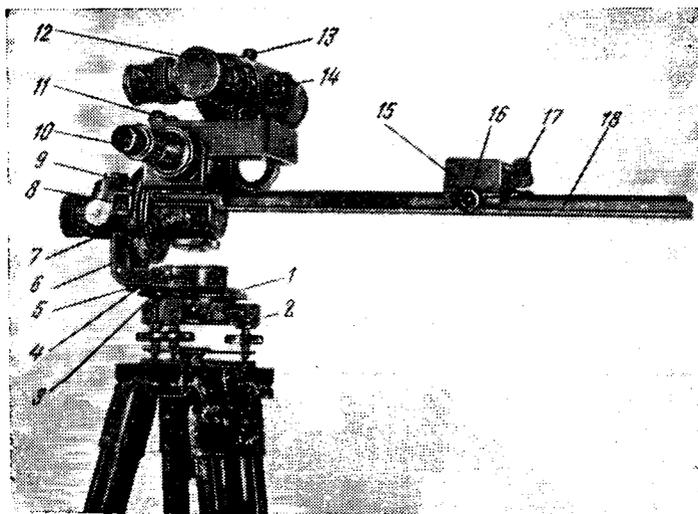


Рис. 116. Дальномер Д1М

Таблица 12

Обозначение дальномера	Обозначение дальномера		Конструкция дальномера	Последний диаметр насадки, мм	Величина горизонталь- ного зазора, мм	Длина вертикальной рейки (цена деления)	Диапазон работы дальномера		Коэффициент дальномера	Ошибка определе- ния расстояния на 100 м длины, , см		Вес прибора, кг	Вес рейки, кг	Где изготовляется
	новое в сост- влении с ГОСТом	старое					по расстоя- нию, м	по углу наклона, град		горизон- тальная рейка	вертикаль- ная рейка			
ДН-02	ОГД		Самостоятель- ный прибор	—	2000 (400 · 5)	2000 мм (400 · 5)	40—400	±30	—	±2	±3	3,20	3,2	СССР
ДН-04	ДДЗ		Насадка	46	—	2,0 м (2 и 5 см)	20—180	±30	100	±4	±5	0,17	4,8	СССР
ДН-06, ДНР-06	ДАР-100		Насадка	46	—	2,15 м (2 и 3 см)	10—200	±21	100	—	±5	0,12	3,5	СССР
ДН-10	ДД5		Насадка	38	—	1,5 м (2 и 5 см)	20—160	±30	200	—	±10	0,06	2,9	СССР
ДВ-20	ДВГ		Самостоятель- ный прибор	—	600	—	2—375	±20	100, 200, 500	1 : 100— 1 : 200	—	4,20	—	СССР
ДМ	—		»	—	300	—	2—60	±70	50, 100, 200, 500, 1000	1 : 100— 1 : 200	—	8,0	—	СССР

винта 5. На кронштейне 6 вращается горизонтальная ось, на одном конце которой укреплены вертикальный лимб 7 и круглый уровень 9, а на другом — базисная линейка 18. Цена деления шкалы вертикального круга равна 1° , отсчет производится по индексу до $\pm 0,1$ через лупу 8. Конструкция дальномера допускает определение углов наклона до $\pm 70^\circ$. Фокусировка зрительной трубы осуществляется кольцом 10. Проектирующее устройство 12 размещается над зрительной трубой, фокусируется оно винтом 14. Винты 11 и 13 позволяют поворачивать трубу проектора в некоторых пределах в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Вдоль базисной линейки 18 может перемещаться каретка 15 с пентапризмой. Помимо грубого перемещения каретки возможно ее микрометрическое движение при помощи винта 16. Цена деления шкалы базисной линейки равна 1 мм, отсчет производится по индексу с точностью до $\pm 0,1$ мм при помощи лупы 17.

В табл. 12 приведена техническая характеристика оптических дальномеров.

ГЛАВА VII

ТЕОДОЛИТЫ

§ 60. НОВЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ «ТЕОДОЛИТЫ»

Государственный стандарт (СССР) ГОСТ 10529—63 «Теодолиты», утвержденный в 1963 г., санкционирует с 1/1 1965 г. выпуск следующих типов теодолитов, которые объединяются в четыре группы.

I группа: теодолиты высокоточные оптические, предназначенные для триангуляции и полигонометрии 1 и 2-го классов, позволяющие вести измерение горизонтальных углов со средней квадратической ошибкой $\pm 0",5$ и $\pm 1"$. Теодолиты этой группы обозначаются Т05 и Т1.

II группа: теодолиты оптические, предназначенные для триангуляции и полигонометрии 3 и 4-го классов, позволяющие вести измерение горизонтальных углов со средними квадратическими ошибками $\pm 2"$. Теодолиты имеют обозначение Т2.

III группа: теодолиты точные оптические, предназначенные для аналитических сетей и полигонометрии 1 и 2-го разрядов, позволяющие вести измерение горизонтальных углов со средними квадратическими ошибками $\pm 5"$ и $\pm 10"$. Обозначаются эти теодолиты соответственно Т5 и Т10.

IV группа: теодолиты технической точности (оптические), предназначаются для теодолитных и тахеометрических ходов, маркшейдерских работ на поверхности и под землей, позволяющие вести измерение горизонтальных углов со средними квадратическими ошибками ± 15 , ± 20 и $\pm 30"$. Эти теодолиты имеют обозначения Т15, Т20 и Т30.

В настоящее время в СССР разработаны все предусмотренные ГОСТом теодолиты и осваивается их серийное изготовление.

§ 61. ТЕОДОЛИТЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИЕ

Теодолиты этой группы имеют наиболее широкое применение в народном хозяйстве. Они подразделяются на две группы: используемые на земной поверхности и горные теодолиты. Рассмотрим

следующие теодолиты этого класса точности: ТОМ, Т30, Т20, ОМТ-30, Theo-120 и ТЕ-Е4.

Малый оптический теодолит ТОМ предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов и расстояний. Расстояния измеряются при помощи нитяного дальномера или дальномерной насадки ДД5 (ДН-10). Наличие на зрительной трубе цилиндрического уровня 10 (рис. 117) с ценой деления 30" позволяет использовать этот теодолит для нивелирования горизонтальным лучом.

Система вертикальных осей теодолита ТОМ коническая повторительная. Микрометренное вращение лимба производится винтом 6. Основные узлы теодолита защищены от механических повреждений и от непосредственного попадания пыли и воды.

Основание 5 теодолита служит одновременно дном футляра, что не только снижает вес, но и создает удобства при перенесении теодолита с точки на точку закрепленным на штативе и закрытым футляром.

Закрепление зрительной трубы осуществляется поворотом рычажка 9 вниз. Микрометренное вращение трубы производится наводящим винтом 8. Микрометренного винта при алидаде вертикального круга нет. Нет и уровня при алидаде вертикального круга, его заменяет уровень 7 при подставке трубы, расположенной параллельно коллимационной плоскости зрительной трубы.

Поэтому определение места нуля (MO) вертикального круга и приведение его к нулю в теодолите ТОМ производится в следующем порядке.

MO вычисляется по формуле

$$MO = \frac{KP + KL + 180^\circ}{2}. \quad (VII,1)$$

К каждому отсчету KP или KL , если он меньше 90° , необходимо прибавить 360° , прежде чем подставить его в формулу (VII,1).

При исправлении MO на вертикальном круге устанавливают отсчет, равный $KL - MO$. Вертикальными исправительными винтами сетки нитей совмещают крест нитей с изображением наблюдаемой точки. При выполнении этих действий нужно следить, чтобы пузырек уровня 7 при алидаде горизонтального круга был на середине ампулы.

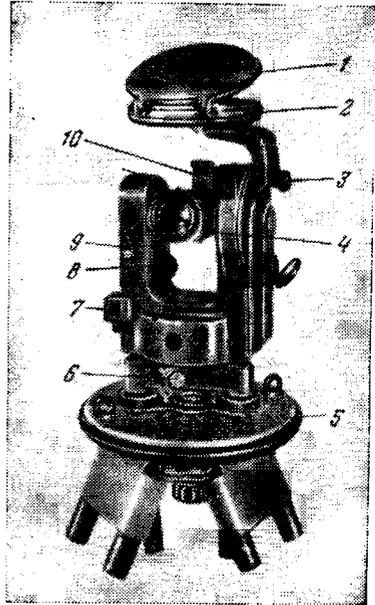


Рис. 117. Теодолит ТОМ

Отсчетным устройством является микроскоп-оценщик, поле зрения которого показано на рис. 72. Оптическая схема теодолита ТОМ приведена на рис. 71 и описана в § 49.

Зрительная труба теодолита ТОМ представляет собой линзовую телескопическую систему с внутренней фокусировкой и состоит из трехлинзового объектива 15 (см. рис. 71), двухкомпонентной фокусирующей линзы 16, сетки нитей 17 и симметричного окуляра 18. Фокусировка трубы осуществляется вращением кольца 4 (см. рис. 117) кремальеры.

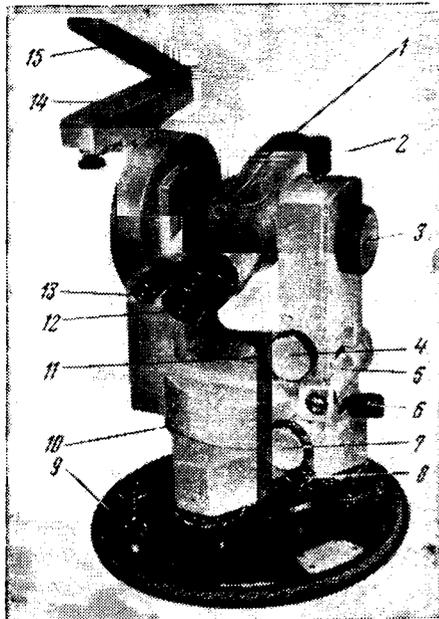


Рис. 118. Теодолит Т30

Система вертикальных осей повторительная цилиндрическая. На рис. 118 видны зажимные винты лимба 8, алидады 6 и трубы 2 и соответствующие им микрометрические винты лимба 10 (виден торец пружины микрометрического винта лимба), алидады горизонтального круга 7 и зрительной трубы 4.

Зрительная труба с внутренней фокусировкой, осуществляемой барабаном-кремальерой 3, состоит из трехлинзового объектива, фокусирующей линзы и симметричного окуляра. Основание теодолита 9 представляет собой дно металлического футляра (колпака).

Для центрирования теодолита над точкой можно использовать зрительную трубу, которую устанавливают вертикально объективом вниз и визируют на точку стояния через отверстие 11 в вертикальной оси. Окуляр отсчетного микроскопа-оценщика 13 расположен рядом с окуляром зрительной трубы 12. Так же как и теодолит ТОМ,

Теодолит ТОМ имеет азимутальную буссоль 2, укрепляемую на подставке трубой винтом 3. Буссоль снабжена зеркалом 1 для удобства ориентирования. В комплект теодолита также входит призмная насадка для визирования при больших углах наклона. Насадка надевается на окуляры зрительной трубы и отсчетного микроскопа.

Малогабаритный оптический теодолит Т30 предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов со средними квадратическими ошибками, не превышающими $\pm 30''$. Его можно использовать для определения магнитных азимутов и нивелирования горизонтальным лучом. Теодолит приспособлен для работы с оптической дальномерной насадкой ДН-10 (ДД5).

теодолит Т30 не имеет микрометричного винта алидады вертикального круга и уровня алидады вертикального круга. Последний заменен уровнем 5 алидады горизонтального круга. Поэтому порядок определения и исправления *МО* тот же, что и для теодолита ТОМ.

Зрительная труба снизу и сверху снабжена оптическими визирами 1.

Оптическая схема теодолита Т30 аналогична оптической схеме теодолита ТОМ (см. рис. 74).

Теодолит комплектуется ориентир-буссолью 14 с зеркалом 15 (см. рис. 118) и уровнем для зрительной трубы, позволяющим вести нивелирование горизонтальным лучом.

Горный оптический теодолит Т20 предназначен для маркшейдерских работ в подземных выработках и на поверхности. Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтальных углов $\pm 20''$ (рис. 119). Теодолит может быть установлен на штативе, закреплен на консоли или подвешен на ней. Теодолит Т20 приспособлен для работы с дальномерной насадкой ДН-10. Уровень при зрительной трубе позволяет вести нивелирование горизонтальным лучом.

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная (см. § 34 и рис. 39).

На штативе теодолит устанавливается на специальную нивелирующую головку. В рабочее положение приводится при помощи двух винтов 8 и 9 и противодействующих им пружин 11, расположенных в корпусе 10 нивелирующего устройства под прямым углом одна к другой. Теодолит может наклоняться этим устройством в пределах $\pm 5^\circ$.

Теодолит имеет микрометрично-зажимные устройства алидады горизонтального круга и зрительной трубы, включающие зажимные винты 6 и 2 и соответствующие им микрометричные винты 7 и 3.

Совместное вращение алидады с лимбом возможно при включении клеммы рычажком 12, поворотом которого втулка лимба скрепляется с алидадной частью теодолита. Алидада вертикального круга

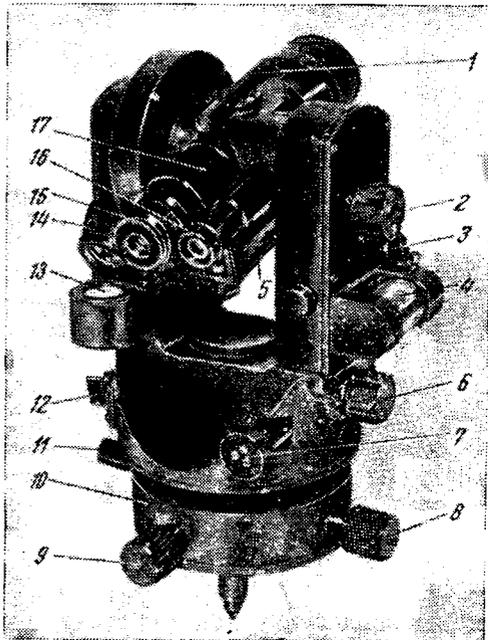


Рис. 119. Теодолит Т20

не имеет микрометричного винта и уровня (так же, как и в теодолитах ТОМ и Т30).

Для приведения оси инструмента в вертикальное положение служат круглый 13 и двусторонний цилиндрический 4 уровни. Зрительная труба с внутренней фокусировкой состоит из двухлинзового объектива, двухкомпонентной фокусирующей линзы и симметричного окуляра 15. Фокусировка трубы осуществляется вращением кольца 17. С одной стороны трубы укреплен двусторонний уровень 5, с другой — оптический визир 1.

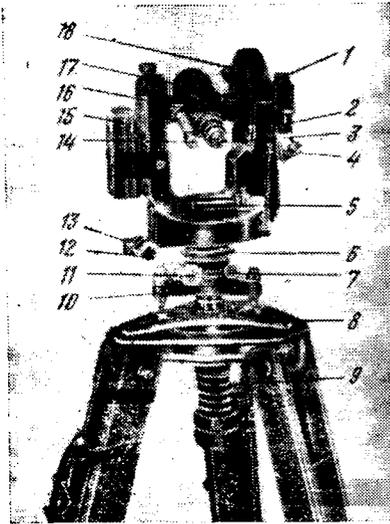


Рис. 120. Теодолит ОМТ-30

Отсчетное устройство — шкаловый микроскоп. Его окуляр 16 расположен рядом с окуляром зрительной трубы 15. Для удобства отсчитывания в обычном и подвешенном положениях шкалы лимбов и микроскопа имеют двойную цифровку (см. рис. 75, а). Шкалы кругов освещаются зеркалом 14.

Оптическая схема теодолита Т20 приведена на рис. 73 и описана в § 50. В комплект теодолита Т20 входит набор консолей и приспособлений для центрирования.

Оптический маркшейдерский теодолит ОМТ-30 предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов со средней квадратической ошибкой $\pm 15''$. Он приспособлен для работы как на земной поверхности, так и в подземных горных выработках. Теодолит

имеет подсветку кругов при помощи лампочки накаливания, заключенной во взрывобезопасный корпус 2, и батарейки, расположенной в корпусе 15 (рис. 120). Лампочка включается во время взятия отсчета поворотом ручки 1.

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная. Втулка горизонтального круга надевается на ось алидады, которая вращается во втулке подставки. Это обеспечивает хорошую центрировку лимба. Лимб может переставляться. Для этого при открепленных зажимных винтах лимба 7 и алидады 13 нужно вращать кольцо с накаткой 6. Микрометричное движение лимба и алидады осуществляется винтами 11 и 12. На алидаде установлены два цилиндрических уровня 5 и 18 с ценой деления $2'$, служащие для предварительной установки инструмента в рабочее положение. Подставка теодолита 10 устанавливается на пластину 8 и закрепляется на штативе становым винтом 9.

Особенностью теодолита ОМТ-30 является наличие в нем компенсатора места нуля. Компенсатор повышает скорость отсчитывания

по вертикальному кругу, так как отпадает необходимость выводить пузырек на середину ампулы, и исключает ошибки за неточную установку пузырька уровня.

Компенсатором является вторая компонента объектива отсчетной системы вертикального круга, установленная в параллельном пучке лучей первой компоненты. Вторая компонента подвешена на четырех металлических нитях и при небольших наклонах оси

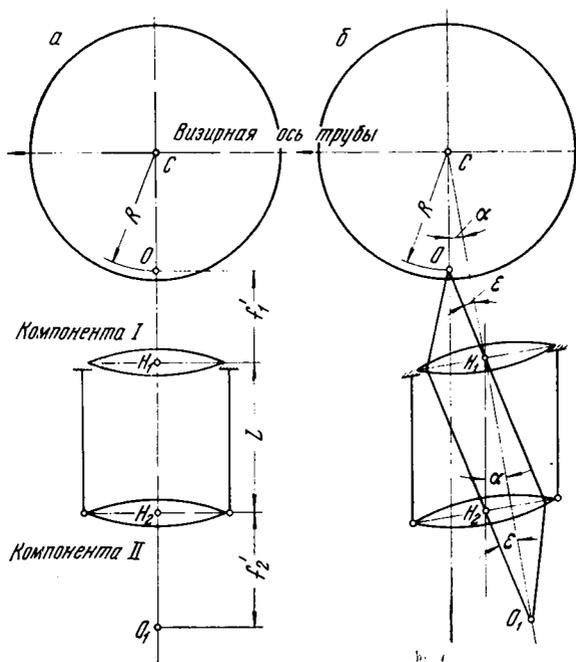


Рис. 121. Схема работы компенсатора места нуля теодолита ОМТ-30

вращения теодолита ее оптический центр H_2 оказывается на отвесной линии, проходящей через оптический центр H_1 первой компоненты (рис. 121).

На рис. 121, а показано положение, когда визирная ось зрительной трубы горизонтальна и ось теодолита отвесна. В этом случае нуль лимба O вертикального круга проектируется компонентами I и II в нуль отсчетной шкалы O_1 .

Если ось вращения теодолита CO_1 наклонить на угол α (рис. 121, б), то оптический центр H_2 компоненты II под действием силы тяжести расположится на отвесной линии, проходящей через оптический центр H_1 первой компоненты. Пусть при этом визирная ось зрительной трубы занимает горизонтальное положение.

Анализ рис. 121, б показывает, что компенсация возможна при условии подобия треугольников COH_1 и $H_1H_2O_1$. Это равносильно следующему соотношению:

$$L = R \frac{f'_2}{f_1}, \quad (\text{VII},2)$$

где L — длина нитей подвески;

R — рабочий радиус лимба вертикального круга;

f_1 — фокусное расстояние первой компоненты;

f'_2 — фокусное расстояние второй компоненты.

В теодолите ОМТ-30 компенсатор работает в пределах изменения угла наклона $\pm 2'$ и обеспечивает точность компенсации места нуля $\pm 5''$.

Наличие компенсатора позволяет производить нивелирование горизонтальным лучом.

Отсчетным устройством в теодолите является шкаловый микроскоп, окуляр 14 которого расположен рядом с окуляром 3 зрительной трубы. Круги подсвечиваются зеркалом 4 (см. рис. 120).

На рис. 122 показана оптическая схема теодолита. Лучи света, отразившись от зеркала 1 и пройдя иллюминатор 2, освещают штрихи лимба 3. При помощи призмы 4 объектив 5—6 строит изображение штрихов вертикального круга в плоскости штрихов горизонтального лимба 9.

Объектив 7, 8 с помощью призмы 10 строит изображение штрихов вертикального и горизонтального кругов на пластинке 11, на которой нанесены отсчетные шкалы,

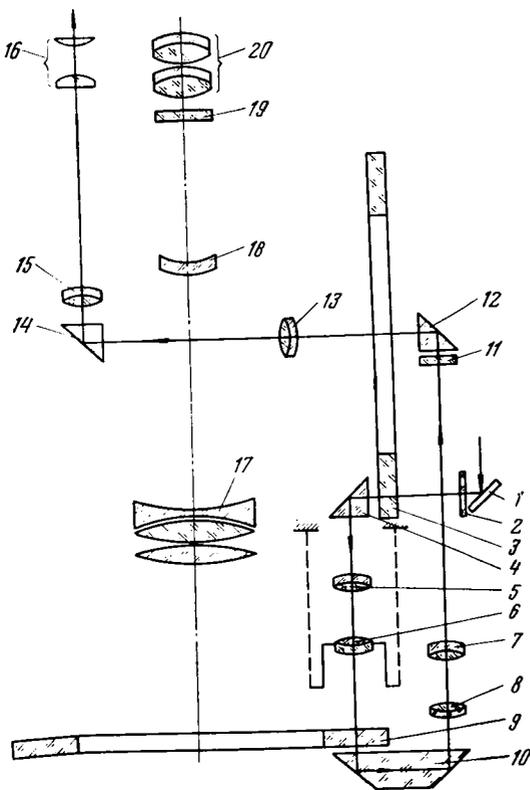


Рис. 122. Оптическая схема теодолита ОМТ-30

имеющие по 60 делений. Далее при помощи призм 12 и 14 объективы 13 и 15 передают изображения штрихов кругов и отсчетных шкал в поле зрения окуляра 16.

На вертикальном и горизонтальном лимбах концентрично с делениями нанесены центрировочные окружности. Части дуг этих

окружностей изображаются в плоскости отсчетных шкал. При отвесном положении вертикальной оси теодолита изображения обеих центрировочных окружностей совмещаются друг с другом и располагаются посередине между отсчетными шкалами.

При небольших наклонах теодолита в вертикальной плоскости, проходящей через горизонтальную ось вращения трубы, произойдет смещение подвешенной линзы компенсатора. Вследствие этого изображение центрировочной окружности вертикального круга сместится и не будет совпадать с изображением центрировочной окружности горизонтального круга. Вращением соответствующих подъемных винтов можно совместить эти изображения. Следовательно, горизонтальная ось вращения трубы может быть приведена в строго горизонтальное положение без накладного уровня. Это очень важно при измерении горизонтальных углов на крутых пластах.

Зрительная труба теодолита ОМТ-30 имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 16 (см. рис. 120), и состоит из трехлинзового объектива 17, фокусирующей линзы 18, сетки нитей 19 и окуляра 20 (рис. 122).

Труба переводится через зенит обоими концами. На трубе укреплены целик и мушка, а также верхний центр в виде острия 17 (см. рис. 120) для центрирования теодолита под точкой.

В дальнейшем теодолит ОМТ-30 будет заменен теодолитом Т15. В настоящее время создан его эскизный проект.

Малый оптический теодолит Theo-120, выпускаемый народным предприятием «Карл Цейсс» ГДР, предназначен для геодезических и маркшейдерских работ. Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтальных углов $\pm 20''$.

Инструмент приспособлен для работы как на штативе, так и на консоли в нормальном и подвешенном положениях. Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная (см. рис. 40 и § 34). Теодолит легко отделяется от подставки, в которой закрепляется винтом 8 (рис. 123). Микрометренно-зажимное устройство алидады

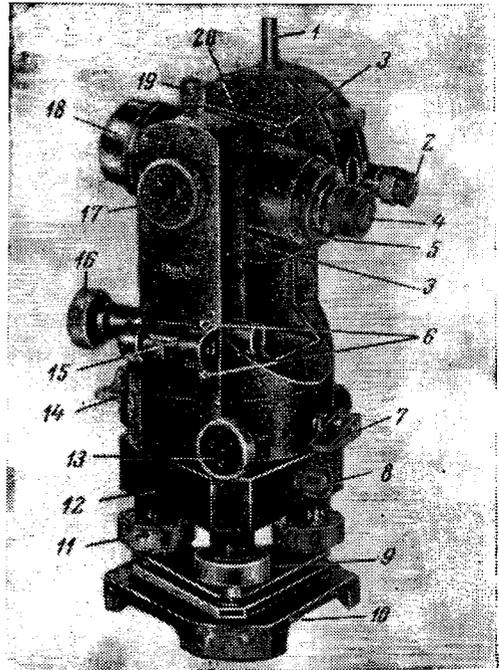


Рис. 123. Теодолит Theo-120

состоит из зажимного рычага 7 и микрометричного винта 13, а микрометрично-зажимное устройство зрительной трубы — из зажимного винта 19 и микрометричного винта 16. Совместное вращение лимба с алидадой осуществляется при помощи защелки 14. Подставка-треножник 12 установлена на плите 10. Подъемные винты 11 прижимаются к плите 10 плоской пружиной 9.

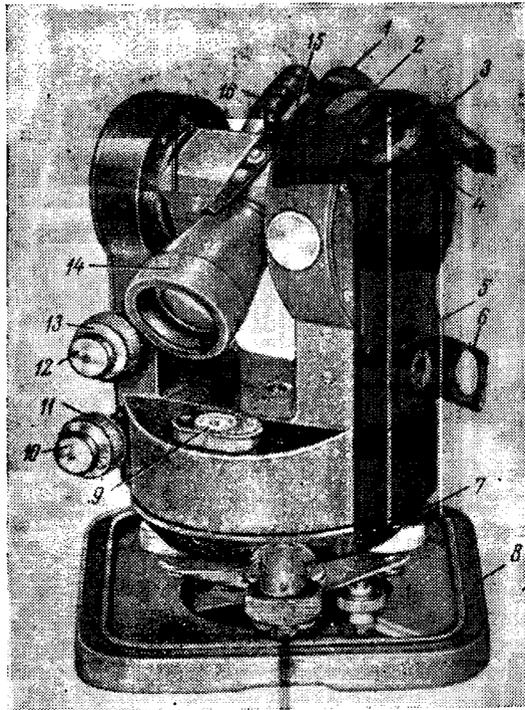


Рис. 124. Теодолит ТЕ-Е4

В теодолите отсутствуют уровень и микрометричный винт алидады вертикального круга. Поэтому определение места нуля и приведение его к нулю производится так же, как и в теодолитах ТОМ и ТЗ0. Винты сетки нитей закрыты колпачком 5. При измерении вертикальных углов пузырек реверсионного уровня 15 выводится на середину ампулы. Исправление положения оси уровня 15 производят исправительными винтами 6.

Отсчетным устройством в теодолите служит микроскоп-оценщик, окуляр 2 которого может вращаться вокруг оси вращения зрительной трубы 18.

Зрительная труба с внутренней фокусировкой, осуществляемой кремальерой 17, состоит из трехлинзового объектива, двухкомпонентной фокусирующей линзы и симметричного окуляра 4.

На зрительной трубе укреплены оптические визиры 3, на которых отмечены верхние центры 20. На место одного из визиров может быть установлен цилиндрический уровень, позволяющий вести нивелирование горизонтальным лучом. На цапфе 1 крепится ориентир-буссоль.

Инженерный оптический теодолит ТЕ-Е4, изготавливаемый заводом МОМ в Венгерской Народной Республике, предназначен для инженерных геодезических работ и может быть использован маркшедерами в подземных условиях.

Система вертикальных осей простая цилиндрическая неповторительная. Теодолит (рис. 124) может отделяться от основания футляра 8 и подставки-трепожника 7 и заменяться маркой. Для нивелирования теодолита служит круглый уровень 9.

Зажимные винты алидады горизонтального круга 10 и зрительной трубы 12 соосны со своими микрометренными винтами 11 и 13. Алидада вертикального круга имеет цилиндрический уровень 4, который можно наблюдать при двух положениях трубы с помощью зеркала и двухшарнирной рамки 3. Для выведения пузырька уровня 4 на середину служит микрометренный винт 5.

Отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам производятся при помощи шкалового микроскопа, окуляр 16 которого расположен рядом с окуляром 1 зрительной трубы. Зрительная труба теодолита ТЕ-Е4 имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 15 (см. рис. 124).

В подземных условиях для освещения шкал лимбов используется специальное осветительное устройство, укрепляемое на подставке со стороны зеркала 6. Уровень алидады освещается иллиминатором 2, а для освещения сетки нитей используется специальный отражатель, укрепляемый на объективе трубы 14.

Для работы в шахте, по особому заказу, заводом поставляется специальная консоль.

§ 62. ТЕОДОЛИТЫ ТОЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ

К этой группе относятся отечественные теодолиты Т10, Т5 и Т2, а из зарубежных к этой группе следует отнести теодолиты Theo-020, Theo-010, изготавливаемые народным предприятием «Цейсс» (Германская Демократическая Республика), и теодолиты ТЕ-D2 и ТЕ-В1, изготавливаемые заводом МОМ (Венгерская Народная Республика).

Оптический шкаловый теодолит Т10 предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов в аналитических сетях и полигонометрии 1 и 2-го разрядов со средней квадратической ошибкой $\pm 10''$. Теодолитом Т10 можно измерять расстояния при помощи нитяного дальномера и дальномерных насадок ДН-04 (ДДЗ), ДНР-06 (ДАР-100), укрепляемых на оправе объектива зрительной трубы. Кроме того, теодолитом Т10 можно производить техническое нивелирование с помощью цилиндрического уровня, устанавливаемого на зрительной трубе.

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная. Совместное вращение лимба с алидадой достигается соединением втулки лимба с алидадной частью при помощи защелки 8 (рис. 125). Теодолит отделяется от подставки-треножника 10, в которой он закрепляется винтом 9.

Зажимные винты алидады горизонтального круга и зрительной трубы 5 соосны с их микрометренными винтами 11 и 6. Уровень алидады вертикального круга скрыт внутри подставки трубы и рассматривается при помощи контактной призмной системы через поворотную призму 18. Пузырек этого уровня выводится на середину ампулы микрометренным винтом 13 алидады вертикального круга.

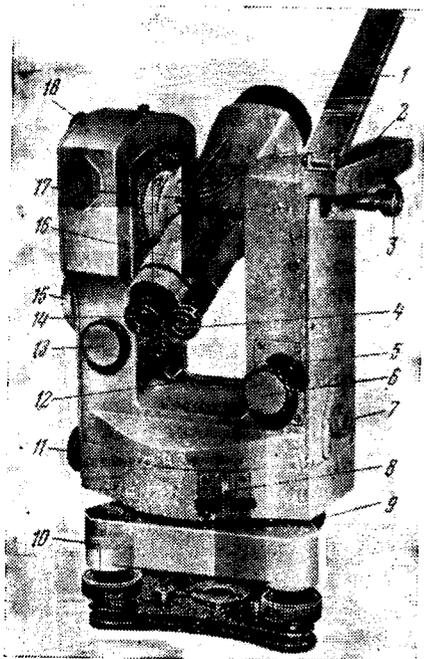


Рис. 125. Теодолит Т10

Исправительный винт уровня 12 алидады горизонтального круга выведен на подставку трубы со стороны, противоположной микрометренному винту 6 зрительной трубы (на рис. 125 не виден).

Теодолит имеет оптический отвес, вмонтированный в алидадную часть, с выдвижным окуляром 7. Штрихи лимбов освещаются при помощи зеркала 15. Отсчитывание производится по одной стороне лимбов при помощи шкалового микроскопа, окуляр 4 которого находится рядом с окуляром 14 зрительной трубы (см. рис. 74, 75 и § 50).

Зрительная труба ахроматическая с внутренней фокусировкой, осуществляемой кремальерой 16, состоит из трехкомпонентного объектива, фокусирующей линзы, сетки нитей и пятилинзового окуляра. На трубе укреплены два оптических визира 17, один из которых может быть заменен цилиндрическим уровнем.

Теодолит по требованию заказчика комплектуется ориентир-буссолью 2 с зеркалом 1, укрепляемой на колонке при помощи винта 3. Для измерения больших углов наклона теодолит снабжается окулярной насадкой.

Оптический шкаловый теодолит Т5 предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов в аналитических сетях и полигонометрии 1 и 2-го разрядов со средними квадратическими ошибками $\pm 5''$. Этим теодолитом можно измерять расстояния как нитяным дальномером, так и с дальномерными насадками типа ДН-04,

ДНР-06. Теодолит можно использовать для нивелирования IV класса.

В серийных образцах Т5 система вертикальных осей цилиндрическая неповторительная с перестановкой лимба, осуществляемой головкой 4 (рис. 126).

Рукоятки зажимных винтов алидады 6 и зрительной трубы 10 расположены соосно с их микрометренными винтами 7. Теодолит отделяется от треножника 5, что позволяет измерять углы по трех штативному способу.

На алидаде горизонтального круга установлены круглый 2 и цилиндрический 3 уровни. Исправительный винт 9 уровня 3 выведен на подставку. Внутри полой вертикальной оси помещен объектив оптического отвеса, окуляр 8 которого в опытных образцах расположен на корпусе алидады. В серийных образцах выдвжной окуляр 7 (см. рис. 125) расположен на подставке трубы, так же как у теодолита Т10.

Отсчетным устройством в теодолите служит шкаловый микроскоп, окуляр 1 которого расположен рядом с окуляром 11 зрительной трубы.

На рис. 127, а показана оптическая схема теодолита Т5. Лучи света, отразившись от зеркала 1, проходят иллюминатор 2, призмы 3 и 4 и освещают горизонтальный круг. Изображение штрихов этого круга при помощи призмы 5 строится объективом 6 в плоскости шкалы 7. Вертикальный круг 17 освещается призмами 9 и 10. Изображение штрихов вертикального круга при помощи призм 11, 13, 15 и 16 строится двухкомпонентным объективом 12, 14 в плоскости отсчетной шкалы 7. Изображения штрихов обоих кругов и отсчетных шкал рассматриваются при помощи призмы 8 через отсчетный микроскоп, состоящий из объектива 19, призмы 20 и окуляра 21.

Теодолит Т5 снабжен оптическим компенсатором, который автоматически компенсирует наклон вертикальной оси при измерении вертикальных углов и позволяет использовать теодолит как технический нивелир.

Компенсатором служит прямоугольная призма 13 (рис. 127, б), подвешенная на плоской пружине 18, прикрепленной к подставке

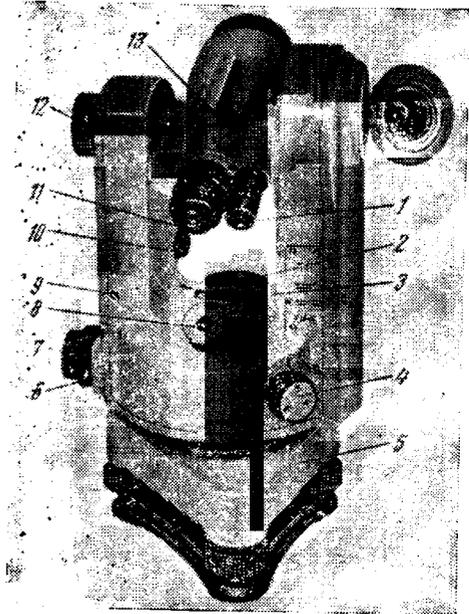


Рис. 126. Теодолит Т5

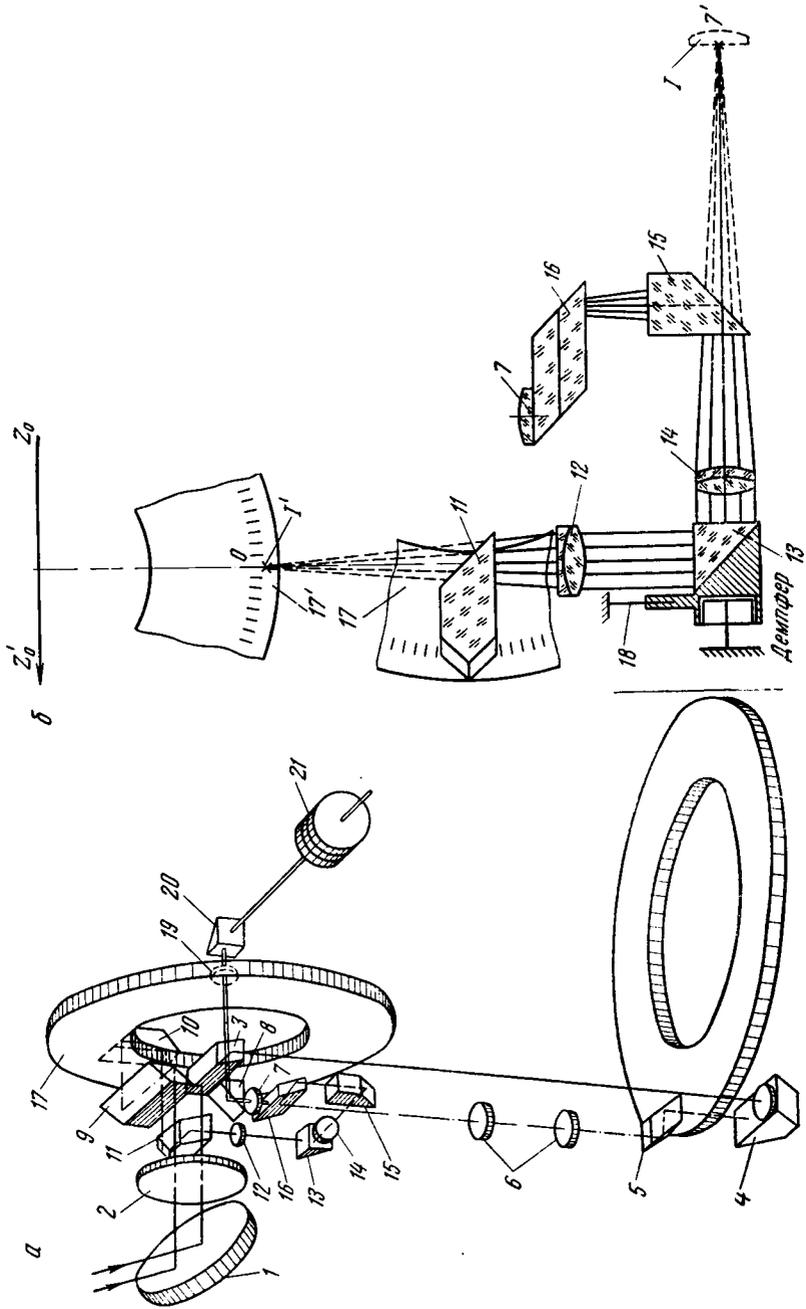


Рис. 127. Оптическая схема теодолита Т5

трубы. При наклонах оси вращения инструмента призма 13 под действием силы тяжести меняет свое положение и смещает изображение штрихов вертикального круга относительно изображения отсчетной шкалы так, что отсчет по вертикальному кругу соответствует вертикальному положению оси вращения теодолита. В пределах наклона оси теодолита $\pm 3'$ ошибка компенсации не превышает $\pm 2''$. Если на вертикальном круге установить отсчет, равный месту нуля, то визирная ось трубы займет горизонтальное положение. Это позволяет производить нивелирование горизонтальным лучом.

Поле зрения шкалового микроскопа теодолита Т5 выглядит так же, как у теодолита Т10 (см. рис. 75, б).

Зрительная труба ахроматическая с внутренней фокусировкой, осуществляемой кремальерой 12 (см. рис. 126). Объектив состоит из двух линз, разделенных воздушным промежуток: двойной склеенной и одной простой фокусирующей. Окуляр трубы пятилинзовый с уменьшенной кривизной поля. Труба переводится через зенит обоими концами. Сверху и снизу на трубе установлены оптические визиры 13.

Теодолит Theo-020, изготавливаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (Германская Демократическая Республика), предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов со средними квадратическими ошибками $\pm 4''$. Теодолит снабжен маркшейдерским оборудованием для работы в шахте. |

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная. Теодолит отделяется от подставки 7, в которой он крепится винтом 8 (рис. 128). Зажимные винты алидады 5 и зрительной трубы 2 выполнены в виде рычажков — их микрометрические винты соответственно 6 и 3. Совместное вращение горизонтального лимба с алидадной частью возможно при включении защелки 9.

Теодолит имеет оптический отвес, смонтированный в полой оси алидады, окуляр 4 которого расположен сбоку алидадной части. На алидаде укреплены круглый и цилиндрический 10 уровни.

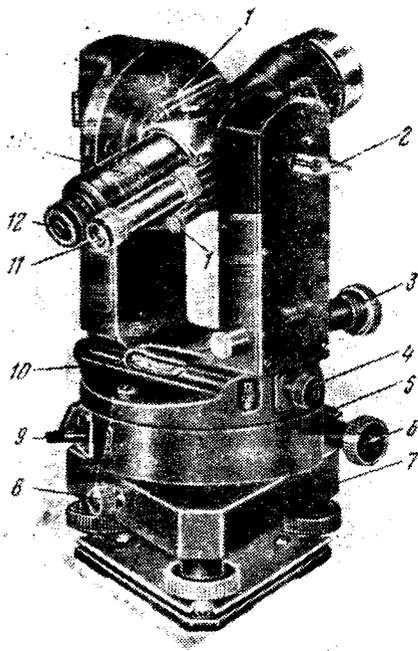


Рис. 128. Теодолит Theo-020

Теодолит Theo-020 снабжен оптическим компенсатором вертикального круга, автоматически исключающим влияние наклона вертикальной оси на точность измерения углов наклона.

Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 13. Труба снабжена двумя оптическими визирами 1.

Отсчетное устройство — шкаловый микроскоп, окуляр 11 которого расположен рядом с окуляром 12 зрительной трубы.

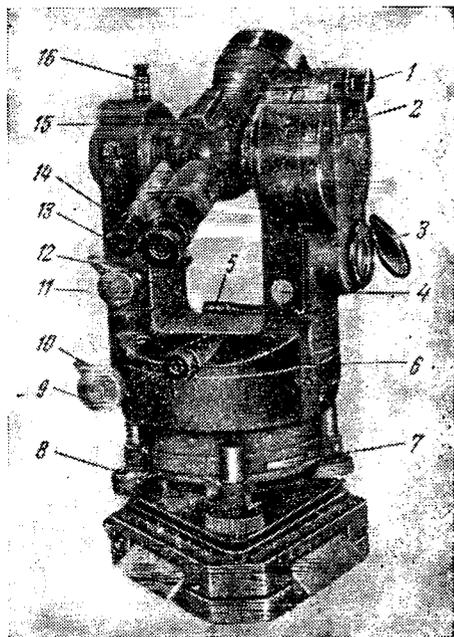


Рис. 129. Теодолит TE-D2

Для работы в шахте применяется маркшейдерское оборудование:

1. Устройство для установки теодолита на консоли в горизонтальном положении.

2. Комплект оборудования для электроосвещения во взрывобезопасном исполнении.

3. Комплект освещаемых сигналов для трехштативного способа измерения углов.

Теодолит-тахсаметр ТЕ-D2, изготавливаемый заводом MOM (Венгерская Народная Республика), предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтального угла $\pm 6''$. По требованию заказчика теодолит снабжается комплектом искусственного освещения и может быть использован для маркшейдерских подземных работ.

Разрез вертикальной оси теодолита показан на рис. 42, а

(§ 34). Теодолит отделяется от подставки-треножника. Ось алидады цилиндрическая, пустотелая, в ней располагаются детали оптического отвеса 6. Перестановка лимба осуществляется винтом 7. Зажимные рычажки алидады 10 горизонтального круга и зрительной трубы 12 соосны с их микрометрическими винтами 9 и 11 (рис. 129).

Кроме круглого уровня 8 теодолит ТЕ-D2 имеет цилиндрический уровень 5 алидады горизонтального круга и уровень 2 алидады вертикального круга, пузырек которого при помощи контактной оптической системы рассматривается через поворотную призму 1. На колонке вертикального круга расположен микрометрический винт алидады вертикального круга. На рис. 129 виден патрон пружины 4 этого винта.

Для установки буссоли на колонке теодолита служит цапфа 16. Подсветка шкал кругов осуществляется зеркалом 3. Отсчетное

устройство — шкаловый микроскоп, окуляр 13 которого расположен рядом с окуляром 14 зрительной трубы.

Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку и состоит из трехлинзового объектива, фокусирующей линзы, сетки нитей и трехкомпонентного окуляра. Зрительная труба переводится через зенит обоими концами. С одной ее стороны расположен оптический визир 15, а с другой — верхний центр для центрирования теодолита под точкой.

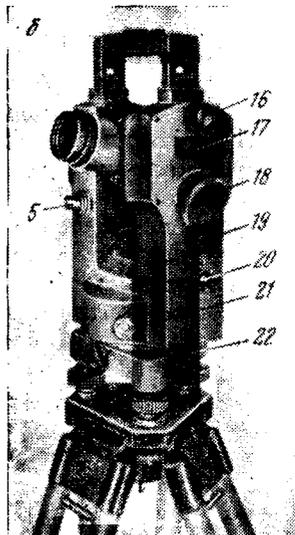
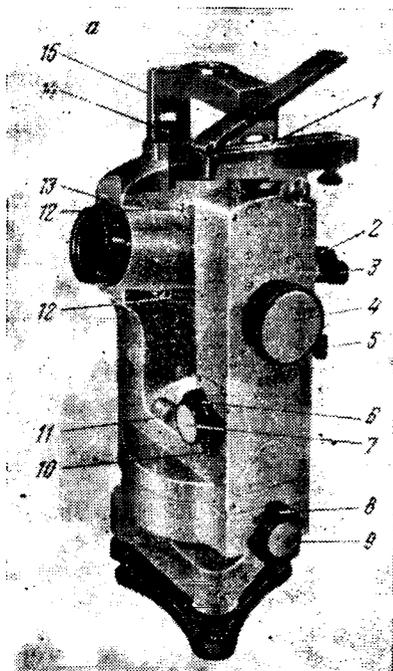


Рис. 130. Теодолит Т2

В комплект теодолита входит двойная призмная насадка, позволяющая вести наблюдения в области зенита.

В настоящее время заводом МОМ выпускается теодолит ТЕ-D4, который отличается от теодолита ТЕ-D2 тем, что он снабжен компенсатором места нуля вертикального круга.

Точный оптический теодолит Т2 (рис. 130, а) предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов в триангуляции и полигонометрии 3 и 4-го классов. Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтального угла $\pm 2''$. Он может быть использован для приближенных астрономических определений широты, долготы и азимута. Теодолитом можно измерять расстояния по нитяному дальномеру, а также при помощи дальномерных насадок ДН-04 и ДНР-06.

Система вертикальных осей цилиндрическая неповторительная с перестановкой лимба при помощи барабанчика 21 (рис. 130, б). Теодолит легко отделяется от подставки-треножника 22, в которой закрепляется. Зажимные винты алидады 8 и зрительной трубы 6 соосны с их микрометренными винтами 9 и 7 (рис. 130, а). Ось алидады полая, в ней расположен объектив оптического отвеса, окуляр 20 которого выведен на подставку трубы (рис. 130, б).

Контактный уровень алидады вертикального круга 17 расположен в колонке вертикального круга, и его пузырьки рассматривают через призму 16. Пузырек этого уровня выводится на середину винтом 19 алидады вертикального круга. Исправительные винты уровня находятся за крышкой 13 (рис. 130, а).

На алидаде горизонтального круга имеется цилиндрический уровень 11, исправительный винт 10 которого выведен на подставку трубы. К теодолиту Т2 прилагается накладной уровень, устанавливаемый на колонке алидады.

На подставках трубы винтами 14 укрепляется ручка 15, служащая для переноски теодолита, установки на ней вешки при работе по трехтеодолитному методу и для закрепления ориентир-буссоли 1.

Отсчитывание по кругам производится при помощи двустороннего клинового оптического микроскопа через окуляр 3, расположенный рядом с окуляром 2 зрительной трубы.

Оптическая схема теодолита Т2 приведена на рис. 84 и описана в § 52. Переключение кругов осуществляется рукояткой 5 (рис. 130, а и б). Освещаются круги зеркалом 18.

Поле зрения микроскопа показано на рис. 87. Совмещение изображений прогнвоположных штрихов лимбов осуществляется вращением барабана 4 (рис. 130, а) оптического микрометра. Зрительная труба апохроматическая с внутренней фокусировкой, осуществляемой фокусирующим кольцом, состоит из двухкомпонентного объектива, фокусирующей линзы, сетки нитей и ортоскопического окуляра.

Труба снабжена двумя оптическими визирами 12. Теодолит изготавливается в двух вариантах — с электрическим освещением и без него. При транспортировании теодолит укладывают в легкий металлический футляр.

Теодолит Theo-010 (рис. 131), изготавливаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (Германская Демократическая Республика), предназначен для измерения горизонтальных углов со средней квадратической ошибкой $\pm 2''$. К теодолиту могут поставляться приспособления для астрономических наблюдений и работы в шахте.

Теодолит легко отделяется от подставки 6, в которой он закрепляется винтом 7. Система осей цилиндрическая неповторительная с поворотным лимбом. Головки зажимных винтов алидады горизонтального круга 8 и зрительной трубы 2 выполнены в виде рычажков, а микрометренные винты 5 и 4 — в виде барабанов. Уровень вертикального круга расположен в подставке трубы. Изображение пузырька рассматривается через поворотную призму 15, а испра-

вительные винты уровня находятся за пробкой 14. Микрометренный винт алидады вертикального круга расположен на подставке трубы со стороны вертикального круга.

Оптический отвес смонтирован в полой оси алидады, а его окуляр выведен сбоку алидады со стороны, противоположной круглому уровню 9. На алидаде имеется цилиндрический уровень 11. Отсчитывание по кругам производится при помощи двустороннего клинового оптического микрометра.

Включение горизонтального или вертикального круга осуществляется при помощи винта 10. Окуляр 12 отчетного микроскопа расположен рядом с окуляром 13 зрительной трубы. Штрихи совмещаются вращением барабана 3 оптического микрометра.

Теодолит Theo-010 снабжен зеркально-линзовой трубой с внутренней фокусировкой, осуществляемой фокусирующим кольцом, расположенным на окулярной части трубы. Труба переводится через зенит обоими концами. На ней укреплен оптический визир 1.

При работе в подземных условиях теодолит Theo-010 может устанавливаться на консоли такой же конструкции, как и у теодолита Theo-020.

✓ Теодолит ТЕ-В1, изготовляемый заводом МОМ (Венгерская Народная Республика), предназначен для измерения горизонтальных углов со средней квадратической ошибкой из одного приема $\pm 2''$. Теодолит может быть использован для астрономических наблюдений.

Вертикальная осевая система теодолита ТЕ-В1 показана на рис. 42, б и описана в § 34. Перестановка лимба горизонтального круга осуществляется вращением винта 8 (см. рис. 50). Верхняя часть теодолита отделяется от подъемных винтов при помощи специального устройства, показанного на рис. 42, б и 50 и описанного в § 37. Отделение теодолита от подъемных винтов осуществляется винтом 1 (рис. 132).

Зажимные винты алидады 16 горизонтального круга и зрительной трубы 14 соосны их микрометренным винтам 15 и 13. Ось лимба 5 (см. рис. 42, б) полая, и в ней расположены детали оптического отвеса, окуляр 11 (рис. 132) которого выведен сбоку. Уровень алидады вертикального круга установлен в подставке 9 (см. рис. 50), и его пузырек рассматривается через поворотную призму 8

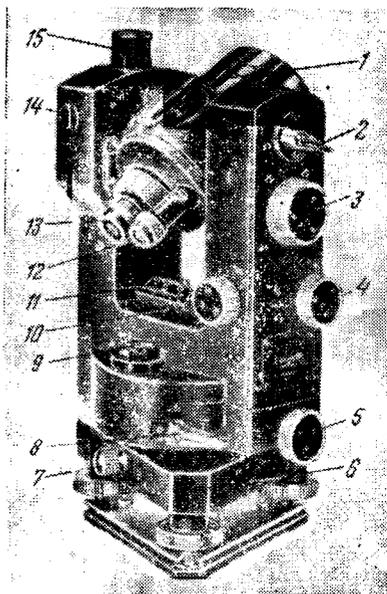


Рис. 131. Теодолит Theo-010

Обозначение Теодолита	Зрительная труба				Лимб и отсчетное устройство				
	Внешний диаметр оправы объектива, мм	Фокусное расстояние объектива, мм	Увеличение Поле зрения	Наименьший предел фокусировки, м	Диаметр лимба, мм: горизонтального вертикального	Цена деления	Отсчетное устройство	Точность отсчета	
ТОМ	38	142,5	$\frac{18 \times}{2^\circ}$	2,0	$\frac{70}{70}$	10'	Микроскоп-оценщик	1'	
Т30	38	150	$\frac{20 \times}{2^\circ}$	1,0	$\frac{70}{70}$	10'	Микроскоп-оценщик	1'	
Т20	38	98	$\frac{20 \times}{2^\circ}$	0,9	$\frac{64}{64}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',2	
ОМТ-30	34	185	$\frac{18 \times}{2^\circ}$	1,0	$\frac{80}{80}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',5	
Т10	46	250	$\frac{25 \times}{1^\circ 30'}$	1,5	$\frac{90}{70}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	
Т5	46	220	$\frac{27 \times}{1^\circ 30'}$	2,0	$\frac{95}{70}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	
Т2	46	250	$\frac{25 \times}{1^\circ 30'}$	1,5	$\frac{90}{65}$	20'	Оптический микрометр	1"	
Theo-120	38	125 *	$\frac{16 \times}{2^\circ,6}$	0,9	$\frac{61}{61}$	10'	Микроскоп-оценщик	1'	
Theo-020	46	195 *	$\frac{25 \times}{1^\circ,65}$	2,1	$\frac{96}{74}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	
Theo-010	64	135 *	$\frac{31 \times}{1^\circ,2}$	2,0	$\frac{84}{60}$	20'	Оптический микрометр	1"	
ТЕ-Е4	25	120 *	$\frac{16 \times}{2^\circ 10'}$	1,5	$\frac{74}{70}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',5	
ТЕ-D2	40	175 *	$\frac{25 \times}{1^\circ,5}$	2,0	$\frac{84}{76}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	
ТЕ-B1	54	174 *	$\frac{30 \times}{1^\circ 20'}$	2,0	$\frac{93}{60}$	20'	Оптический микрометр	1"	

* Длина трубы.

Таблица 13

ство		Цена деления уровней (на 2 мм дуги)					Вес, кг:	Где изготавливается
		На алидаде		накладного	при трубе	круглого		
		горизонтального круга	вертикального круга					
Компенсатор вертикаль- ного круга: диапазон работ, точность установки	Средняя квадратическая ошибка измерения угла из одного приема					теодолита штатива		
—	$\pm 0',5$	45"	—	—	30"	—	$\frac{1,9}{3,8}$	СССР
—	$\pm 0',5$	45"	—	—	20"	—	$\frac{2,0}{3,8}$	СССР
—	$\pm 20''$	30"	—	—	30"	10'	$\frac{2,2}{4,5}$	СССР
$\frac{\pm 2'}{\pm 5''}$	$\pm 15''$	2'	—	—	—	—	$\frac{3,2}{5,6}$	СССР
—	$\pm 10''$	30"	15"	15"	20"	—	$\frac{3,5}{5,3}$	СССР
$\frac{\pm 3',5}{\pm 2''}$	$\pm 5''$	30"	—	—	—	10'	$\frac{3,6}{5,3}$	СССР
—	$\pm 2''$	15"	15"	10"	—	—	$\frac{5,2}{5,3}$	СССР
—	20"	2'	—	—	30"	—	$\frac{2,8}{5,0}$	ГДР, «Карл Цейсс»
$\frac{\pm 4'}{\pm 1'',5}$	$\pm 4''$	30"	—	—	30"	8'	$\frac{4,3}{5,6}$	ГДР, «Карл Цейсс»
—	$\pm 2''$	20"	20"	10"	—	6'	$\frac{5,3}{5,6}$	ГДР, «Карл Цейсс»
—	$\pm 20''$	—	30"	—	—	5'	$\frac{3,4}{4,6}$	ВНР, завод МОМ
—	$\pm 6''$	30"	30"	—	—	6'	$\frac{4,8}{5,1}$	ВНР, завод МОМ
—	$\pm 2''$	20"	20"	10"	—	6'	$\frac{5,5}{6,2}$	ВНР, завод МОМ

(см. рис. 132). Пузырек этого уровня выводится на середину микрометрическим винтом 3.

На алидаде горизонтального круга установлен цилиндрический уровень 2, а на корпусе подставки — круглый уровень 17. Отсчеты по кругам производятся по

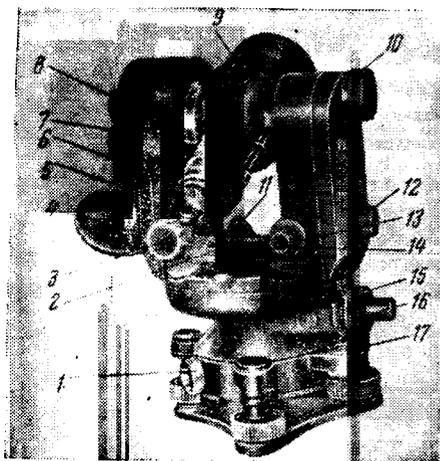


Рис. 132. Теодолит ТЕ-В1

двустороннему оптическому микрометру с плоско-параллельными пластинками, окуляр 6 которого расположен рядом с окуляром 5 зрительной трубы. Круги подсвечиваются при помощи зеркала 4. Для переключения кругов служит винт 12. Совмещение изображений штрихов осуществляется барабаном 10.

Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 7. Она состоит из трехлинзового объектива, фокусирующей линзы, сетки нитей и двухкомпонентного окуляра. Через зенит труба переводится только оку-

лярным концом. Труба снабжена оптическим визиром-коллиматором 9. Теодолит снабжается осветительным устройством кругов, уровня и сетки нитей в виде лампочки карманного фонаря с двумя батарейками цилиндрической формы.

В последнее время завод МОМ выпустил теодолит ТЕ-В3, в котором установлено устройство, автоматически компенсирующее влияние наклона вертикальной оси на отсчеты по вертикальному кругу.

В табл. 13 приведена техническая характеристика теодолитов.

Г Л А В А VIII

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

§ 63. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

Измерения углов, как и всякие другие измерения, сопровождаются ошибками случайного и систематического характера. Источниками ошибок могут явиться: недостатки зрения наблюдателя, несовершенство инструментов, изменения внешней среды в процессе измерения.

Влияние систематических ошибок можно исключить специальной методикой измерений и введением поправок в результаты измерений. Для этого нужно знать причины и законы возникновения этих ошибок.

Главными источниками систематических ошибок являются инструментальные ошибки, возникающие из-за нарушения сопряжений геометрических осей инструмента.

В угломерном институте должны быть соблюдены следующие условия:

1) плоскость горизонтального лимба должна быть перпендикулярна геометрической оси вращения алидады горизонтального круга, а центр круга его делений должен лежать на этой оси;

2) ось цилиндрического уровня алидады горизонтального круга должна быть перпендикулярна оси вращения алидады горизонтального круга;

3) горизонтальная ось вращения зрительной трубы должна быть перпендикулярна оси вращения алидады горизонтального круга;

4) визирная ось трубы должна быть перпендикулярна горизонтальной оси вращения трубы;

5) геометрическая ось вращения горизонтального лимба должна совпадать с геометрической осью вращения алидады или быть ей параллельна.

Кроме того, необходимо, чтобы:

а) увеличение, поле зрения и качество изображения зрительной трубы соответствовали требованиям, предъявляемым к инструментам;

б) цены делений шкал отсчетных устройств соответствовали расчетным значениям.

Помимо этого, должны быть обеспечены достаточная прочность и жесткость конструкции инструмента в сочетании с легкостью и плавностью вращения осей лимба и алидады горизонтального круга и оси вращения зрительной трубы.

Наличие больших люфтов в вертикальных и горизонтальных осях, очевидно, может привести к нарушениям сопряжений геометрических осей.

Маркшейдер и геодезист должны уметь обнаруживать нарушения сопряжений геометрических осей и механические неисправности инструментов. Поэтому они должны знать способы исследований и проверок инструментов. Исследования условий а) и б) были рассмотрены во II и V главах.

При исследовании влияния той или иной инструментальной ошибки будем предполагать, что другие ошибки отсутствуют.

В-2 § 64. ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ АЛИДАДЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КРУГА

Эксцентриситетом алидады горизонтального круга называется несовпадение точки C_1 пересечения оси вращения алидады с плоскостью лимба и центра C кольца делений лимба. Эксцентриситет приводит к смещению проекции индекса отсчетного устройства относительно штрихов лимба и к изменению цены деления шкалы отсчетного устройства.

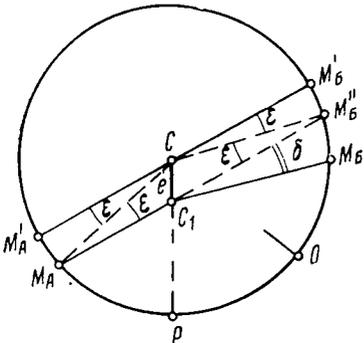


Рис. 133. Схема к определению эксцентриситета алидады

параллельный линии $M_A C_1$; δ — угол между линиями $M_A C_1$ и $C_1 M_B$; ϵ — угловое значение эксцентриситета алидады.

Продолжим линию $M_A C_1$ до точки M_B и, учитывая, что дуги $M_A M_A'$ и $M_B M_B'$ равны, напишем

$$d = M_B - M_A \pm 180^\circ = 2M_A M_A' + M_B M_B' = 2\epsilon + \delta. \quad (\text{VIII},1)$$

Допустив, что $M_A C_1$ равно радиусу R кольца делений лимба, из треугольника $M_A C C_1$ будем иметь

$$\epsilon_A = \frac{e}{R} \rho \sin(M_A - P). \quad (\text{VIII},2)$$

Если инструмент имеет два отсчетных устройства, отстоящие одно от другого на 180° , то угловая величина эксцентриситета второго отсчетного устройства определится по формуле

$$\varepsilon_B = \frac{e}{R} \rho \sin(M_A - P \pm 180^\circ) = -\frac{e}{R} \rho \sin(M_A - P). \quad (\text{VIII},3)$$

Поэтому при выводе среднего отсчета влияние эксцентриситета равно нулю.

После подстановки уравнения (VIII,2) в формулу (VIII,1) получим

$$d_1 = \frac{2e}{R} \rho \sin(M_A - P) + \delta. \quad (\text{VIII},4)$$

Повторив наблюдения, после поворота алидады на 180° можно написать

$$d_2 = \frac{2e}{R} \rho \sin(M_A - P \pm 180^\circ) + \sigma = -\frac{2e}{R} \rho \sin(M_A - P) + \delta. \quad (\text{VIII},5)$$

Складывая и вычитая равенства (VIII,4) и (VIII,5), получим

$$\delta = \frac{1}{2} (d_1 + d_2), \quad (\text{VIII},6)$$

а также

$$\frac{2e}{R} \rho \sin(M_A - P) = \frac{1}{2} (d_1 - d_2). \quad (\text{VIII},7)$$

Перепишем формулу (VIII,4)

$$d = \frac{2e}{R} \rho \sin M_A \cos P - \frac{2e}{R} \rho \cos M_A \sin P + \delta. \quad (\text{VIII},8)$$

Обозначив $\frac{2e}{R} \rho \cos P = x$; $\frac{2e}{R} \rho \sin P = y$, перепишем (VIII,8) и получим уравнение вида

$$d = x \sin M_A - y \cos M_A + \delta \quad (\text{VIII},9)$$

для одного положения алидады, которому соответствует отсчет по лимбу M_A . Исследуя эксцентриситет алидады в разных частях лимба с отсчетами M_1, M_2, \dots, M_n , получим n уравнений вида (VIII,9) с неизвестными δ, x и y .

Решая эти уравнения по способу наименьших квадратов, получим:

$$\delta = \frac{[d]}{n}; \quad (\text{VIII},10)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{[d \sin M_i]}{n} \\ y &= \frac{[d \cos M_i]}{n} \end{aligned} \right\} \operatorname{tg} P = -\frac{[d \cos M_i]}{[d \sin M_i]}; \quad (\text{VIII},11)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2e}{R} \rho = -\frac{2[d \cos M_i]}{n \sin P} = \frac{2[d \sin M_i]}{n \cos P}. \quad (\text{VIII},12)$$

Далее определяем

$$d_i = \frac{2e}{R} \rho \sin(M_i - P) \quad (\text{VIII}, 13)$$

и линейный эксцентриситет

$$e = \frac{R}{2\rho} \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (\text{VIII}, 14)$$

При исследовании оптических теодолитов с двусторонними оптическими микрометрами алидаду устанавливают последовательно на 0, 30, 60° и т. д. После каждой установки алидады вращением барабанчика микрометра дважды совмещают изображения диаметрально противоположных штрихов лимба. Затем дважды совмещают изображение штриха лимба с индексом алидады. После каждого совмещения берут отсчеты по шкале микрометра. В тех случаях, когда индекса алидады в поле зрения микроскопа нет (например, в теодолите Т2), вместо совмещения штрихов с индексом совмещают крайний штрих лимба с границей поля зрения микроскопа.

Ниже приведен пример исследования эксцентриситета алидады горизонтального круга оптического теодолита Т2*.

Исследование выполняется в прямом и обратном ходе алидады в пределах одного оборота.

Результаты исследования прямого хода алидады приведены в табл. 14. В графы 1, 2, 4 и 5 вписаны отсчеты оптического микро-

Таблица 14

Отсчеты при совмещении		Средние отсчеты a_1, b_1	Отсчеты при совмещении		Средние отсчеты a_2, b_2	$d_1 = 2(b_1 - a_1)$	$d_2 = 2(b_2 - a_2)$	$\delta = \frac{d_1 + d_2}{2}$
штрихов лимба a_1	штриха лимба с индексом b_1		штрихов лимба a_2	штриха лимба с индексом b_2				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0° 0' 36",7	5",0	36",2	180° 0' 35",0	0' 10",3	34",5			
35",7	5",8	5",4	34",0	12",0	11",2	-61",6	-46",6	-54",1
30 0 38",0	5",0	37",4	210 0 33",2	9",0	31",6	-66",8	-46",2	-56",5
36",8	3",0	4",0	30",0	8",0	8",5			
60 0 37",8	6",8	56",6	240 0 27",0	6",5	26",0	-61",2	-40",4	-50",8
35",3	5",2	6",0	25",0	5",0	5",8			
90 0 33",5	6",0	33",2	270 0 29",0	-2",0	27",6	-55",4	-59",6	-57",5
33",0	5",0	5",5	26",2	-2",5	-2",2			
120 0 41",7	26",0	41",4	300 0 34",2	-1",0	34",6	-32",4	-72",2	-52",3
41",2	24",5	25",2	35",0	-2",0	-1",5			
150 0 38",0	18",2	37",2	330 0 37",5	0",5	37",0			
36",3	17",3	17",6	36",5	0",5	0",5	-39",2	-73",0	-56",1

* Пример заимствован из книги проф. Гусева Н. А. «Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы» М., Изд-во «Недра», 1968 г.

метра, взятые после каждого совмещения. Далее в графы 3 и 6 вписаны средние отсчеты из двух совмещений; в графы 7 и 8 вписаны значения d_1 и d_2 , вычисленные по формуле (VIII,1) и наконец в графу 9 вписаны значения δ , вычисленные по формуле (VIII,6).

Обычно значения элементов эксцентриситета определяют графически. По значениям d_1 и d_2 (табл. 14) строят график, показывающий изменения эксцентриситета в прямом и обратном ходе (рис. 134, а), откладывая по оси x отсчеты по лимбу, а по оси y соответствующие им значения d . Затем вычисляют значения $d_{\text{выч}}$ по формуле (VIII,13) и по ним строят выравнивающую синусоиду. Проводят ось симметрии синусоиды и по графику определяют ε_{max} , δ и R . Величину линейного эксцентриситета вычисляют по формуле

$$e = R \sin \varepsilon_{\text{max}}, \quad (\text{VIII},15)$$

где R — радиус лимба.

В теодолитах с односторонним отсчитыванием эксцентриситет можно обнаружить только при наведении визирной оси на один и тот же предмет при двух положениях вертикального круга. Поэтому исследование эксцентриситета таких теодолитов производят в следующем порядке.

На ровной площадке устанавливают на штативе теодолит, а вокруг него на равных расстояниях, не менее 30 м от инструмента, через 45 или 60° устанавливают вехи или марки. Равенство расстояний от вешек и ровная площадка обусловлены необходимостью исключения церефокусировок и сохранения постоянных углов наклона оси визирования.

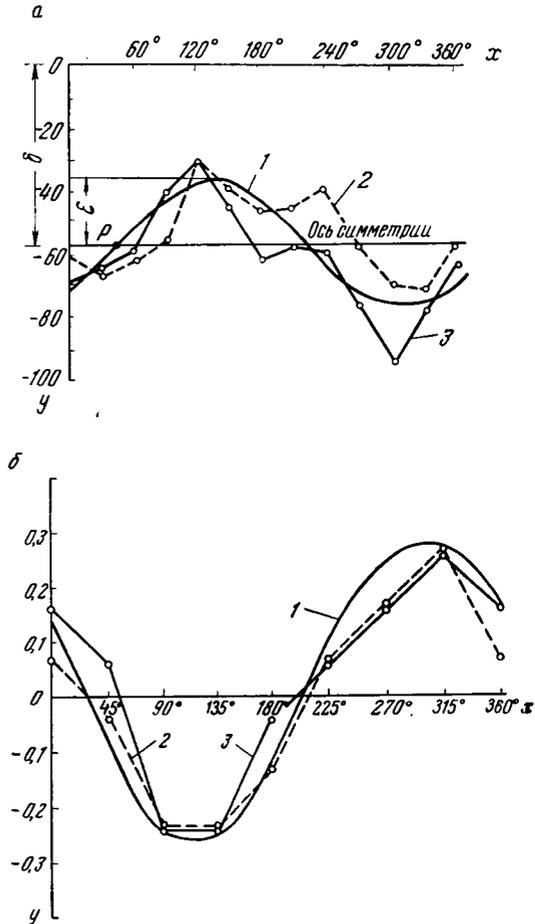


Рис. 134. Графики изменения эксцентриситета алидады теодолитов Т2 и Т10

1 — сглаживающая кривая; 2 — прямой ход; 3 — обратный ход

Затем измеряют направления способом круговых приемов. Делают два приема при неподвижном положении горизонтального лимба. В первом приеме алидаду вращают по ходу часовой стрелки, во втором приеме — в обратном направлении.

Для каждого направления вычисляют разности

$$2c = K\Pi - KЛ + 180^\circ$$

и определяют среднее значение двойной коллимационной ошибки в каждом приеме

$$2c_0 = \frac{\sum (K\Pi - KЛ + 180^\circ)}{n}, \quad (\text{VIII}, 16)$$

где n — число всех направлений.

Далее вычисляют d для каждого направления по формуле

$$d = (K\Pi - KЛ + 180^\circ) - 2c_0. \quad (\text{VIII}, 17)$$

Таблица 15

№ направления	Отсчеты по горизонтальному кругу		$K\Pi - KЛ + 180^\circ = 2c$	$d = 2c - 2c_0$
	$K\Pi$	$KЛ$		
1	0° 25',8	180° 25',4	+0',4	+0',07
2	45 21,2	225 20,9	+0,3	-0,03
3	90 22,9	270 22,8	+0,1	-0,23
4	135 18,8	315 18,7	+0,1	-0,23
5	180 17,0	0 16,8	+0,2	-0,13
6	225 23,3	45 22,9	+0,4	+0,07
7	270 26,1	90 25,6	+0,5	+0,17
8	315 20,4	135 19,8	+0,6	+0,27
			$\sum 2c = 2',6$	
			$2c_0 = \frac{2',6}{8} = 0',33$	
1	0° 25',7	180° 25',2	+0',5	+0',16
2	45 21,2	225 20,8	+0,4	+0,06
3	90 22,9	270 22,8	+0,1	-0,24
4	135 18,7	315 18,6	+0,1	-0,24
5	180 17,1	0 16,8	+0,3	-0,04
6	225 23,3	45 22,9	+0,4	+0,06
7	270 26,1	90 25,6	+0,5	+0,16
8	315 20,3	135 19,9	+0,6	+0,26
			$\sum 2c = 2',7$	
			$2c_0 = \frac{2',7}{8} = 0',34$	

По полученным значениям d строят графики для первого и второго приема и затем выравнивающую синусоиду. По графику определяют ϵ_{\max} и P . В табл. 15 приведены результаты исследования эксцентриситета алидады теодолита Т10, а на рис. 134, б представлен график изменений эксцентриситета.

При измерении углов способом приемов при круге «право» и круге «лево» теодолитами с односторонними отсчетными приспособлениями влияние эксцентриситета на точность измерения практически исключается. Измерения способом повторений этими же инструментами не свободны от ошибок за эксцентриситет алидады.

B-27 § 65. КОЛЛИМАЦИОННАЯ ОШИБКА

В соответствии с условием 4) § 63 визирная ось зрительной трубы должна образовывать с горизонтальной осью вращения трубы угол в 90° . Отклонение этого угла от 90° обозначается буквой c и называется коллимационной ошибкой.

Пусть $HM_1M_0H_1H$ — плоскость лимба горизонтального круга (рис. 135); HH_1 — горизонтальная ось вращения трубы, совмещенная с плоскостью лимба; ZOM_1m_1Z — идеальное положение коллимационной плоскости, когда визирная ось перпендикулярна оси вращения трубы; ZO — отвесная линия; O — точка пересечения визирной оси с горизонтальной осью вращения трубы; M_1 и M_0 — отсчеты по горизонтальному кругу, соответствующие двум положениям идеальной коллимационной плоскости.

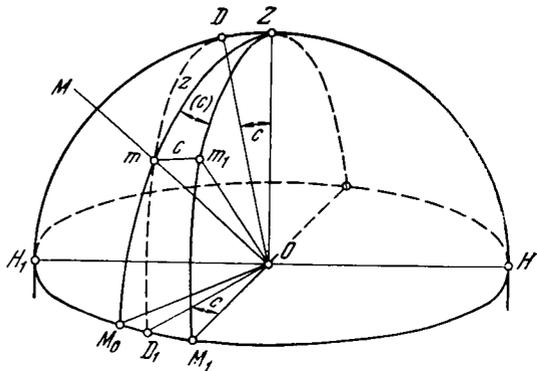


Рис. 135. Схема к определению коллимационной ошибки

Допустим, что реальная визирная ось не совпадает с идеальной коллимационной плоскостью и составляет с ней угол c . Тогда при вращении вокруг оси HH_1 визирная ось будет описывать конус, который в пересечении с вспомогательной сферой образует малый круг DmD_1 , параллельный большому кругу Zm_1M_1 . Если реальную визирную ось Om направить на точку M , то отсчет по горизонтальному кругу будет M_1 . Он будет отличаться от отсчета M_0 , соответствующего идеальному положению визирной оси при наведении на ту же точку, на угол (c) = углу M_1OM_0 . Следовательно, коллимационная ошибка c приводит к ошибке (c) в отсчете по горизонтальному кругу. Поэтому истинный отсчет $M_0 = M_1 + (c)$.

Проведем через точку m дугу большого круга, перпендикулярную дуге большого круга Zm_1M_1 . В прямоугольном сферическом

треугольнике Zmm_1 имеем: $Zm = z$ — зенитное расстояние точки M ; $mm_1 = c$ — коллимационная ошибка; (c) — ошибка в отсчете по горизонтальному кругу, вызванная наличием коллимационной ошибки c .

Из решения прямоугольного сферического треугольника Zm_1m напишем:

$$\sin c = \sin(c) \sin z; \sin(c) = \frac{\sin c}{\sin z}.$$

Так как c величина малая, то

$$(c) = \frac{c}{\sin z} = c \operatorname{cosec} z \quad (\text{VIII}, 18)$$

и

$$M_0 = M_1 + \frac{c}{\sin z} = M_1 + c \operatorname{cosec} z. \quad (\text{VIII}, 19)$$

Предположим, что визирная ось образует с левым концом H горизонтальной оси вращения трубы тупой угол $(90^\circ + c)$; в этом случае $M_0 = M_1 + c \operatorname{cosec} z$. После перевода трубы через зенит и наведения ее вновь на точку M визирная ось будет образовывать с левым концом (H_1) горизонтальной оси острый угол $(90^\circ - c)$ и $M_0 = M_1 - c \operatorname{cosec} z$.

Обозначая направления, наблюдаемые при круге «право» и круге «лево», через R и L , будем иметь:

$$M_0 = R - c \operatorname{cosec} z; \quad M_0 \pm 180^\circ = L + c \operatorname{cosec} z \quad (\text{VIII}, 20)$$

или

$$M_0 = R + c \operatorname{cosec} z; \quad M_0 \pm 180^\circ = L - c \operatorname{cosec} z. \quad (\text{VIII}, 21)$$

Из формул (VIII,20) и (VIII,21) следует, что при постоянном значении коллимационной ошибки истинное направление равно полусумме направлений, наблюдаемых при круге «право» и круге «лево»,

$$M_0 = \frac{R + L \pm 180^\circ}{2}. \quad (\text{VIII}, 22)$$

Из формул (VIII,18) и (VIII,21) следует, что при зенитном расстоянии $z = 90^\circ$ коллимационная ошибка c равна полуразности отсчетов по горизонтальному кругу при визировании горизонтальным лучом на одну и ту же точку (значительно удаленную) при двух положениях зрительной трубы:

$$c = \frac{R - L \pm 180^\circ}{2}. \quad (\text{VIII}, 23)$$

Исправление коллимационной ошибки достигается при помощи горизонтальных исправительных винтов сетки нитей.

§ 66. ОШИБКА ОТ НЕПЕРПЕНДИКУЛЯРНОСТИ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ТРУБЫ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ ИНСТРУМЕНТА

Неперпендикулярность оси вращения трубы вертикальной оси вращения инструмента приводит к тому, что направления на точки визирования будут проектироваться на плоскость горизонтального круга не в вертикальной, а в наклонной плоскости. Это вызывает ошибки в отсчетах по горизонтальному кругу.

Пусть $НМ_1М_0Н_1Н$ — плоскость горизонтального круга (рис. 136) $НН_1$ — идеальное положение оси вращения трубы (ось вращения трубы параллельна плоскости лимба и совмещена с ней); $Н'Н'_1$ — реальное положение оси вращения трубы, наклоненное под углом p к идеальному положению $НН_1$.

Визирная ось OZ_1 при наклонном положении оси $Н'Н'_1$ будет описывать на вспомогательной сфере большой круг $М_1Z_1M'_1$, плоскость которого составит угол p с плоскостью большого круга $М_1ZM'_1$, описываемого визирной осью при горизонтальном положении оси вращения трубы $НН_1$.

Если визирную ось OZ_1 навести на точку M , то отсчет по горизонтальному кругу будет равен M_1 . При идеальном положении оси вращения трубы $НН_1$ для наведения визирной оси на точку M потребовалось бы повернуть алидаду на угол $M_1OM_0 = (p)$ по ходу часовой стрелки, и истинный отсчет оказался бы равным

$$M_0 = M_1 + (p). \quad (\text{VIII}, 24)$$

Проведя через точку m дугу большого круга, перпендикулярную дуге большого круга Zm_1M_1 , получим два прямоугольных треугольника Zm_1m и M_1m_1m с прямыми углами при точке m_1 и общей стороной mm_1 . В треугольнике Zm_1m сторона $mZ = z$ есть зенитное расстояние точки M , а угол $Z = (p)$ — ошибка в отсчете M_1 , вызванная наклоном оси вращения трубы. В треугольнике M_1m_1m сторона $M_1m \approx (90^\circ - z)$, а угол $M_1 = p$ — величина наклона реальной оси вращения трубы. Решая треугольники Zm_1m и M_1m_1m относительно общей стороны mm_1 и приравнявая, получим

$$\sin z \sin (p) = \sin (90^\circ - z) \sin p.$$

Учитывая, что (p) и p величины малые, можно написать

$$(p) = p \operatorname{ctg} z. \quad (\text{VIII}, 25)$$

Если левый конец горизонтальной оси вращения трубы выше правого (по линии визирования), то наклонность оси принято считать

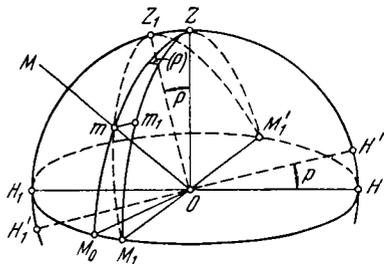


Рис. 136. Схема к определению ошибки от неперпендикулярности оси вращения трубы вертикальной оси инструмента

положительной, и в соответствии с формулой (VIII,24) можно написать

$$M_0 = M_1 + p \operatorname{ctg} z. \quad (\text{VIII},26)$$

При переводе трубы через зенит изменяется знак наклонности p , и, следовательно, если наблюдаемые значения направлений при круге «право» и круге «лево» обозначить R и L , а истинное значение направления через M_0 , то:

$$M_0 = R + p \operatorname{ctg} z; \quad M_0 \pm 180^\circ = L - p \operatorname{ctg} z$$

или

$$M_0 = R - p \operatorname{ctg} z; \quad M_0 \pm 180^\circ = L + p \operatorname{ctg} z;$$

$$M_0 = \frac{R + L \pm 180^\circ}{2}.$$

Следовательно, ошибка от неперпендикулярности оси вращения трубы оси вращения инструмента исключается определением среднего арифметического из наблюдений точки при круге «право» и круге «лево».

Установка оси вращения трубы перпендикулярно оси вращения инструмента производится при помощи исправительных устройств подставок трубы (см. рис. 47, *a* и *b* и § 36). В современных оптических теодолитах завод часто гарантирует соблюдение этого условия и поэтому в конструкциях современных инструментов такие устройства не предусматриваются.

§ 67. ОШИБКА, ВЫЗЫВАЕМАЯ НАКЛОНОМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ ИНСТРУМЕНТА

Неточное приведение вертикальной оси инструмента в отвесное положение может быть вызвано нарушением сопряжения оси уровня с осью вращения алидады горизонтального круга или же небрежным нивелированием инструмента. Наклон вертикальной оси сопровождается наклоном плоскости горизонтального круга, наклоном оси вращения трубы и коллимационной плоскости.

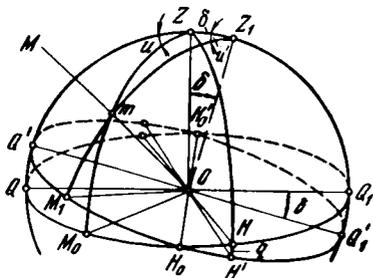


Рис. 137. Схема к определению ошибки от наклона вертикальной оси инструмента

Допустим, что все оси в инструменте сопряжены правильно, а ось вращения инструмента OZ_1 отклонена от отвесной линии OZ на угол δ (рис. 137). При этом линия $H_0H'_0$ пересечения плоскости реального лимба $Q'M_1H_0H'Q'_1$ с плоскостью горизонтально расположенного лимба $QM_0H_0HQ_1$ будет горизонтальной, а большой круг вспомогательной сферы $QQ'ZZ_1Q_1Q'_1$ — вертикальным. Пусть ви-

ного лимба $QM_0H_0HQ_1$ будет горизонтальной, а большой круг вспомогательной сферы $QQ'ZZ_1Q_1Q'_1$ — вертикальным. Пусть ви-

зирная ось трубы Om наведена на точку M . Тогда горизонтальная ось вращения трубы займет положение OH' , а направление OM на плоскость наклонного лимба будет проектироваться наклонной коллимационной плоскостью $Z_1OM_1mZ_1$. Вместо отсчета M_0 на горизонтально расположенном лимбе мы получим отсчет M_1 на наклонном лимбе. Ошибку в отсчете можно определить как разность дуг $QM_0 - Q'M_1$ или углов $u - u'$, измеряемых этими дугами,

$$(q) = u - u'. \quad (\text{VIII}, 27)$$

Величину этой ошибки можно найти из сферического треугольника mZZ_1 , в котором сторона $mZ = z$ — зенитное расстояние точки M ; ZZ_1 , сторона — измеряющая угол δ между вертикальной осью OZ_1 и отвесной линией OZ ; угол $Z = 180^\circ - u$ и угол $Z_1 = u'$. Для решения задачи используем формулу катангенсов

$$\text{ctg } z \sin \delta = -\cos u \cos \delta + \sin u \text{ctg } u' = \sin u (\text{ctg } u' - \cos q \text{ctg } u)$$

или, учитывая, что δ величина малая,

$$\delta \text{ctg } z = \sin u (\text{ctg } u' - \text{ctg } u).$$

Но

$$\text{ctg } u' - \text{ctg } u = \frac{\sin (u - u')}{\sin u \sin u'},$$

поэтому получим

$$\delta \text{ctg } z = \frac{\sin (u - u')}{\sin u'} \approx \frac{u - u'}{\sin u'}.$$

Отсюда с учетом формулы (VIII,27)

$$(q) = \delta \text{ctg } z \sin u'. \quad (\text{VIII}, 28)$$

Проведем вертикал ZOH' . В образовавшемся сферическом прямоугольном треугольнике H_0HH' угол $H_0 = \delta$; дуга $H_0H' = Q'M_1$ измеряется углом u' , так как угол между осью визирования и осью вращения трубы постоянен и равен 90° ; дуга HH' измеряет угол q наклона оси вращения трубы OH' . Решая сферический треугольник H_0HH' относительно q , получим

$$\sin q = \sin \delta \sin u' \quad (\text{VIII}, 29)$$

или

$$q = \delta \sin u'.$$

Подставляя в формулу (VIII,28) значение $\delta \sin u'$ из равенства (VIII,29), окончательно получим

$$(q) = q \text{ctg } z, \quad (\text{VIII}, 30)$$

где q — наклонность горизонтальной оси вращения трубы, вызванная наклоном оси вращения инструмента.

Следует отметить, что при наклонном положении оси вращения инструмента ошибка в отсчете выражается той же формулой, что и ошибка за наклон горизонтальной оси вращения трубы, однако

она меняет свое значение с изменением азимута измеряемого направления [см. формулу (VIII,29)]. Кроме того, так как знак наклонности оси вращения трубы при наблюдении той же точки при другом положении вертикального круга не изменяется, то эта ошибка не исключается в среднем арифметическом из наблюдений при круге «лево» и круге «право». Для исключения влияния этой ошибки в измеренное направление приходится вводить поправку, вычисленную по формуле (VIII,30). Для определения наклонности q пользуются накладным уровнем, устанавливаемым на ось вращения трубы.

§ 68. ОШИБКИ НАНЕСЕНИЯ ДЕЛЕНИЙ ЛИМБА, ОТСЧИТЫВАНИЯ И ВИЗИРОВАНИЯ

Деления наносятся на лимбы с ошибками, которые могут быть случайными и систематическими. Случайные ошибки возникают вследствие шатания резца делительной машины; систематические — от ошибок нанесения делений эталонного круга делительной машины и от ошибок изготовления зубьев этого круга и резьбы червячного винта, от несовпадения центров вращения эталонного и разделяемого кругов и других причин.

Накопление систематических ошибок происходит по некоторому периодическому закону.

Чтобы уменьшить влияние систематических ошибок при измерении углов, берут отсчеты по диаметрально противоположным отсчетным приспособлениям; многократно измеряют направления на различных частях лимба, симметрично расположенных по всей его окружности. При измерении направлений лимб между приемами переставляют на угол

$$\varphi = \frac{180^\circ}{n},$$

где n — число приемов.

Влияние ошибок визирования и отсчитывания при измерении углов при двух положениях вертикального круга определяется по формулам:

для способа приемов

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{n} (m_b^2 + m_o^2)}; \quad (\text{VIII,31})$$

для способа повторений

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \left(m_b^2 + \frac{m_o^2}{n} \right)}, \quad (\text{VIII,32})$$

где n — число полных приемов или повторений;

m_b — ошибка визирования;

m_o — ошибка отсчитывания, которая для инструмента с двумя отсчетными приспособлениями равна $\pm \frac{m_o'}{\sqrt{2}}$ (m_o' — ошибка отсчитывания по одному отсчетному приспособлению).

§ 69. ПОВЕРКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОМЕРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Точное и эффективное измерение углов теодолитом возможно только при соблюдении следующих условий:

1. Плоскость горизонтального лимба должна быть перпендикулярна оси вращения инструмента, а вертикального лимба — оси вращения трубы.

2. Ось цилиндрического уровня алидады горизонтального круга должна быть перпендикулярна, а ось круглого уровня — параллельна вертикальной оси вращения инструмента.

3. Вертикальная нить (биссектор) сетки нитей при отвесном положении вертикальной оси теодолита должна быть отвесной.

4. Визирная ось трубы должна быть перпендикулярна оси вращения зрительной трубы.

5. Ось вращения зрительной трубы должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения теодолита.

6. Ось цилиндрического уровня при трубе должна быть параллельна визирной оси зрительной трубы.

7. Ось вращения алидады горизонтального и вертикального кругов должна проходить соответственно через центры шкал делений горизонтального и вертикального лимбов.

8. Место нуля *МО* или место зенита *МЗ* должно быть равно нулю.

9. При фокусировании зрительной трубы на цели, находящиеся на разных расстояниях, положение ее визирной оси должно оставаться неизменным.

10. В теодолитах с системой вертикальных осей, показанной на рис. 37, *а*, оси вращения лимба и алидады должны совпадать или быть параллельными.

11. Компенсатор вертикального круга должен обеспечивать неизменный отсчет по вертикальному кругу при наклонах вертикальной оси теодолита в пределах, определенных конструкцией компенсатора.

Исследование условия 1. Неперпендикулярность плоскости лимба оси вращения инструмента выявляется вращением алидады вокруг ее оси. При этом в теодолитах с металлическими кругами будет наблюдаться вертикальный зазор, приводящий к параллаксу при отсчитывании по верньеру. В инструментах с микроскопами будут наблюдаться расфокусировка и изменение цены деления шкалы отсчетного приспособления.

Исправление возможно в условиях мастерской опытным оптиком-механиком.

Проверка условия 2. Устанавливают цилиндрический уровень параллельно двум подъемным винтам и их вращением выводят пузырек уровня на середину. Затем поворачивают алидаду на 90° , и в этом положении третьим подъемным винтом выводят пузырек на середину ампулы. После этого алидаду поворачивают на 180° . Если пузырек уровня окажется на середине — условие выполнено, если пузырек сместился — условие нарушено.

Исправление производится в следующем порядке. Вращением исправительных винтов уровня перемещают пузырек к середине ампулы на половину его смещения и окончательно выводят на середину подъемным винтом. Исправление достигается в один-два приема.

Круглый уровень поверяется обычно по исправленному цилиндрическому. После приведения вертикальной оси в отвесное положение при помощи цилиндрического уровня, пузырек круглого уровня выводится на середину исправительными винтами круглого уровня.

Однако круглый уровень можно поверить так же, как это делается при проверке цилиндрического уровня.

Проверка условия 3. После тщательной установки оси вращения теодолита в отвесное положение вертикальную нить зрительной трубы наводят на хорошо видимую точку. Вращают трубу вокруг горизонтальной оси, и если изображение точки все время остается на вертикальной нити, то условие выполнено. Если же изображение точки смещается с нити, условие нарушено. Исправление достигается поворотом окулярной части трубы с сеткой так, чтобы вертикальная нить (биссектор) расположилась отвесно. Для этого предварительно открепляют винты, скрепляющие окулярную часть, а после исправления снова закрепляют. Затем проверку повторяют.

Проверка условия 4. При определении коллимационной ошибки наблюдают удаленную хорошо видимую точку при горизонтальном положении трубы. Крест сетки нитей зрительной трубы наводят на эту точку при двух положениях вертикального круга, берут отсчеты по обоим отсчетным приспособлениям и вычисляют коллимационную ошибку по формуле

$$2c = K\Pi - KЛ \pm 180^\circ.$$

В теодолитах с односторонним отсчетным приспособлением для исключения влияния эксцентриситета алидады определение коллимационной ошибки ведется в два приема. После наведения трубы на точку при двух положениях вертикального круга и взятия отсчетов по горизонтальному кругу ($K\Pi_1$ и $KЛ_1$) алидаду, скрепленную с лимбом, поворачивают примерно на 180° . После этого при новом положении лимба наводят крест сетки зрительной трубы на ту же точку при двух положениях вертикального круга и берут отсчеты по горизонтальному кругу ($K\Pi_2$ и $KЛ_2$). Коллимационную ошибку вычисляют по формуле

$$2c = \frac{(K\Pi_1 - KЛ_1 \pm 180^\circ) + (K\Pi_2 - KЛ_2 \pm 180^\circ)}{2}. \quad (\text{VIII}, 33)$$

Влияние коллимационной ошибки исключается при измерении углов при двух положениях вертикального круга. При измерении углов в триангуляции внутренний контроль измерения направлений осуществляется по постоянному значению двойной коллимационной ошибки, что возможно при горизонтальном положении визирной оси трубы.

Тем не менее допустимая величина двойной коллимационной ошибки регламентируется инструкциями по проведению геодезических работ. Считается, что $2c$ не должно превышать двойной средней квадратической ошибки измерения угла данным инструментом. Например, для теодолита ОМТ-30 $2c \leq 30''$.

Если коллимационная ошибка превышает указанный допуск, необходимо сделать исправление. Для этого снимают колпачок, закрывающий винты сетки нитей, и берут исправительную шпильку. Вращением наводящего винта алидады изменяют отсчет по горизонтальному кругу на величину c . При этом, если второй полуприем был при круге «лево», то величину c нужно алгебраически сложить (с учетом знака) с отсчетом на круге. Если второй полуприем был при круге «право», то c необходимо вычитать (также с учетом знака) из отсчета, который был на круге. После этого, наблюдая в зрительную трубу, юстировочными горизонтальными винтами сетки нитей вводят изображение точки в середину биссектора (или совмещают с вертикальной нитью) и снова повторяют поверку.

Проверка условия 5. Ошибка в отсчете по горизонтальному кругу от неперпендикулярности горизонтальной оси вращения трубы вертикальной оси инструмента пропорциональна тангенсу угла наклона [см. формулу (VIII,25)] и поэтому при угле наклона, равном нулю, она тоже равна нулю. Для выявления этой ошибки поверку следует производить при углах наклона, больших 30° .

Для проверки теодолит устанавливают на расстоянии приблизительно 10—20 м от высокого предмета (стена здания, столб и т. п.) и тщательно нивелируют. Крест сетки нитей зрительной трубы наводят на высоко расположенную хорошо видимую точку M . Затем трубу приводят в горизонтальное положение и на предмете отмечают точку m_1 , изображение которой совпадает с крестом нитей. После этого переводят трубу через зенит и снова наводят на точку M . Закрепив алидаду, приводят трубу в горизонтальное положение и вновь отмечают на предмете проекцию креста нитей m_2 . Если расстояние l между точками m_1 и m_2

$$l > 4\tau \operatorname{tg} \alpha \frac{d}{\rho}, \quad (\text{VIII},34)$$

где τ — цена деления уровня алидады;

α — угол наклона визирной оси, наведенной на точку M ;

d — расстояние от оси вращения трубы до предмета, то отмечают третью точку на середине отрезка m_1m_2 и на нее наводят крест сетки нитей. Затем устанавливают трубу под углом наклона так, чтобы в поле зрения оказалась точка M , и исправительными винтами подставки трубы поднимают или опускают конец горизонтальной оси до тех пор, пока точка M не окажется на вертикальной нити (или в биссекторе) сетки нитей.

В конструкциях новых теодолитов не предусматриваются исправительные винты для этих целей, поэтому исправление возможно только в мастерской.

Проверка условия 6. Проверка осуществляется двойным нивелированием. Для этого на расстоянии 50—100 м от теодолита на кол, забитый в землю, устанавливают нивелирную рейку. Наводят крест нитей на рейку, и после приведения пузырька уровня при трубе на середину ампулы берут отсчет по рейке a_1 и измеряют высоту инструмента i_1 . Затем меняют местами теодолит и рейку. Снова берут отсчет по рейке a_2 , и измеряют высоту инструмента i_2 . Вычисляют ошибку в отсчете по рейке от непараллельности визирной оси зрительной трубы оси цилиндрического уровня:

$$x = \frac{a_1 + a_2}{2} - \frac{i_1 + i_2}{2}. \quad (\text{VIII}, 35)$$

Если $x > \pm 4$ мм, то производят исправление. Для этого из последнего отсчета a_2 вычитают x (с учетом знака x) и микрометренным винтом совмещают крест нитей с исправленным отсчетом, после чего исправительными винтами уровня при трубе выводят пузырек на середину. Исправление достигается в один-два приема.

Исследование условия 7 (эксцентриситета алидады). В инструментах с двумя отсчетными устройствами влияние эксцентриситета исключается определением среднего арифметического из отсчетов по обоим отсчетным устройствам. В инструментах с двусторонними оптическими микрометрами отсчеты свободны от влияния эксцентриситета. Для исключения влияния эксцентриситета алидады при измерении углов теодолитами с односторонними отсчетными устройствами рекомендуется вести измерения методом приемов при двух положениях вертикального круга.

Исследование эксцентриситета алидады описано в § 64.

Проверка условия 8 (места нуля). Определяют место нуля MO или место зенита MZ из наблюдения точки при двух положениях вертикального круга. Если место нуля (место зенита) не равно нулю, его приводят к нулю. Для этого вычисляют вертикальный угол (зенитное расстояние) и определяют соответствующий ему отсчет по вертикальному кругу, который бы получился, если бы место нуля (место зенита) было равно нулю. Затем, если теодолит имеет уровень при алидаде вертикального круга, не меняя положения трубы, микрометренным винтом алидады вертикального круга совмещают ее нуль с вычисленным отсчетом. Исправительными винтами уровня пузырек выводят на середину.

Если отсчетным устройством в теодолите является оптический микрометр, то на указанный отсчет вначале устанавливают микрометр, а затем алидаду. Если теодолит имеет уровень только при алидаде горизонтального круга, то после установки микрометренным винтом трубы вычисленного отсчета по вертикальному кругу вертикальными исправительными винтами сетки крест нитей совмещают с изображением визируемой точки.

В теодолитах, в которых уровень заменен компенсатором, место нуля исправляют также при помощи вертикальных исправительных винтов сетки нитей. Зрительную трубу устанавливают на отсчет.

соответствующий измеренному при $MO = 0$ и крест сетки нитей совмещают с изображением точки визирования.

Исследование условия 9. Исследование устойчивости положения визирной оси сводится к вычислению значений коллимационной ошибки, которую определяют, наводя трубу на предметы, удаленные от теодолита на расстояния 20, 50, 100, 200, 400 и 1000 м. Если значения коллимационных ошибок будут равны — условие выполнено, если не равны, то коллимационную ошибку следует исправить для того расстояния, при котором больше всего придется работать с теодолитом. Колебания между значениями двойной коллимационной ошибки, полученными при разных расстояниях, не должны превышать 10".

Исследование условия 10. Вертикальную ось теодолита тщательно устанавливают в отвесное положение при помощи хорошо отъюстированного уровня алидады. При этом зажимной винт лимба должен быть закреплён, а зажимной винт алидады отпущен. Затем зажимной винт алидады закрепляют и отпускают зажимной винт лимба.

Вращая алидаду вместе с лимбом, следят за уровнем при алидаде горизонтального круга. Если пузырек уровня не смещается с середины — условие выполнено. Если пузырек смещается более чем на половину деления — условие нарушено.

Исправление этого дефекта невозможно. При работе с инструментом, у которого пузырек смещается более чем на одно деление, необходимо после каждого поворота инструмента вокруг оси лимба устанавливать вертикальную ось по уровню подъемными винтами в отвесное положение.

Исследование условия 11. Теодолит устанавливают на штативе так, чтобы один из подъемных винтов треножника расположился в направлении хорошо видимой точки местности; приводят вертикальную ось инструмента в отвесное положение и наводят крест нитей зрительной трубы на выбранную точку. Затем наклоняют теодолит подъемным винтом на предельный угол компенсации (отсчитываемый по уровню алидады горизонтального круга) в направлении точки визирования; наводят крест нитей на ту же точку и делают отсчет по вертикальному кругу. Затем наклоняют теодолит тем же подъемным винтом в обратном направлении на предельный угол компенсации и, наведя крест нитей на ту же точку, вновь берут отсчет по вертикальному кругу.

Разность между двумя отсчетами не должна превышать 0,1 деления шкалы отсчетного микроскопа. Если во время исследования обнаруживается систематическая ошибка, превышающая в два раза допустимое расхождение, теодолит необходимо сдать в ремонт.

Кроме всех этих поверок после получения инструмента с завода или из ремонта производят исследование качества изображения, даваемого зрительной трубой, рена отсчетного приспособления, цены деления уровней и их чувствительности, плавности хода подъемных и наводящих винтов.

Средняя квадратическая ошибка (μ) измерения горизонтального угла из одного приема для данного теодолита вычисляется по отклонениям от среднего значения, полученного не менее чем из 12 приемов,

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{m-1}}, \quad (\text{VIII},36)$$

где v_i — отклонения результатов отдельных измерений угла от среднего значения;

m — число приемов.

Измерение горизонтального угла производится в лабораторных условиях с перестановкой лимба между приемами на угол $\varphi = 15^\circ$.

Г Л А В А IX

ТАХЕОМЕТРЫ

§ 70. НОВЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ «ТАХЕОМЕТРЫ»

В 1964 г. утвержден ГОСТ 10812—64 «Тахеометры». Этот стандарт распространяется на оптико-механические тахеометры, авто- и полуавтоматы, предназначенные для непосредственных измерений превышений и расстояний, а также для измерения горизонтальных и вертикальных углов.

Стандарт предусматривает три типа тахеометров.

Тахеометр авторедукционный ТА, позволяющий автоматически делать превышения и расстояния, редуцированные на горизонтальную плоскость, при наведении трубы на вертикальную рейку.

Тахеометр ТА предназначен для тахеометрических съемок, инженерных работ и инженерных изысканий.

II. Тахеометр полуавтомат ТП, позволяющий определять расстояния, автоматически редуцированные на горизонтальную плоскость, а превышения — неавтоматически по измеренному углу наклона при наведении зрительной трубы на горизонтальную или вертикальную рейку.

Тахеометр ТП предназначен для полигонометрических ходов с относительной ошибкой измерения сторон порядка $1 : 5000$ и тахеометрических съемок.

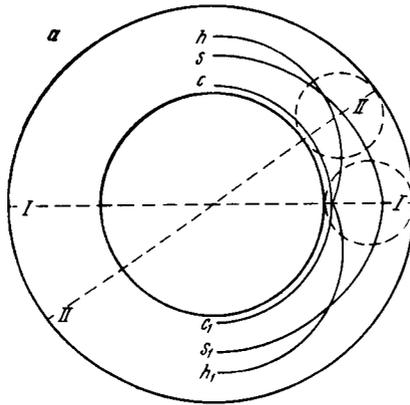
III. Тахеометр внутрибазный ТВ, позволяющий автоматически и полуавтоматически определять горизонтальные расстояния и превышения при наведении зрительной трубы на местный предмет (уровень) или специальную марку.

Тахеометр ТВ предназначен для тахеометрических съемок трудных участков и открытых горных работ.

В этой главе мы не рассматриваем круговых тахеометров (теодолитов с вертикальными кругами и дальномерными нитями), которые описаны в § 61 главы VII.

§ 71. ТАХЕОМЕТРЫ-АВТОМАТЫ

В основе создания тахеометра-автомата лежит идея проф. Е. Мера использования особых диаграмм, заменяющих обычные номерные нити. На этих диаграммах нанесены кривые, расстояния между которыми меняются с изменением угла наклона ν в со-



ствии с формулами для деления горизонтальных стояний и разности в Изображения диаграммы проектируются в плоскость той диафрагмы зрительной трубы.

Диаграмма представляет собой кольцо из оптического стекла, центр которого совпадает с осью вращения трубы, а диаметр $I-I$ параллелен уровню алидады вертикального круга. На этом кольце нанесены кривые (рис. 138, а) основных горизонтальных расстояний ss_1 ; кривых превышений hh_1 .

Основной круг — ось симметрии, проведенная радиально из центра кольца. Кривые горизонтальных расстояний и превышений наносят, исходя из следующих соображений.

Пусть в точке A установлен тахеометр, а в точке B — рейка (рис. 138, б). Обозначим: $AB = BC = i$ — высота инструмента; $BB_1 = h$ — превышение точки B над точкой A ; отметка на рейке высоты инструмента, на которую падает кривая ss_1 ; S — точка на рейке, в которую проектируется кривая ss_1 ; H — точка на

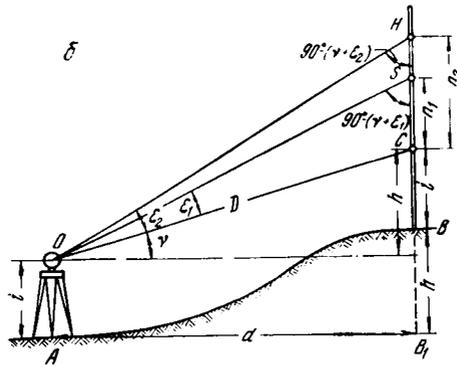


Рис. 138. Кривые диаграммы тахеометра-автомата

в которую проектируется кривая hh_1 ; ν — угол наклона визирования OC ; $D = OC$ — наклонное расстояние.

Из рис. 138, б следует:

$$d = D \cos \nu;$$

$$h = D \sin \nu;$$

$$D = n_1 \frac{\cos(\nu + \varepsilon_1)}{\sin \varepsilon_1} = n_1 (\operatorname{ctg} \varepsilon_1 - \operatorname{tg} \nu) \cos \nu; \quad (\text{IX},3)$$

$$D = n_2 \frac{\cos(\nu + \varepsilon_2)}{\sin \varepsilon_2} = n_2 (\operatorname{ctg} \varepsilon_2 - \operatorname{tg} \nu) \cos \nu, \quad (\text{IX},4)$$

где n_1 и n_2 — отрезки рейки от основного круга cc_1 до кривых ss_1 и hh_1 .

Подставляя значения D из формулы (IX,3) в уравнение (IX,1) и из формулы (IX,4) в уравнение (IX,2), получим

$$d = n_1 \cos^2 \nu (\operatorname{ctg} \varepsilon_1 - \operatorname{tg} \nu) \quad (\text{IX},5)$$

и

$$h = n_2 \frac{1}{2} \sin 2\nu (\operatorname{ctg} \varepsilon_2 - \operatorname{tg} \nu). \quad (\text{IX},6)$$

Учитывая, что знаки углов наклона ν могут быть положительными и отрицательными, формулам (IX,5) и IX,6) можно придать вид:

$$d = n_1 \cos^2 \nu (\operatorname{ctg} \varepsilon_1 \mp \operatorname{tg} \nu); \quad (\text{IX},7)$$

$$h = n_2 \frac{1}{2} \sin 2\nu (\operatorname{ctg} \varepsilon_2 \mp \operatorname{tg} \nu). \quad (\text{IX},8)$$

Обозначая расстояния между основным кругом и кривой расстояний через p_1 и расстояние между основным кругом и кривой превышений через p_2 , можно выразить катангенсы:

$$\operatorname{ctg} \varepsilon_1 = \frac{f}{p_1} \text{ и } \operatorname{ctg} \varepsilon_2 = \frac{f}{p_2},$$

где f — эквивалентное фокусное расстояние объектива и фокусирующей линзы.

Тогда формулы (IX,7) и IX,8) примут вид:

$$d = n_1 \cos^2 \nu \left(\frac{f}{p_1} \mp \operatorname{tg} \nu \right); \quad (\text{IX},9)$$

$$h = n_2 \frac{1}{2} \sin 2\nu \left(\frac{f}{p_2} \mp \operatorname{tg} \nu \right). \quad (\text{IX},10)$$

Обозначим:

$$\cos^2 \nu \left(\frac{f}{p_1} \mp \operatorname{tg} \nu \right) = k_1; \quad (\text{IX},11)$$

$$\frac{1}{2} \sin 2\nu \left(\frac{f}{p_2} \mp \operatorname{tg} \nu \right) = k_2 \quad (\text{IX},12)$$

и предположим, что значения p_1 и p_2 при измерении углов наклона ν меняются, но при этом $k_1 = 100$, а $k_2 = 20$.

Выведем формулы для определения расстояний p_1 и p_2 из формул (IX,11) и (IX,12):

$$p_1 = \frac{f \cos^2 \nu}{k_1 \pm \frac{1}{2} \sin 2\nu} = \frac{f \cos^2 \nu}{100 \pm \frac{1}{2} \sin 2\nu}; \quad (\text{IX},13)$$

$$p_2 = \frac{f \sin 2\nu}{k_2 \pm \sin^2 \nu} = \frac{f \sin 2\nu}{20 \pm \sin^2 \nu}. \quad (\text{IX},14)$$

С учетом уравнений (IX,11) и (IX,12) формулы (IX,9) и (IX,10) для вычисления горизонтальных расстояний и превышений примут вид:

$$d = k_1 n_1; \quad (IX,15)$$

$$h = k_2 n_2. \quad (IX,16)$$

Блок призм и объективов, укрепленных на зрительной трубе, проектирует изображение кривых неподвижной диаграммы в плоскость сетки нитей.

Рассмотрим два положения зрительной трубы: *I* — визирная ось горизонтальна; *II* — визирная ось наклонена (см. рис. 138, *a* и 139).

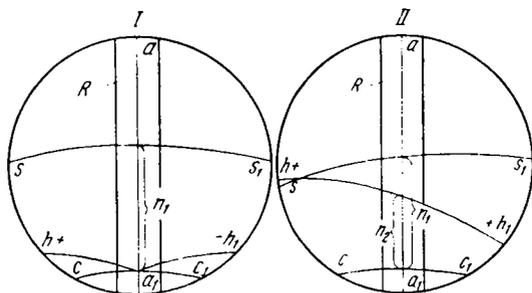


Рис. 139. Схема взятия отсчета по диаграммам

В первом случае вертикальная нить сетки нитей aa_1 будет проектироваться на кривые так, как это показано на рис. 139, *I*. Если вертикальную нить навести на рейку, то между основным кругом cc_1 и кривой ss_1 окажется отрезок рейки n_1 , который соответствует горизонтальному расстоянию, а между основным кругом и кривой hh_1 окажется отрезок $n_2 = 0$, так как при $v = 0$, превышение $h = 0$.

Во втором случае вертикальная нить займет положение *II* относительно диаграммы (рис. 139, *II*). При этом на рейке будут отсечены отрезки n_1 и n_2 , соответствующие: первый — горизонтальному проложению, а второй — превышению. Зная, что $k_1 = 100$, а $k_2 = 20$, наблюдатель непосредственно с рейки берет отсчеты n_1 и n_2 и определяет горизонтальное проложение и превышение по формулам (IX,15) и (IX,16).

Редукционный тахеометр Dahlta-020, изготавливаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР), позволяет вести измерение горизонтальных и вертикальных углов со средней квадратической ошибкой $\pm 5''$. Тахеометр предназначен для производства тахеометрической съемки как тахеометр-автомат.

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная. Тахеометр отделяется от подставки 5, к которой он крепится винтом 6 (рис. 140). Зажимные винты алидады и зрительной трубы 2 выполнены в виде рычажков — их микрометренными винтами являются

винты 4 и 3. Совместное вращение горизонтального лимба с алидадной частью возможно при включении защелки 7. На алидаде укреплены круглый и цилиндрический 8 уровни. Алидада вертикального круга имеет цилиндрический контактный уровень, пузырек которого выводится на середину при помощи винта 9. Отсчетным устройством кругов является шкаловый микроскоп, окуляр 10 которого расположен рядом с окуляром 11 зрительной трубы.

Оптическая схема отсчетного устройства показана на рис. 141. Отразившись

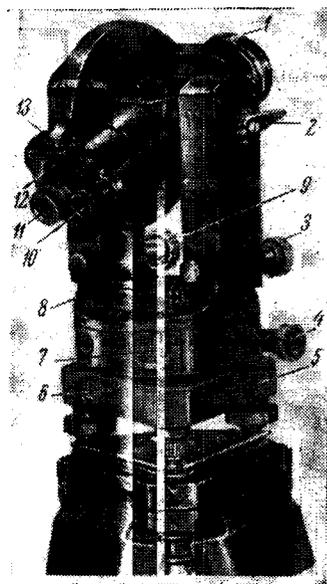


Рис. 140. Тахеометр-автомат Dabhta-020

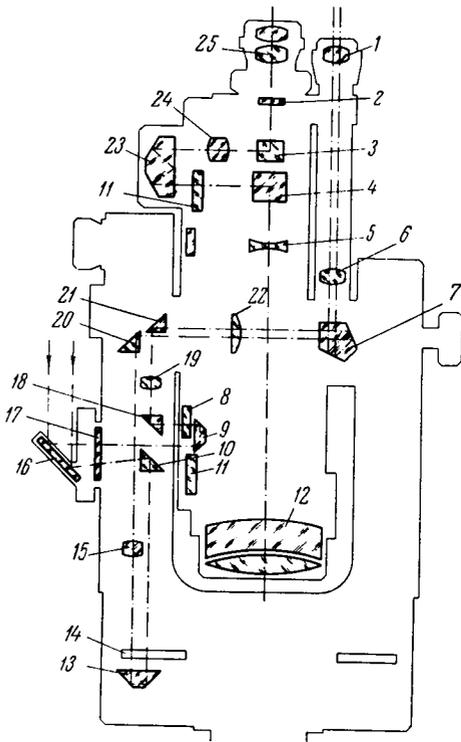


Рис. 141. Оптическая схема тахеометра Dabhta-020

от зеркала 16, лучи света проходят иллюминатор 17 и разделяются на два пучка. Пучок лучей, проходящий через призму 10, освещает горизонтальный лимб 14, другой пучок, проходящий через призму 9, освещает вертикальный лимб 8. Далее объектив 15 при помощи призм 13 и 20 строит изображение штрихов горизонтального круга в плоскости коллектива 22, на который нанесены шкалы отсчетного микроскопа, а объектив 19 при помощи призм 18 и 21 в той же плоскости строит изображение штрихов вертикального круга. Изображения штрихов кругов и шкал рассматриваются через отсчетный микроскоп, состоящий из пентапризмы 7, объектива 6 и окуляра 1.

Телеобъектив 12, 5 при помощи призм 4 строит изображение рейки на диаграмме 11 кривых расстояний и превышений. Далее объектив 24 при помощи призм 23 и 3 строит изображения рейки и кривых в плоскости сетки нитей 2, которая рассматривается через окуляр 25.

Поле зрения трубы показано на рис. 142. Отсчет горизонтального расстояния: $0,476 \cdot 100 = 47,6 \text{ м}$. Отсчет превышения: $0,702 \cdot (-10) = -7,02 \text{ м}$ при коэффициенте -10 или $0,351 \text{ м} \cdot (-20) = -7,02 \text{ м}$ при коэффициенте -20 .

В тахеометре Dahlta-020, в соответствии с формулой (IX,14) нанесены кривые превышений с коэффициентами $k'_2 = \pm 10$; $k''_2 = \pm 20$ и $k'''_2 = \pm 100$. Это позволяет увеличить диапазон углов наклона, так как кривые с коэффициентами k'_2 и k''_2 при больших углах наклона оказываются за пределами поля зрения трубы.

Для грубой наводки на цель зрительная труба снабжена визирным приспособлением 1, 13. Труба

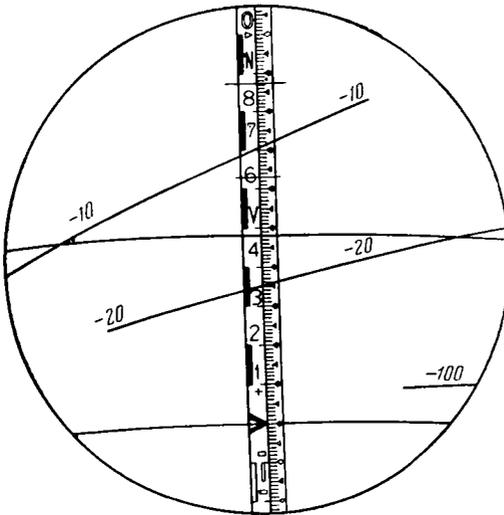


Рис. 142. Поле зрения трубы тахеометра Dahlta-020

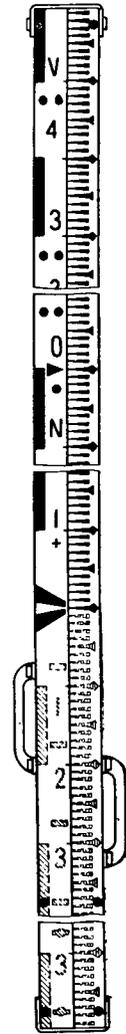


Рис. 143. Рейка к тахеометру Dahlta-020

фокусируется кольцом 12 (см. рис. 140). К тахеометру прилагаются две четырехметровые рейки (рис. 143). Нулевой индекс рейки находится на высоте 1,4 м; на эту высоту следует устанавливать ось вращения трубы тахеометра.

При измерении углов наклона дугу основного круга cc_1 следует наводить на точки визирования.

Тахеометр-автомат ТА-2. Отечественный тахеометр ТА-2, экспериментальные образцы которого были выпущены в 1961 г., предназначен для тахеометрической съемки.

Система вертикальных осей цилиндрическая неповторительная с перестанавливающимся лимбом. Перестановка лимба осуществляется при помощи винта 5 (рис. 144). Тахеометр легко отделяется от подставки 7. Закрепление алидады и зрительной трубы производится зажимными винтами 6 и 12, а микрометрическое их движение — соответственно винтами 9 и 11. Алидада горизонтального круга имеет круглый 10 и цилиндрический 4 уровни. Освещение горизонтального круга осуществляется зеркалом 8.

Отсчет по горизонтальному кругу производится по шкаловому микроскопу с точностью до $0',1$. Окуляр отсчетного микроскопа находится рядом с окуляром зрительной трубы, которая фокусируется винтом 1. На подставке трубы можно установить буссоль 2.

Оптическая схема тахеометра ТА-2 показана на рис. 145, а. Отразившись от нижнего зеркала 12, лучи света через призму 11 освещают горизонтальный круг 10. Далее объектив 16 при помощи призм 15 и 17 строит изображение штрихов горизонтального круга в плоскости коллектива 18, на которой нанесена шкала отсчетного микроскопа. Изображения штрихов горизонтального лимба и отсчетной шкалы рассматриваются при помощи призмы 19 через отсчетный микроскоп, состоящий из объектива 20 и окуляра 21.

Неподвижный вертикальный круг 5 (диаграммы) освещается верхним зеркалом 6, укрепленным на кожухе вертикального круга, вращающимся вместе со зрительной трубой. Вертикальный круг 5 жестко скреплен с уровнем алидады вертикального круга, пузырек которого выводится на середину ампулы микрометрическим винтом алидады (на рис. 144 виден патрон 3 пружины этого винта). Зеркало 6 и блок призм 3, 4, 7 и 9 с объективом 8 вращаются вместе с трубой и строят изображения штрихов лимба, основного круга и кривых расстояний и превышений в плоскости, по которой склеена призма 2. На этой плоскости имеется зеркало из амальгамы a в виде буквы Г (рис. 145, б). От этого зеркала отражается и попадает в окуляр 1 только часть изображения вертикального круга, ограниченная

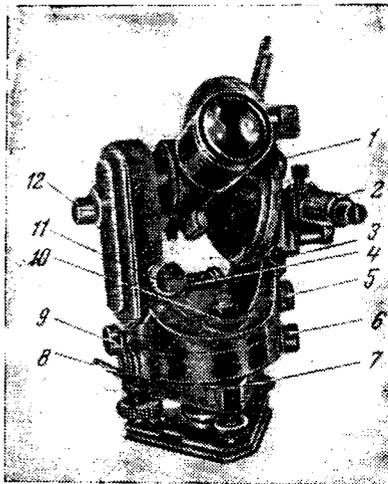


Рис. 144. Тахеометр ТА-2

поверхностью амальгамы *a*. Остальные лучи проходят плоскость склеивания и рассеиваются.

Для лучей, идущих через телеобъектив *13, 14*, призма *2* (рис. 145, *a*) является плоско-параллельной пластинкой, а ее плоскость, показанная пунктиром, *b* (рис. 145, *б*) является плоскостью промежуточного

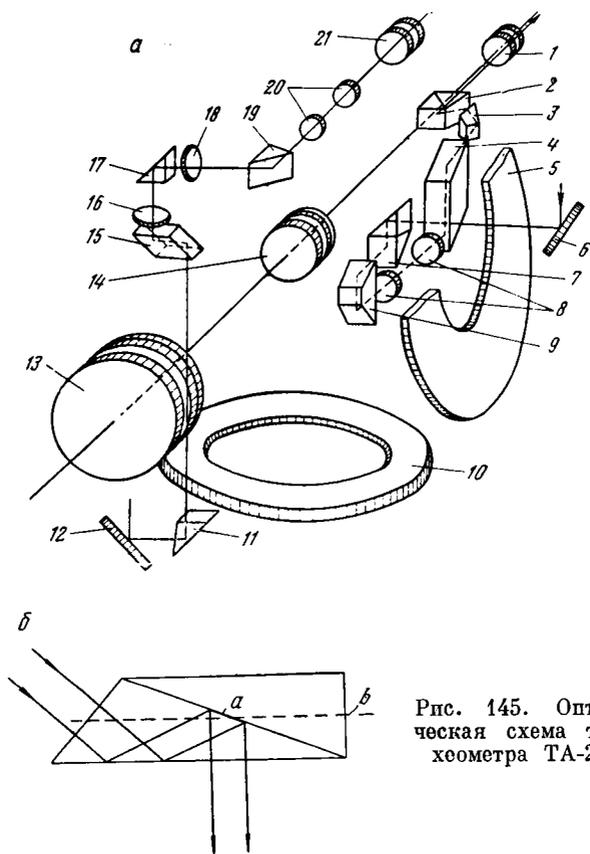


Рис. 145. Оптическая схема тахеометра ТА-2

изображения зрительной трубы, в которой строится изображение рейки. В плоскости склейки призмы имеются два горизонтальных дальномерных штриха и вертикальный индекс для отсчета зенитных расстояний. Возможность совмещения изображения рейки с зеркальной кромкой позволяет брать точные отсчеты по кривым. На рис. 146, *a* показано поле зрения отсчетного микроскопа горизонтального круга.

В поле зрения окуляра зрительной трубы видим картину, показанную на рис. 146, *б*. Здесь *h* — основной круг; *s* — кривая расстояний; $+20$ и $+100$ — кривые превышений. Отсчет расстояния: $0,173 \cdot 100 = 17,3$ м, отсчеты по кривым превышений: $0,311 \cdot (+20) =$

$= +6,22 \text{ м}$ и $0,062 \cdot (+100) = +6,20 \text{ м}$. Отсчет по вертикальному кругу равен $Z = 70^\circ 10'$ или $\nu = 90^\circ - 70^\circ 10' = +19^\circ 50'$.

В настоящее время на базе тахеометра ТА-2 разрабатывается новый тахеометр-автомат.

Тахеометр с круговой диаграммой ТА-D1, изготовляемый заводом МОМ (ВНР), предназначен для определения по вертикально

установленной рейке горизонтальных расстояний и превышений, а также для измерения горизонтальных и вертикальных углов.

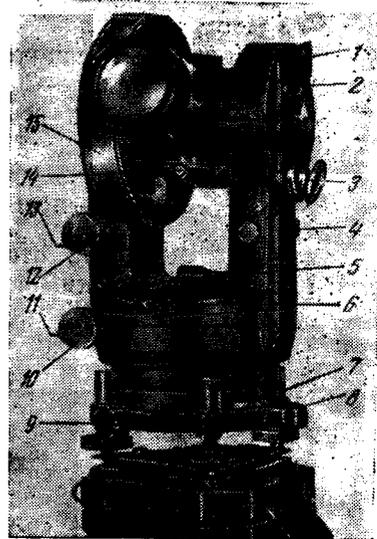
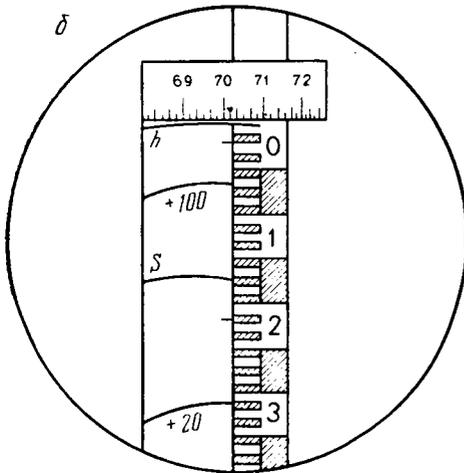
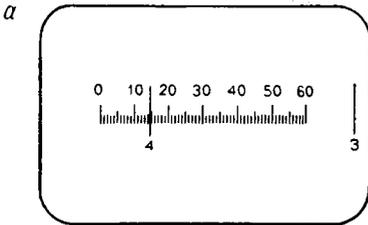


Рис. 146. Поле зрения отсчетного микроскопа равно $4^\circ 14'$, 5 и поле зрения трубы тахеометра ТА-2

Рис. 147. Тахеометр-автомат ТА-D1

Средняя квадратическая ошибка измерения углов из одного приема $\pm 6''$. В тахеометре ТА-D1 в отличие от тахеометра Dahlta-020 кольцо диаграммы при вращении зрительной трубы вокруг горизонтальной оси поворачивается в противоположную сторону с той же угловой скоростью, что и труба. Следовательно, диаграмма поворачивается относительно трубы на удвоенный угол наклона (2ν). Это позволило применить диаграмму Беззег-Димота, на которой кривые горизонтальных расстояний и превышений более пологи и являются дугами окружностей, что облегчает их изготовление с высокой точностью.

Вертикальные оси тахеометра ТА-D1 такие же, как у теодолита ТЕ-D2 (см. рис. 42, а и § 34).

Тахеометр отделяется от подставки, в которой он закрепляется и центрируется при помощи винта 9 (рис. 147). Ось алидады цилиндрическая пустотелая, в ней располагаются детали оптического отвеса, окуляр 6 которого расположен на алидаде.

Перестановка лимба осуществляется винтом 7. Зажимные рычажки алидады 11 горизонтального круга и зрительной трубы 13 соосны с их микрометренными винтами 10 и 12.

Кроме круглого уровня 8 тахеометр имеет цилиндрический уровень 5 алидады горизонтального круга и уровень 2 алидады вертикального круга, пузырек которого при помощи контактной системы рассматривается через поворотную призму 1. Пузырек этого уровня выводится на середину ампулы микрометренным винтом 4 алидады вертикального круга. Подсветка кругов осуществляется зеркалом 3.

Оптическая схема диаграммы кривых аналогична оптической схеме тахеометра Dahlta-020. Диаграмма закрыта чехлом 15. Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку. На трубе укреплен оптический визир 14.

§ 72. РЕДУЦИОННЫЙ ТАХЕОМЕТР REDTA-002

Тахеометр Redta-002 относится к тахеометрам полуавтоматам типа ТП. Это оптический теодолит, снабженный оптико-механическим редуцирующим устройством, позволяющим определять горизонтальные расстояния с точностью 1 : 5000.

Цена деления стеклянного лимба тахеометра 1°. На вертикальном лимбе кроме градусной шкалы с зенитной оцифровкой нанесена тангенциальная шкала с ценой деления 0,001. Горизонтальные направления определяются со средней квадратической ошибкой из одного приема $\pm 5''$.

Система вертикальных осей цилиндрическая повторительная. Совместное вращение горизонтального лимба с алидадой возможно при включении защелки 8 (рис. 148). Тахеометр легко отделяется от подставки 10, в которой он закрепляется винтом 9. Зажимные винты алидады и зрительной трубы выполнены в виде рычажков (на

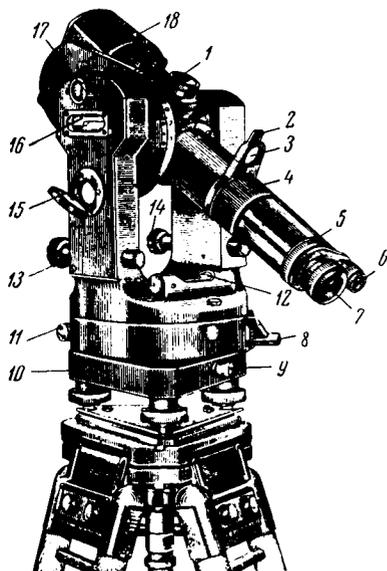


Рис. 148. Тахеометр Redta-002

рис. 148 не видны), микрометренные винты алидады 11 (патрон пружины винта) и зрительной трубы 14 обычные.

Алидада горизонтального круга снабжена круглым и цилиндрическим 12 уровнями. Уровень 16 алидады вертикального круга скрыт в подставке трубы; его пузырек рассматривается при помощи контактной системы через поворотную призму 17 и выводится на середину микрометренным винтом 13 алидады вертикального круга.

Отсчеты по кругам производятся по шкаловому микроскопу, окуляр 6 которого расположен рядом с окуляром 7 зрительной трубы. Круги освещаются зеркалом 15. Поле зрения отсчетного микроскопа показано на рис. 149. Отсчет по тангенциальной шкале позволяет определить превышение по формуле

$$h = d \operatorname{tg} v, \quad (\text{IX}, 17)$$

где d — горизонтальное расстояние, определяемое при помощи редуцирующего устройства.

Оптическая схема зрительной трубы показана на рис. 150.

Параллактический угол дальномера двойного изображения тахеометра образуется при помощи компенсатора, состоящего из двух одинаковых ахроматических оптических клиньев 3 и 4, вращающихся при наклонах трубы в противоположных направлениях вокруг визирной оси.

При горизонтальном положении оси визирования оба клина расположены так, чтобы их преломляющие ребра направлены в

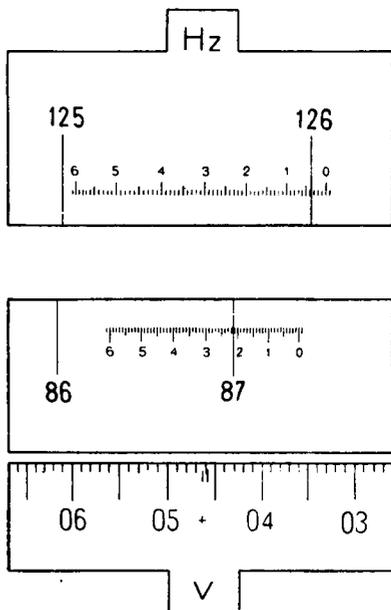


Рис. 149. Поле зрения шкалового микроскопа тахеометра Redta-002. Отсчеты равны: по горизонтальному кругу $126^{\circ}3'45''$; по вертикальному кругу $87^{\circ}21'30''$; по шкале тангенсов 0,0462

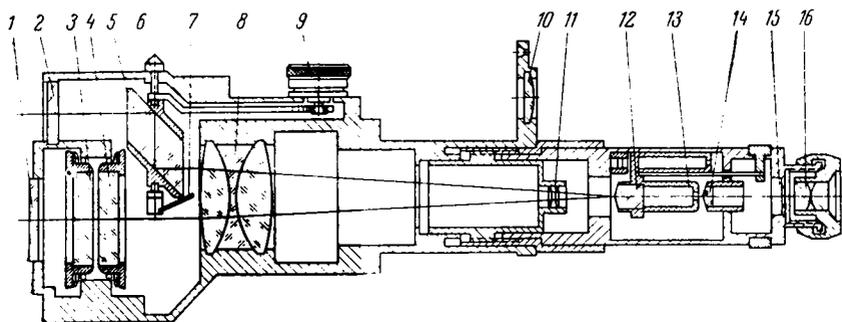


Рис. 150. Оптическая схема зрительной трубы Redta-002

сторону вертикального круга. В этом случае параллактический угол имеет максимальное значение и равен $\beta = 2\varepsilon = 34' 22'',6$, где в соответствии с формулой (I,17) $\varepsilon = (n - 1)\sigma = 17' 11'',3$.

Зубчатая передача, при помощи которой поворачиваются клинья 3 и 4, имеет минимальные люфты и поворачивает каждый клин точно на величину угла наклона ν .

Клинья компенсатора перекрывают нижнюю половину отверстия объектива 8. Перед ними установлен юстировочный оптический клин 1 с малым преломляющим углом. При помощи этого клина коэффициент дальномера приводится к 100.

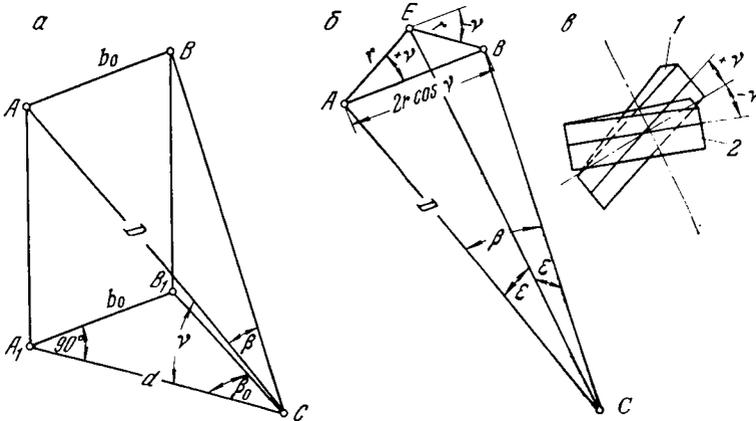


Рис. 151. Схемы к теории редуцирующего устройства тахеометра Redta-002

Верхняя половина отверстия объектива перекрывается ромб-призмой 5, поворачивающейся вокруг вертикальной оси 6, 7. Действие ромб-призмы эквивалентно действию плоско-параллельной пластинки, толщина которой равна длине хода луча в призме. Для герметизации перед ромб-призмой установлена плоско-параллельная пластинка 2. Ромб-призма поворачивается при помощи барабанчика 9, на ободке которого нанесена шкала с 20 делениями. При повороте барабанчика на длину всей шкалы визирный луч смещается параллельно своему положению на величину 0,2 см, равную точности верньера рейки. Следовательно, цена деления шкалы равна 0,01 см. Отсчет по барабанчику берут при помощи лупы 10. Для производства отсчета по шкале барабанчика 1 служит отверстие 3 (см. рис. 148).

Пройдя объектив, лучи, несущие полуизображения рейки, проходят фокусирующую линзу 11 (см. рис. 150) и разделяющее устройство, состоящее из бипризмы 12 (она же коллектив) и диафрагмы 13. Затем объектив 14 строит прямое изображение в плоскости полевой диафрагмы 15, которое рассматривается через окуляр 16. Разделяющее устройство может выключаться при помощи кольца 5 (см. рис. 148).

Фокусировка трубы осуществляется кольцом 4. На зрительной трубе имеется визирное приспособление 2, 18.

Рассмотрим принцип работы редукционного устройства, который состоит в том, чтобы при наклонном положении зрительной трубы получить по рейке отсчет b_0 , соответствующий горизонтальному расстоянию d .

Пусть на рис. 151, а имеем: C — точка стояния тахеометра; CA_1 и CB_1 — лучи, образующие параллактический треугольник, соответствующий горизонтальному расстоянию d до точки A ; $A_1B_1 = b_0$ — базис, соответствующий горизонтальному расстоянию d ; CA и CB — лучи, образующие параллактический треугольник, соответствующий наклонному расстоянию $D = \frac{d}{\cos \nu}$ при условии, что $AB = A_1B_1 = b_0$; $\beta_0 = 2\varepsilon$ — параллактический угол, соответствующий горизонтальному расстоянию d ; β — параллактический угол, соответствующий наклонному расстоянию D .

Из рис. 151, а следует:

$$D = b_0 \operatorname{ctg} \beta = \frac{b_0}{\operatorname{tg} \beta}; \quad (\text{IX}, 18)$$

$$d = b_0 \operatorname{ctg} \beta_0 = \frac{b_0}{\operatorname{tg} \beta_0}; \quad (\text{IX}, 19)$$

$$d = D \cos \nu. \quad (\text{IX}, 20)$$

Разделим равенство (IX,19) на (IX,18) и, учитывая формулу (IX,20) напишем

$$\frac{d}{D} = \cos \nu = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta_0}.$$

Углы β и β_0 имеют малые значения, поэтому окончательно получим

$$\beta = \beta_0 \cos \nu. \quad (\text{IX}, 21)$$

Рассмотрим рис. 151, б: CA — луч, идущий от точки A через верхнюю часть трубы (неотклоненный); CB — луч, идущий от той же точки через нижнюю часть трубы (отклоненный вращающимися клиньями). Под действием клина 1 (рис. 151, в) изображение точки A переместится в точку E на расстояние r , а под действием клина 2 изображение точки A из точки E переместится в точку B на то же расстояние.

Из рис. 151, б следует:

$$\varepsilon = \frac{r}{D}; \quad (\text{IX}, 22)$$

$$\beta = \frac{2r}{D} \cos \nu, \quad (\text{IX}, 23)$$

откуда

$$\beta = 2\varepsilon \cos \nu,$$

а так как $2\varepsilon = \beta_0$, то с учетом формулы (IX,21) получим

$$\beta = \beta_0 \cos \nu.$$

Следовательно, вращающиеся клинья при наблюдении рейки под углом наклона ν образуют параллактический угол β , ограничивающий на рейке отсчет b_0 , соответствующий горизонтальному расстоянию d .

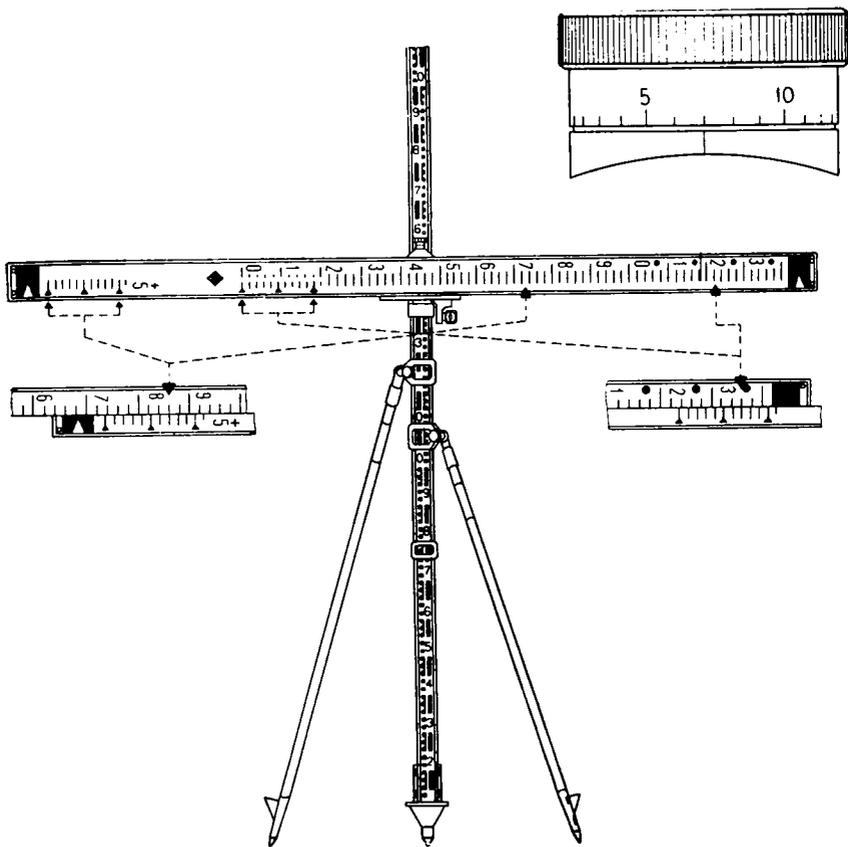


Рис. 152. Дальномерная рейка и схема отсчитывания

К тахеометру Redta-002 прилагаются две рейки, устанавливаемые на штангах (рис. 152) или на штативах. Длина каждой рейки 2,09 м. На рейках нанесены: основная шкала с ценой деления 2 см; два верньера с точностью отсчета 0,2 см и две марки, расстояния между которыми равны 2 м. Внешний верньер сдвинут относительно внутреннего на 50 см.

На рис. 152 показана схема отсчитывания.

Отсчет складывается из отсчетов по внутреннему (123,4 м плюс 0,07 м, считанные с барабана микрометра) и внешнему верньерам (73,5 м + 50 м + 0,07 м = 123,47 м).

§ 73. БАЗИСНЫЙ РЕДУКЦИОННЫЙ ТАХЕОМЕТР ВРТ-006

К тахеометрам типа ТВ относится редуцированный тахеометр ВРТ-006, изготавливаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР). Он предназначен для съемок труднодоступных участков, сильно застроенных территорий и открытых горных разработок.

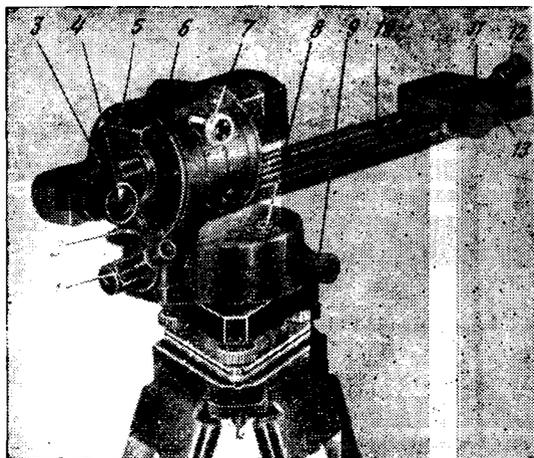


Рис. 153. Тахеометр ВРТ-006

Его дальномер двойного изображения позволяет измерять горизонтальные расстояния до 60 м без установки рейки в точке визирования. При измерении расстояний до 90 м используется специальная марка, а при измерении расстояний до 180 м — горизонтальная рейка. Марка и рейка устанавливаются в точке визирования.

При помощи тахеометра можно измерять горизонтальные углы со средней квадратической ошибкой $\pm 15''$ и вертикальные углы со средней квадратической ошибкой $\pm 20''$.

Отсчеты по горизонтальному и вертикальному лимбам производятся по шкаловому микроскопу 1 (рис. 153). Наименьшее деление на лимбах 1° ; наименьшее деление на отсчетных шкалах $5''$. Следовательно, точность отсчета с оценкой десятых долей на глаз составляет $\pm 30''$. Лимбы освещаются зеркалом 2 (см. рис. 153).

Вертикальная ось тахеометра неповторительная, но возможна перестановка лимба специальным винтом. Тахеометр имеет зажимные винты алидады горизонтального круга и зрительной трубы 6

и соответствующие им микрометрические винты 9 и 7. Тахеометр снабжен круглым 8 и цилиндрическим 5 уровнями.

Зрительная труба с окуляром 4 имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 3 (рис. 153). Она состоит из объектива 5, (рис. 154), фокусирующей линзы 4, призмы 3, бипризмы 1 с нанесенными на ней тремя вертикальными штрихами и окуляра 2.

Верхнюю половину объектива 5 перекрывает неподвижная пентапризма 7, а нижнюю — подвижная пентапризма 9. Подвижная пентапризма может перемещаться вдоль базисной линейки 8. Постоянный параллактический угол β_0 образуется неподвижной пентапризмой 7, у которой угол между гранями $\angle BC$ и ED равен $45^\circ - \frac{\beta_0}{2}$ и

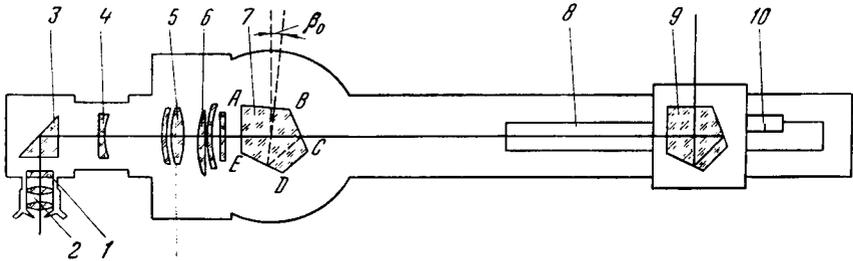


Рис. 154. Оптическая схема тахеометра BRT-006

угол A равен $90^\circ - \beta_0$. Поэтому, если подвижная призма 9 поворачивает луч, идущий от точки визирования на 270° , то неподвижная пентапризма 7 поворачивает этот же луч на $270^\circ - \beta_0$. Это приводит к образованию прямоугольного треугольника с постоянным параллактическим углом β_0 и переменным базисом b . Наклонное расстояние D вычисляется по формуле

$$D = b \operatorname{ctg} \beta_0 = bk. \quad (\text{IX}, 24)$$

Грубое перемещение призмы 9 (рис. 154) по базисной линейке 10 достигается при нажатии на рычаг 13 (см. рис. 153), а микрометрическое — при помощи винта 11. Величина базиса b отсчитывается при помощи лупы 12 по шкале с ценой деления $0,5 \text{ мм}$ до десятых долей, т. е. с точностью $\pm 0,05 \text{ мм}$, что при коэффициенте дальномера $k = \operatorname{ctg} 17', 2 = 200$ соответствует расстоянию в 1 см .

Редуцирование расстояний осуществляется автоматическим изменением параллактического угла β_0 дальномера в соответствии с изменением угла наклона v .

Пусть на рис. 155, a имеем: A — положение неподвижной пентапризмы; B — положение подвижной пентапризмы; $BC = D$ — наклонное расстояние до точки C ; b_0 — отсчет по базисной линейке, соответствующий горизонтальному расстоянию $BC_1 = D \cos v$; β_0 — постоянный параллактический угол, образованный пентапризмой 7 (см. рис. 154); β — параллактический угол, который должен быть

при визировании под углом наклона ν , чтобы отсчет по базисной рейке соответствовал горизонтальному расстоянию $BC_1 = D \cos \nu$.

Для определения значения $\Delta\beta = \beta_0 - \beta$ совместим плоскость ABC с плоскостью ABC_1 , повернув первую плоскость вокруг линии AB (рис. 155, б).

Из треугольника ACC_1 следует, что

$$\frac{\sin \Delta\beta}{D(1 - \cos \nu)} = \frac{\sin \beta_0 \cos \beta}{D},$$

откуда, учитывая, что β_0 и β углы малые, получим

$$\Delta\beta = \beta_0(1 - \cos \nu). \quad (\text{IX},25)$$

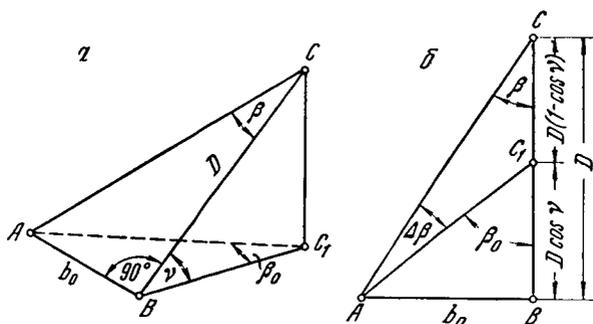


Рис. 155. Схемы к теории редуцирующего устройства тахеометра BRT-006

Следовательно, для того чтобы при визировании под углом наклона ν получить на базисной линейке отсчет b_0 (после совмещения двойного изображения), соответствующий горизонтальному расстоянию, необходимо, чтобы угол β_0 автоматически уменьшался по формуле (IX,25).

В тахеометре BRT-006 это достигается с помощью линзового компенсатора б, состоящего из двух линз и размещенного между неподвижной пентапризмой 7 и объективом 5 зрительной трубы (см. рис. 154).

При наклоне трубы под углом ν механическое устройство автоматически перемещает положительную компоненту компенсатора в плоскости измерительного треугольника так, что ее оптический центр смещается с оптической оси на $\Delta = f\varepsilon$. Для того чтобы редуцирование было правильным, необходимо выполнить условие $\varepsilon = \Delta\beta$, т. е.

$$\Delta\beta = \frac{\Delta}{f} = \beta_0(1 - \cos \nu),$$

откуда

$$\Delta = f\beta_0(1 - \cos \nu), \quad (\text{IX},26)$$

где f — фокусное расстояние положительной компоненты.

Редуцирующее устройство в тахеометре BRT-006 может отключаться. Это достигается при помощи рычажка, расположенного между линейкой и неподвижной призмой.

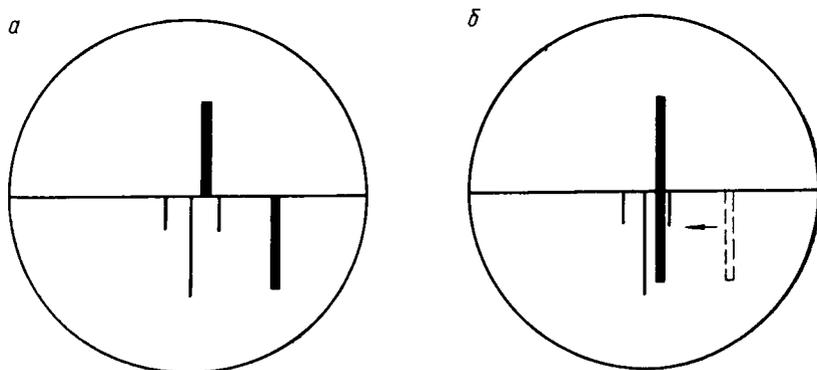


Рис. 156. Схема совмещения полуизображений марок в поле зрения трубы тахеометра BRT-006

При определении расстояний трубу наводят на цель. Двигая подвижную пентапризму, полуизображения цели (рис. 156, а) совмещают так, чтобы совмещенное изображение находилось в пределах крайних вертикальных штрихов рис. 156, б. В этом положении делают отсчет расстояния по шкале базисной линейки.

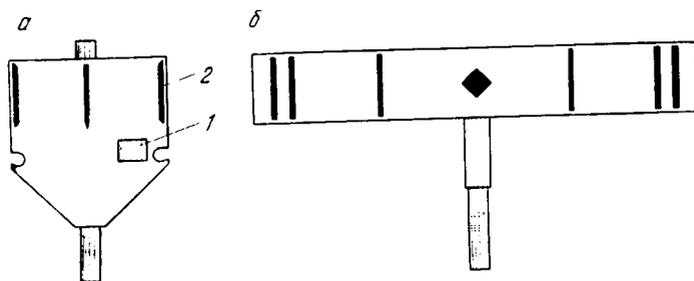


Рис. 157. Дальномерные марка и рейка к тахеометру BRT-006

При измерении горизонтальных углов на нижнее полуизображение цели наводят средний штрих. При измерении вертикальных углов на цель наводят линию раздела изображений.

Базисная линейка имеет длину 300 м. При помощи этой линейки можно измерять расстояния от 2 до 60 м. На рис. 157, а показана дальномерная марка, позволяющая измерять расстояния до 90 м, а на рис. 157, б — базисная рейка для измерения расстояний до 180 м.

Марка устанавливается на металлической вешке, приводимой в отвесное положение при помощи круглого уровня 1. Расстояние

между крайними штрихами 2 марки 15 см. При измерении расстояний с помощью марки совмещают полуизображения крайних штрихов и берут отсчет по шкале базисной линейки. Расстояние определяют по формуле

$$D = D' + 30 \text{ м}, \quad (\text{IX}, 27)$$

где D' — расстояние, взятое с базисной линейки.

Расстояния между средними штрихами рейки 30 см, а между крайними 60 см.

Совмещают полуизображения средних штрихов так, чтобы нижняя часть левого штриха совпала с верхней частью правого, берут отсчет по шкале базисной линейки и вычисляют расстояние

$$D = D' + 60 \text{ м}. \quad (\text{IX}, 28)$$

Совмещая аналогично полуизображения крайних марок, получают расстояние по формуле

$$D = D' + 120 \text{ м}. \quad (\text{IX}, 29)$$

Точность определения расстояний должна быть не ниже $\pm 0,0006 D$, м.

§ 74. СТОЛИК KARTIE-250

Столик Kartie-250 для картографирования, изготовляемый народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР), является дополнительным прибором для совместной работы с тахеометром Dahlta-020, теодолитом Theo-020, тахеометром Redta-002 и тахеометром BRT-006. При помощи столика Kartie-250 можно прямо на местности снимать планы тахеометрических станций, по которым в дальнейшем можно составлять общий топографический план.

Втулка инструмента вставляется во втулку подставки столика 4 (рис. 158) и закрепляется винтом 5, а алидада 1 соединяется с подвижной частью 3 столика Kartie при помощи устройства 2. При вращении столика совместно с алидадой 1 прибора, с помощью шестерен, находящихся внутри подвижной части 3, происходит вращение чертежной поверхности 6 столика в направлении, обратном вращению столика, так, что чертеж остается всегда неподвижным относительно местности.

Точки наносятся на чертеж при помощи специального устройства, состоящего из мостика 7, на котором смонтированы салазки 8 со сменной масштабной линейкой 11, маркировочное приспособление и отсчетный индекс расстояний 12. Салазки могут передвигаться параллельно коллимационной плоскости трубы и вращаться вместе с основным прибором относительно неподвижного плана.

Отсчет по линейке производится через откидную лупу 13. В комплект столика входят четыре сменных линейки со шкалами для масштаба 1 : 1000; 1 : 2000; 1 : 2500 и 1 : 5000, которые при диаметре плана 250 мм позволяют вести съемку на расстояниях 125,

Обозначение инструмента	Устройство для определения расстояний и превышений	Коэффициенты кривых: расстояний превышений	Ошибки определения: расстояний на 100 м, см превышений, см	Зрительная труба		
				увеличение поле зрения	коэффициент дальнотемера сетки нитей	наименьший предел фокусирования, м
Dahlta 020	Диаграмма	$\frac{100}{10, 20, 100}$	$\frac{10 \div 20}{5, 10, 20}$	$\frac{25\times}{1^{\circ} 3'}$	200	3,0
TA-2	Диаграмма	$\frac{100}{10, 20, 100}$	$\frac{15 \div 20}{5, 10, 15}$	$\frac{25\times}{1^{\circ} 15'}$	100	2,0
TA-D1	Диаграмма	$\frac{100, 200}{20, 50}$	$\frac{10-20}{5, 15}$	$\frac{24\times}{1^{\circ} 11'}$	—	3,0
Redta-002	Редукционный дальнометр двойного изображения с вращающимися оптическими клиньями. Тригонометрическое нивелирование	—	$\frac{2}{2 \div 5}$	$\frac{25\times}{1^{\circ} 4'}$	100	2,5
BRT-006	Редукционный дальнометр двойного изображения с базисом при инструменте. Тригонометрическое нивелирование	—	$\frac{6}{5}$	$\frac{15\times}{2^{\circ} 40'}$	—	1,8

Таблица 16

Лимб и отсчетные устройства				Цена делений уровней			Вес, кг: прибора штатива	Рейка: $\frac{\text{длина, м}}{\text{вес, кг}}$	Где изготовляется
диаметр лимба, мм: горизонтального круга вертикального круга	цена деления лимбов	отсчетное устройство	точность отсчитывания	на алидаде		круглого			
				горизонтального круга	вертикального круга				
$\frac{94}{74}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	30"	30"	8'	$\frac{4,4}{5,6}$	$\frac{4}{7}$	ГДР, «Карл Цейсс»
—	$\frac{1^\circ}{10'}$	Шкаловый микроскоп-оценщик	$\frac{0',5}{1}$	35"—50"	25"—35"	7—15'	$\frac{4,0}{5,0}$	$\frac{3-4}{-}$	СССР
$\frac{77}{68}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',1	30"	30"	6'	$\frac{5,3}{5,1}$	$\frac{3}{4,8}$	ВНР, завод МОМ
$\frac{114}{74}$	1°	Шкаловый микроскоп	$\frac{0',1}{0',2}$	30"	30"	8'	$\frac{6,5}{5,6}$	$\frac{2,1}{-}$	ГДР, «Карл Цейсс»
$\frac{90}{90}$	1°	Шкаловый микроскоп	0',5		30"	8'	$\frac{6,7}{-}$	—	ГДР, «Карл Цейсс»

250, 312 и 625 м от станции. Точность установки по шкале масштаба расстояний $\pm 0,1$ мм.

Чертежной основой могут служить листы фольги из астролона, калька или чертежная бумага.

Смена чертежной основы производится после откидывания кольца 9 вместе с мостиком 7. После укладки основы кольцо 9 закрепляется специальной клеммой 10. Чертежная основа обрезается по кругу диаметром 250 мм.

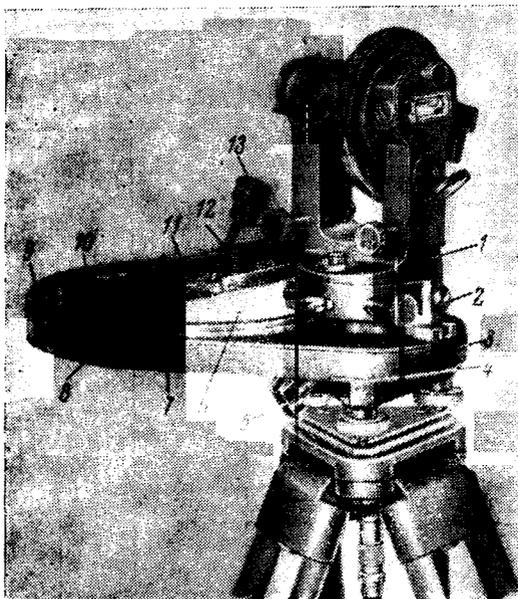


Рис. 158. Столик Kärtie для картографирования

Метод работы на столике Kärtie состоит в следующем. На чертежную основу наносится точка стояния в центре круга после установки индекса 12 на шкале масштаба 11 на нуль. Затем трубу наводят на точку местности. По известному расстоянию между точками иглой накальвают вторую точку. Получают линию, которая в дальнейшем служит основой для составления общего плана. Расстояния до пикетных точек и их превышения определяют тахеометром. Далее по измеренным расстояниям на чертеж наносятся пикетные точки и подписываются их отметки.

Техническая характеристика тахеометров приведена в табл. 16.

Г Л А В А X

НИВЕЛИРЫ

§ 75. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОВРЕМЕННЫХ НИВЕЛИРАХ

В области конструирования нивелиров за последнее время произошли значительно большие изменения, чем в конструировании теодолитов и тахеометров. Если раньше насчитывалось пять типов нивелиров, которые различались по способам сопряжения зрительной трубы с подставкой и уровнем, то теперь в основном выпускаются глухие нивелиры. Все большее внимание уделяется нивелирам с самоустанавливающимися в горизонтальное положение линиями визирования. В СССР, кроме того, выпускаются и считаются перспективными нивелиры с наклонным лучом визирования.

В 1963 г. в СССР утвержден новый ГОСТ 10528—63 «Нивелиры», который распространяется на оптико-механические нивелиры, предназначенные для определения превышений между двумя точками методом геометрического нивелирования. Нивелиры обозначаются буквой Н и цифрой рядом с ней, указывающей класс нивелирования, для которого предназначен нивелир.

ГОСТ регламентирует изготовление следующих типов нивелиров:

Н1 — высокоточный нивелир глухой с уровнем, элевационным винтом и плоско-параллельной пластинкой. Нивелир обеспечивает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 0,5$ мм;

Н2 — нивелир высокоточный глухой с уровнем, элевационным винтом и плоско-параллельной пластинкой. Нивелир обеспечивает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 1,0$ мм;

НС2 — нивелир высокоточный с самоустанавливающейся линией визирования и плоско-параллельной пластинкой. Нивелир обеспечивает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 1,0$ мм;

НЗ — нивелир точный с уровнем и элевационным винтом, обеспечивающий передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 4,0$ мм;

НСЗ — нивелир точный с самоустанавливающейся линией визирования, обеспечивающий передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 4,0$ мм;

НС4 — нивелир точный с самоустанавливающейся линией визирования и горизонтальным кругом, обеспечивающий передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 8,0$ мм;

НТ — нивелир технический глухой с уровнем или с самоустанавливающейся линией визирования и горизонтальным кругом, обеспечивающий передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км не более $\pm 15,0$ мм;

НТС — нивелир технический с самоустанавливающимся высотным штрихом, с наклонным лучом визирования и горизонтальным кругом, обеспечивающий передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км не более $\pm 30,0$ мм.

Перечисленные нивелиры можно разделить на три группы: глухие с уровнями; глухие с самоустанавливающимися в горизонтальное положение линиями визирования и нивелиры с наклонным лучом визирования.

Глухие нивелиры с уровнем технической точности снабжаются горизонтальными кругами. Глухие нивелиры с уровнем точные имеют элевационные винты, а высокоточные, кроме того, микрометры с плоско-параллельной пластинкой. Глухие нивелиры с уровнями теперь снабжаются оптическими блоками, проектирующими изображения концов пузырька уровня в поле зрения трубы.

Нивелиры с самоустанавливающейся в горизонтальное положение линией визирования обладают существенными преимуществами:

- 1) значительная экономия времени за счет исключения операции выведения пузырька уровня на середину ампулы;
- 2) отпадает необходимость следить за пузырьком уровня во время производства отсчета по рейке;
- 3) облегчается нивелирование при неустойчивых грунтах.

Основным элементом современных нивелиров с самоустанавливающимися визирными линиями является оптический компенсатор.

Принцип действия компенсатора состоит в следующем. Пусть O — оптический центр объектива зрительной трубы (рис. 159, а); C — сетка нитей; f — фокусное расстояние объектива (рейка удалена от инструмента). Если визирная ось горизонтальна, то по рейке будет сделан правильный отсчет, соответствующий горизонту нивелира. Если ось визирования (рис. 159, б) направить под углом ν , то крест нитей C сместится в точку C_1 на величину fv , и отсчет не будет соответствовать горизонту инструмента. Компенсатор, расположенный в точках A и B (рис. 159, в и г), должен автоматически выполнить одну из функций: сместить изображение рейки так, чтобы правильный отсчет совместился с крестом нитей (рис. 159, в), или сместить сетку C_1 (или ее изображение), совместив ее с правильным

отсчетом (рис. 159, в). Тогда при наклонах зрительной трубы изображение рейки будет оставаться неподвижным относительно сетки нитей.

Для того чтобы компенсация была точной, необходимо:

- 1) выполнение условия $s \sin \beta = f \sin \nu$;
- 2) быстрое совмещение изображения рейки с сеткой нитей.

Отношение $\frac{\sin \beta}{\sin \nu} = \frac{f}{s} \approx \frac{\beta}{\nu} = \nu'$ называется угловым увеличением компенсатора. Чем больше угловое увеличение, тем меньше могут быть габариты компенсатора.

В современных нивелирах применяются различные виды компенсаторов.

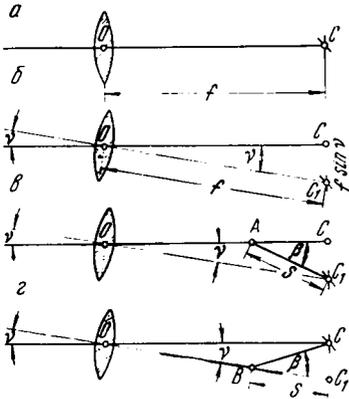


Рис. 159. Схемы работы оптических компенсаторов нивелиров

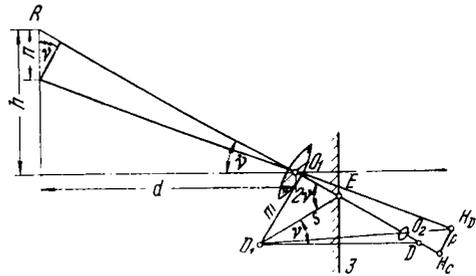


Рис. 160. Схема к определению превышений наклонным лучом визирования

саторов. Теорию и их описание мы приведем при рассмотрении конкретных конструкций нивелиров.

Отметим, что ГОСТ 10528—63 требует, чтобы компенсаторы работали в пределах не менее: $\pm 6'$ для нивелира НС2; $\pm 10'$ для нивелира НС3; $\pm 15'$ для нивелиров НС4 и НТ.

ГОСТ предусматривает также нивелир с наклонным лучом визирования. Идея о создании такого нивелира была высказана Г. Ю. Стодолкевичем в 1946 г. Он показал, что превышение может быть получено из отсчета по рейке при наклонном положении трубы инструмента, если применить самоустанавливающееся зеркало.

Пусть R — рейка (рис. 160); O_1H_c — визирная ось трубы нивелира; h — искомое превышение; d — горизонтальное расстояние до рейки; O_1 — объектив зрительной трубы; H_c — неподвижная сетка нитей; Z — зеркало, которое под действием силы тяжести занимает относительно отвесной линии постоянное положение (на рис. 160 отвесное); D — штрих, нанесенный на стеклянной детали, жестко связанной с трубой.

Построим изображение D_1 штриха D в зеркале Z , а затем при помощи объектива O_2 спроектируем его в плоскость неподвижной сетки нитей в точку H_D . Если при наклонах трубы зеркало будет сохранять свое положение относительно отвесной линии, то изображение H_D штриха D будет перемещаться в плоскости неподвижной

сетки нитей. Обозначая расстояние между подвижным штрихом H_D и неподвижным H_c буквой p , можно написать

$$\frac{p}{f} = \frac{n \cos v}{d \cos v}, \quad (X,1)$$

где f — фокусное расстояние объектива трубы.

Для поперечного увеличения объектива O_2 можно написать

$$\beta = \frac{p}{m}.$$

Если расстояние от штриха D до зеркала в точке E обозначить буквой s , то

$$p = s \sin 2v\beta. \quad (X,2)$$

Подставляя значение p из формулы (X,2) в формулу (X,1), после преобразований получим:

$$h = d \operatorname{tg} v = \frac{fn}{2s\beta}; \quad (X,3)$$

$$h = kn, \quad (X,4)$$

где k — постоянная величина;

n — отрезок рейки между сеткой H_c и подвижным штрихом.

В настоящее время в СССР разрабатываются конструкции нивелиров, соответствующие новому ГОСТу.

В этой главе мы рассмотрим отечественные и зарубежные нивелиры, которые отвечают современным требованиям и применяются в СССР.

§ 76. ГЛУХИЕ НИВЕЛИРЫ С УРОВНЕМ

Технический нивелир НВ-1 допускает передачу высотных отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более ± 4 мм. Осевая система цилиндрическая (показана на рис. 52, а и описана в § 38).

Нивелир НВ-1 (рис. 161) состоит из двух основных частей: нижней — подставки-треножника 7, в которой вращается цилиндрическая ось, и верхней опорной площадки 4 со зрительной трубой 2, контактным цилиндрическим уровнем, заключенным в коробку 10, элевационным винтом 8, закрепительным 6 и наводящим 5 винтами. Нивелир снабжен круглым уровнем 9.

На зрительной трубе укреплены целик 1 и мушка 11 для грубого наведения на рейку. Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую барабанчиком 3 (рис. 161). Она состоит из объектива 1 (рис. 162), фокусирующей линзы 2, сетки нитей 3 и окуляра 4. Лучи, отразившись от зеркала 10, освещают концы пузырька 9, а затем при помощи призм 11, 8, 7 и 5 объектив 6 строит изображе-

ние совмещенных концов пузырька в плоскости сетки нитей 3. На рис. 163 показано поле зрения трубы.

Нивелир Ni-030* (рис. 164), выпускаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР), позволяет передавать отметки со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 3-4$ мм.

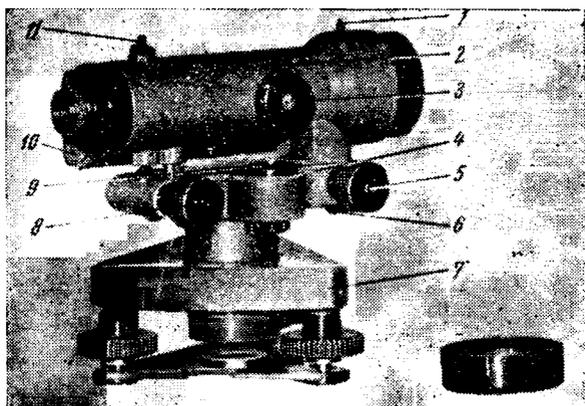


Рис. 161. Нивелир НВ-1

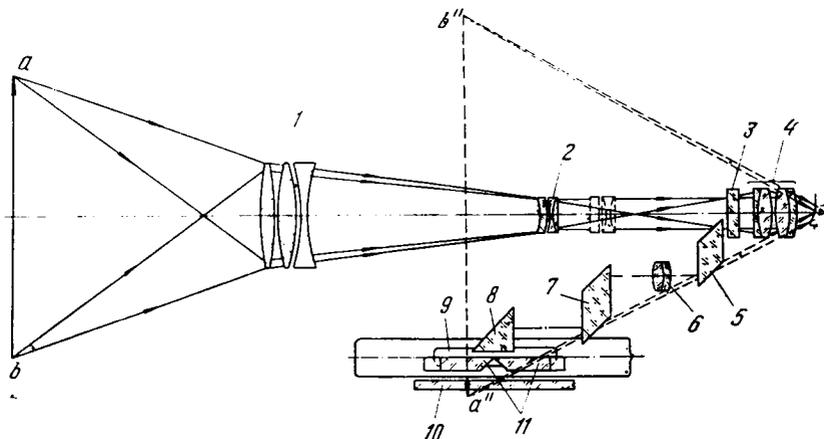


Рис. 162. Оптическая схема нивелира НВ-1

Вертикальная ось цилиндрическая. Зажимной винт выполнен в виде рычажка, расположенного под объективом трубы, а микрометричный — обычный (на рис. 164 виден патрон 7 пружины этого

* Ni - 030 обозначает: нивелир, обеспечивающий нивелирование со средней квадратической ошибкой ± 3 мм на 1 км хода.

винта). Выведение пузырька уровня 9 на середину производится элевационным винтом 6.

Около окуляра 4 зрительной трубы расположена лупа 3 для наблюдения за совмещением концов пузырька цилиндрического

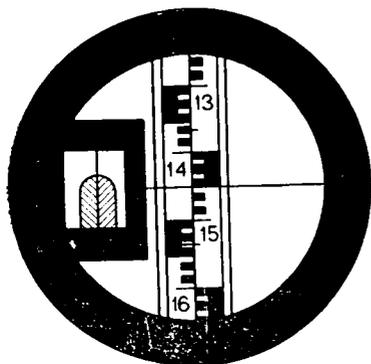


Рис. 163. Поле зрения трубы нивелира НВ-1; отсчет по рейке равен 1450

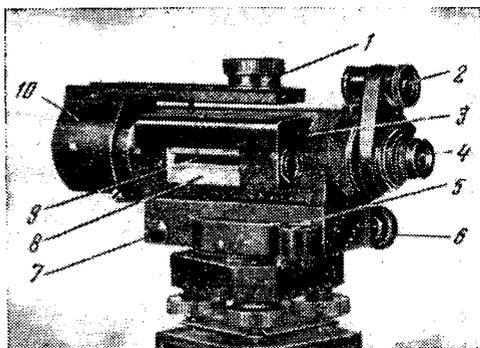


Рис. 164. Нивелир Ni-030

уровня 9. Пузырек этого уровня освещается неподвижным рассеивающим свет иллюминатором 8. Кроме того, нивелир снабжен круглым уровнем 5.

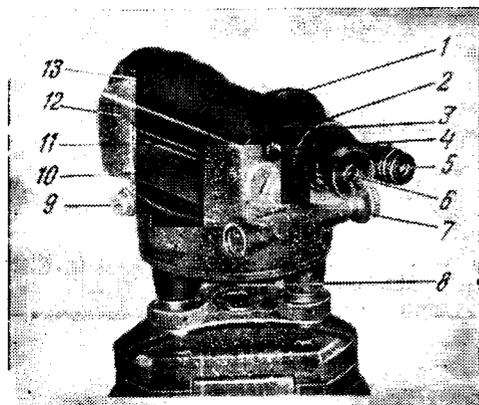


Рис. 165. Нивелир Ni-V1

В нивелире Ni-030 с горизонтальным кругом под окуляром зрительной трубы расположен окуляр шкалового микроскопа. Зрительная труба имеет просветленную оптику и внутреннюю фокусировку.

К нивелиру Ni-030 выпускается микрометр 008, который в сочетании с прецизионными рейками позволяет использовать нивелир как высокоточный.

Основной деталью микрометра 008 является плоскопараллельная пластинка 10, которая при вращении бара-

бана 1 может наклоняться вокруг горизонтальной оси и смещать визирную ось в вертикальной плоскости параллельно своему положению. Отсчет по шкале барабана 1 берется через лупу 2, установленную на окулярной части трубы. Всей шкале барабана

соответствует перемещению визирной оси на 5 мм. Шкала имеет 100 делений, поэтому цена одного деления равна 0,05 мм.

Нивелир со стеклянным лимбом Ni-V1 (рис. 165), изготавливаемый заводом МОМ (ВНР), допускает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 3-4$ мм.

Ось вращения цилиндрическая. Зажимной винт отсутствует. Микрометренное вращение осуществляется бесконечным наводящим винтом 9 (на рис. 165 виден патрон этого винта). Подобное устройство показано на рис. 52, б (§ 38).

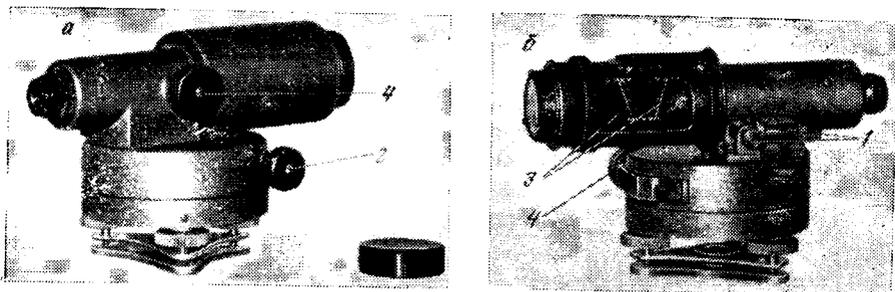


Рис. 166. Нивелир HSM-2A

Стеклянный горизонтальный лимб может переставляться при помощи особого винта 8. Отсчетывание по лимбу производится при помощи шкалового микроскопа, окуляр 5 которого расположен рядом с окуляром 6 зрительной трубы.

Цилиндрический уровень 11 расположен в кожухе 12 зрительной трубы. Концы пузырька рассматриваются через лупу 4, расположенную рядом с окуляром зрительной трубы. Выведение пузырька на середину ампулы производится при помощи элевационного винта 7. Пузырек уровня 11 освещается через иллюминатор 10.

Для грубого приведения оси инструмента в отвесное положение служит круглый уровень 1.

Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую кольцом 2. Для грубой наводки на цель зрительная труба снабжена мушкой 3 и целиком 13.

§ 77. НИВЕЛИРЫ С САМОУСТАНОВЛИВАЮЩИМИСЯ ВИЗИРНЫМИ ЛИНИЯМИ

Нивелир HSM-2A (рис. 166), выпускаемый Харьковским заводом маркшейдерских инструментов, обеспечивает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 3-4$ мм.

Система вертикальных осей нивелира показана на рис. 52, б (§ 38).

Для автоматической установки визирной оси в горизонтальное положение в нивелире применен линзовый компенсатор, подвешенный на гибких нитях \mathcal{Z} (рис. 166, б).

Пусть оптическая деталь с центром тяжести в точке O подвешена на четырех гибких металлических нитях одинаковой длины (рис. 167). Нити прикреплены к детали в точках B_1, B_2, B_3 и B_4 , расположенных

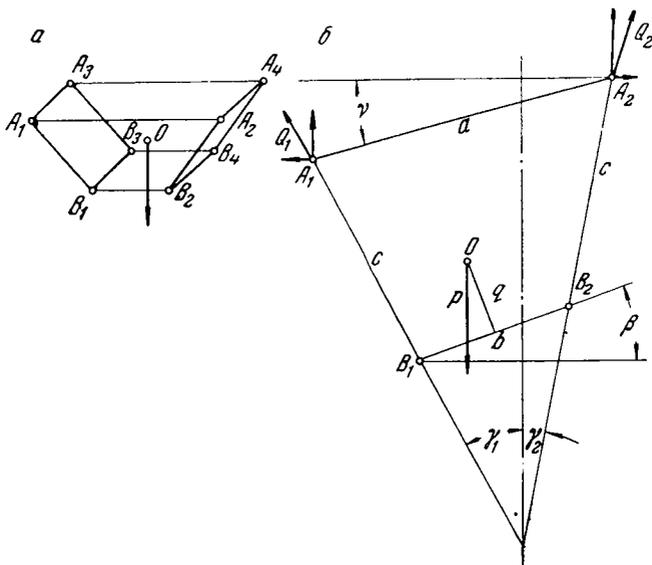


Рис. 167. Схема работы компенсатора

в вершинах прямоугольника. Противоположные концы нитей закреплены на корпусе зрительной трубы в вершинах прямоугольника A_1, A_2, A_3 и A_4 . Допустим, что при этом:

$$\left. \begin{aligned} A_1A_3 = A_2A_4 = B_1B_3 = B_2B_4; \\ A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3 = A_4B_4 = c; \\ A_1A_2 = A_3A_4 = a; \\ B_1B_2 = B_3B_4 = b. \end{aligned} \right\} \quad (X,5)$$

Обозначим расстояние от центра тяжести O до плоскости B_1, B_2, B_3 и B_4 через q . Вес нитей не учитывается.

На рис. 167, б показаны две нити A_1B_1 и A_2B_2 . Если линия A_1A_2 наклонится на угол γ , то линия B_1B_2 наклонится на некоторый угол β . Найдем связь между этими углами. Для этого в соответствии

с рис. 167, б и законами теоретической механики напишем следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 \cos \gamma_1 + Q_2 \cos \gamma_2 - P &= 0; \\ Q_1 \sin \gamma_1 - Q_2 \sin \gamma_2 &= 0; \\ Q_1 \cos \gamma_1 a \cos \nu - P \left(c \sin \gamma_2 + \frac{b}{2} \cos \beta + q \sin \beta \right) &= 0; \\ c \cos \gamma_1 + a \sin \nu - c \cos \gamma_2 - b \sin \beta &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (X,6)$$

где Q_1 и Q_2 — силы реакции;
 P — вес детали.

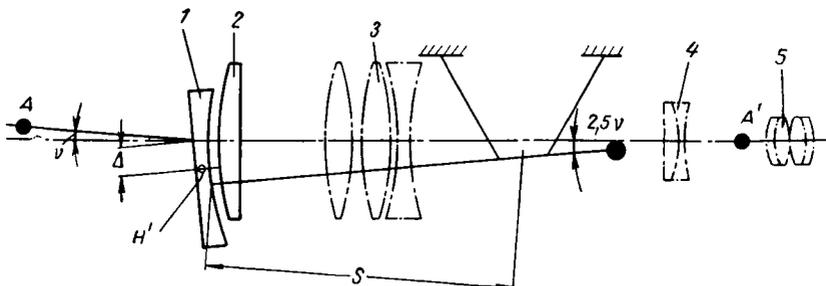


Рис. 168. Схема работы линзового компенсатора НСМ-2А

Задаваясь величинами P , q , a , b и c , можно найти зависимости между ν и β . При малых значениях ν , β и q

$$\frac{\nu}{\beta} \approx \frac{b}{a} \quad \text{и} \quad \beta \approx \frac{a}{b} \nu. \quad (X,7)$$

В нивелире НСМ-2А имеет место соотношение

$$\beta = 2,5\nu.$$

На рис. 168 показана схема работы линзового компенсатора нивелира. Компенсатор состоит из двух линз: положительной 2, закрепленной неподвижно перед телеобъективом 3, 4 зрительной трубы, и отрицательной 1, оправа которой подвешена на нитях. Фокусные расстояния этих линз по абсолютной величине равны между собой, поэтому система компенсатора афокальна.

При наклоне зрительной трубы на угол ν подвижная система компенсатора наклоняется на угол $\beta = 2,5\nu$. Это приводит к тому, что главная точка H' отрицательной линзы смещается с оптической оси зрительной трубы на величину Δ , пропорциональную углу наклона ν и плечу s . Величина s и фокусное расстояние линзы 1 подобраны так, чтобы смещение главной точки H' на величину Δ компенсировало смещение визирной оси в противоположную сторону на угол ν . В результате этого горизонтальный луч, идущий от отсчета на рейке, соответствующего данному горизонту инструмента, преломляется линзой 1 и направляется в новое положение сетки

нитей, которая рассматривается через окуляр 5. При этом отклонение главной плоскости линзы 1 от нормального положения визирной оси трубы приводит к ухудшению изображения рейки. Предельный угол наклона $\nu = \pm 8'$, поэтому на нивелире установлены два взаимно перпендикулярных цилиндрических уровня 1 (см. рис. 166, б).

Успокоение колебаний подвешенной системы происходит благодаря малому воздушному зазору между оправами подвижной линзы и корпусом трубы. Время затухания колебаний около 2 сек.

Зрительная труба нивелира с внутренней фокусировкой аналогична трубе нивелира НВ-1. Фокусировка производится при помощи барабанчика 4. Микрометренное вращение трубы осуществляется бесконечным наводящим винтом 2 (см. рис. 166, а).

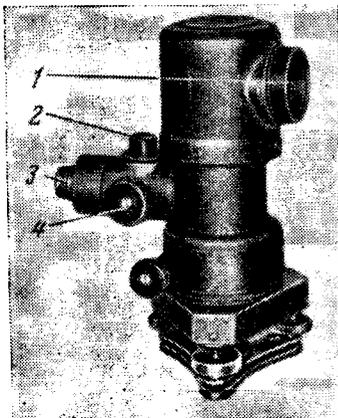


Рис. 169. Нивелир НЗК-1

Визирная ось нивелира устанавливается в горизонтальное положение по результатам двойного нивелирования перемещением горизонтальной нити вертикальными исправительными винтами.

Нивелир с зеркальным компенсатором НЗК-1 (рис. 169) сконструированный проф. Н. А. Гусевым, обеспечивает передачу отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 3-4$ мм.

В нивелире НЗК-1 зрительная труба ломаная, типа перескопа; в верхней ее части расположено входное окно 1, в нижней части — окуляр 3. Фокусировка трубы осуществляется винтом 4.

На рис. 170 дан вертикальный разрез нивелира НЗК-1. Лучи света, пройдя защитное стекло 23, отражаются от зеркала-компенсатора 22 и направляются в объектив 4 зрительной трубы. Отразившись далее от неподвижного зеркала 19, они направляются через фокусирующую линзу 8 на сетку нитей 6, которая рассматривается через окуляр 7.

Деталь 21 с зеркалом-компенсатором и цилиндром 3 подвешена на четырех металлических нитях к детали 1, несущей на себе поршень 2. Цилиндр 3 и поршень 2 образуют воздушный демпфер, гасящий колебания зеркала-компенсатора. Зазор между цилиндром и поршнем около 0,15 мм, и гашение колебаний [происходит за 1—2 сек. Параметры демпфера обеспечивают пределы работы компенсатора $\pm 15'$. Поэтому установка в рабочее положение осуществляется по круглому уровню 5. Для уравнивания зеркала служит противовес 20.

Работа компенсатора сводится к следующему (рис. 171). Зеркало D подвешено на четырех нитях так, что расстояние $A_1 A_2$ равно

половине расстояния B_1B_2 , поэтому в соответствии с формулой (X,7) можно написать

$$\beta = \frac{\nu}{2}.$$

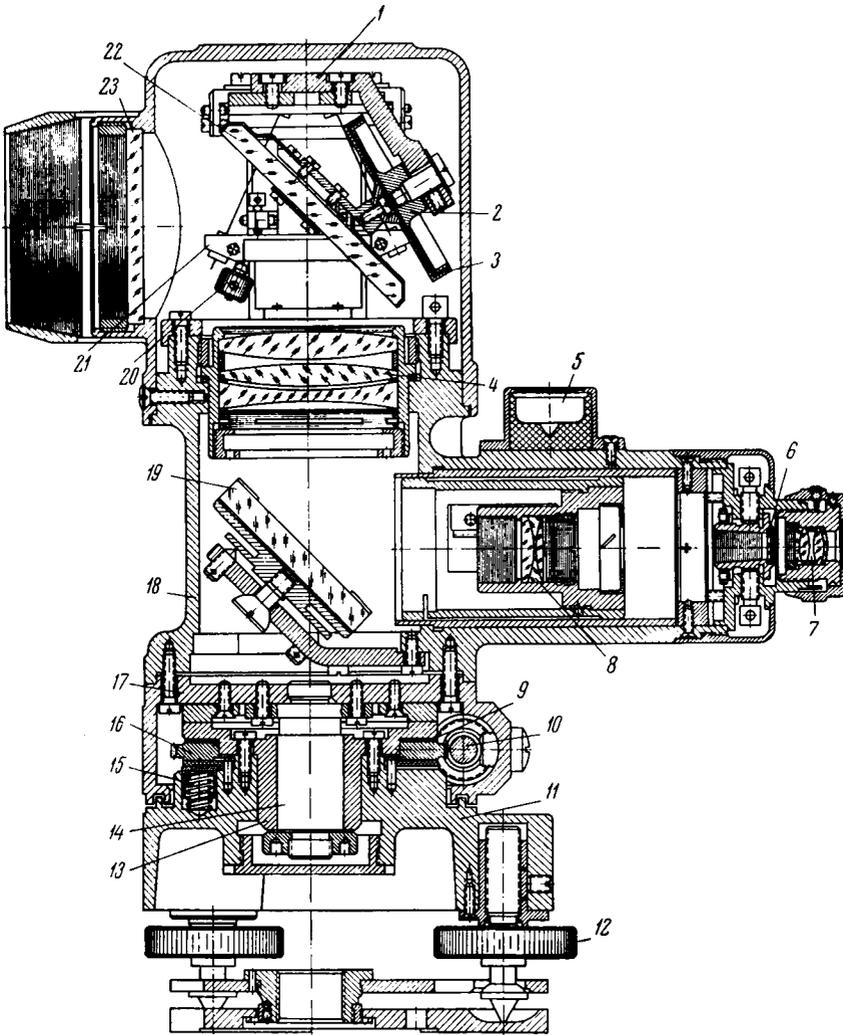


Рис. 170. Вертикальный разрез нивелира НЗК-1

Следовательно, зеркало-компенсатор D при наклоне нивелира на угол ν изменит наклон на угол $\frac{\nu}{2}$. Если вертикальная ось нивелира отвесна и плоскость этого зеркала составляет с горизонтальной

плоскостью угол 45° (рис. 171, а), то при наклоне вертикальной оси нивелира на угол $\pm \nu$ зеркало-компенсатор будет иметь угол наклона $45^\circ \pm \frac{\nu}{2}$ (рис. 171, б).

Поэтому горизонтальный луч CD , несущий отсчет, соответствующий данному горизонту инструмента, отразившись от зеркала D , повернутого на угол $\pm \frac{\nu}{2}$, изменит свое направление на угол $90^\circ \pm \nu$. Далее он отразится от неподвижного зеркала E под углом 90° и снова пройдет через крест сетки нитей.

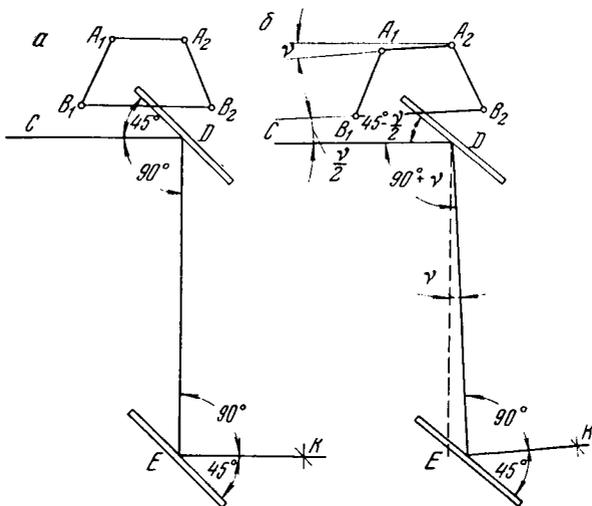


Рис. 171. Схема работы зеркального компенсатора нивелира НЗК-1

Вертикальная осевая система с бесконечным наводящим винтом (см. рис. 170) состоит из стальной цилиндрической оси 14 , вращающейся в латунной втулке 13 , по которой скользит стальное кольцо 17 , прикрепленное к основанию трубы 18 . Шестерня 16 , расположенная между втулкой 13 и подставкой 11 , входит в зацепление с наводящим винтом 10 . Шестерня прижимается к диску втулки пружинами 15 через эбонитовое кольцо 9 (см. рис. 170). Действие пружин рассчитано так, чтобы обеспечить легкое вращение верхней части прибора от руки и избежать проскальзывания при работе микрометричного винта. Подъемные винты 12 имеют увеличенный шаг резьбы, что сокращает время на установку нивелира по круглому уровню 2 (см. рис. 169).

Нивелир *Koni-025* (рис. 172) с самоустанавливающейся визирной линией изготавливается народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР). Нивелир позволяет передавать отметки со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 2,5$ мм.

Осевая система цилиндрическая с бесконечным наводящим винтом, имеющим ручки 4 с правой и левой сторон корпуса нивелира. Для приведения вертикальной оси в отвесное положение служит круглый уровень 2 с ценой деления 8' на 2 мм, пузырек которого рассматривается в зеркало 3. Компенсатор работает по схеме, приведенной на рис. 159, в.

Оптическая схема зрительной трубы и компенсатора показана на рис. 173. Компенсатор состоит из двух прямоугольных призм 3 и 5, укрепленных на маятнике 8, нижняя часть которого с деталью 9 образует воздушный демпфер. Маятник подвешен на двух парах гибких металлических лент, пересекающихся на оси E.

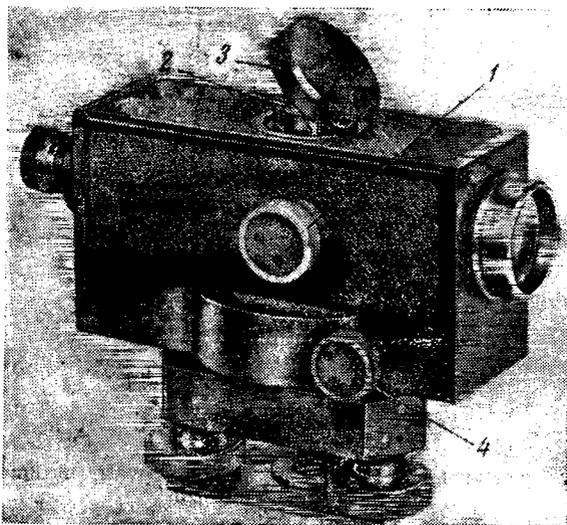


Рис. 172. Нивелир Koni-025

Лучи света, идущие от рейки, проходят через объектив 1, фокусирующую линзу 2, отражаются в призме 3 компенсатора. Затем, трижды отразившись в призме-крыше 4, вновь попадают в компенсатор на призму 5 и строят изображение рейки на сетке нитей 6, которое рассматривается через окуляр 7.

При наклоне визирной оси трубы нивелира на угол ν горизонтальный луч, несущий отсчет, соответствующий данному горизонту инструмента, через оптический центр объектива поворачивается призмой 3 компенсатора на угол 2ν . Затем, трижды отразившись в призме-крыше 4 еще на угол 2ν , он поворачивается призмой 5 компенсатора. В результате луч отклонится от горизонтального направления на 4ν и пройдет через новое положение креста нитей.

Пределы работы компенсатора $\pm 10'$. Колебания компенсатора затухают в течение 1 сек. Зрительная труба в совокупности

с компенсатором дает прямое изображение. Фокусировка трубы осуществляется ручкой 1 (см. рис. 172).

Компенсационный нивелир Копи-007 (рис. 174) изготавливается народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР). Он позволяет передавать отметку при применении реек с ценой деления 1 см со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более $\pm 2,5$ мм, а с использованием инварных штриховых реек и микрометра — со средней квадратической ошибкой $\pm 0,7$ мм.

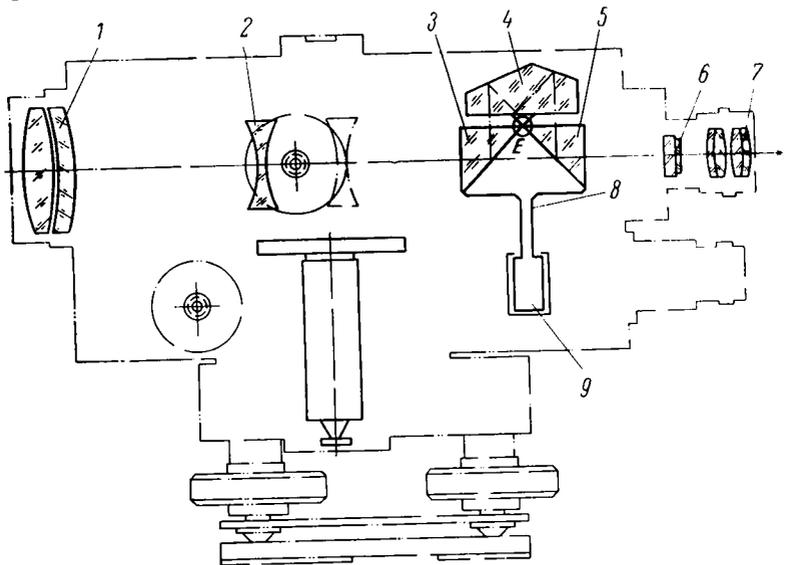


Рис. 173. Оптическая схема зрительной трубы и компенсатора нивелира Копи-025

Зрительная труба 2 нивелира ломаная, выполнена в виде перископа. В верхней части ее расположено входное окно 1, в нижней — окуляр 9. Фокусировка трубы осуществляется винтом 3.

Вертикальная ось цилиндрическая; зажимной винт выполнен в виде рычажка 6, микрометрический винт 5 обычный. Для приведения оси вращения нивелира в отвесное положение служит круглый уровень 7. Нивелир снабжен стеклянным горизонтальным лимбом с ценой деления $10'$. Отсчет производится по штрих-микроскопу, окуляр 8 которого расположен под окуляром 9 зрительной трубы.

Оптическая схема зрительной трубы и компенсатора показана на рис. 175. В качестве оптического компенсатора служит прямоугольная призма, подвешенная в точке E в виде маятника длиной $\frac{l}{2}$. При наклонах нивелира призма под действием силы тяжести будет перемещаться относительно горизонтальных лучей, идущих от рейки, и относительно лучей, повернутых пентапризмой B в отвесном положении (рис. 175, б).

Если призма переместится на величину $\frac{a}{2} = \frac{f}{2} \nu$, то отраженный дважды луч окажется смещенным на величину a (рис. 175, а).

Если отрезок BC визирной оси будет совмещен с отвесной линией, то горизонтальный луч AB , несущий отсчет, соответствующий данному горизонту инструмента, будет повернут пентапризмой на 270° и пойдет по визирной оси BC , достигнет призмы F , дважды отразится в ней и, отразившись в призме H , достигнет креста D сетки нитей (рис. 175, б).

Если верхнюю часть нивелира наклонять влево, то проекции точек O и E в плане будут приближаться друг к другу, а если наклонять вправо, то проекции точек O и E будут отходить одна от другой.

Пусть верхняя часть трубы нивелира наклонена влево (рис. 175, в). Тогда горизонтальный луч AB , пройдя пентапризму, пойдет отвесно вниз и, отразившись дважды в призме F , которая приблизится к лучу OF , попадет на грань призмы H в более высокорасположенной точке и пройдет через сместившийся крест D сетки нитей.

Колебания призмы-компенсатора гасятся воздушным демпфером в течение 1 сек. Пределы работы компенсатора $\pm 10'$.

В нивелире предусмотрена возможность вращения пентапризмы B при помощи винта 4 (см. рис. 174). Это приводит к перемещению

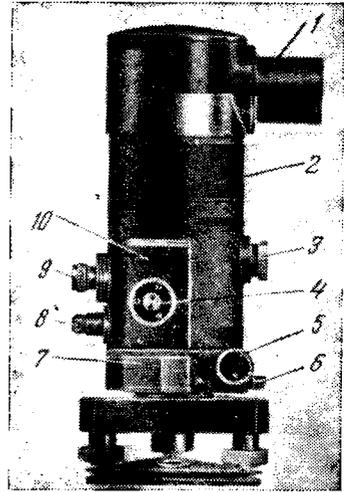


Рис. 174. Нивелир Kopi-007

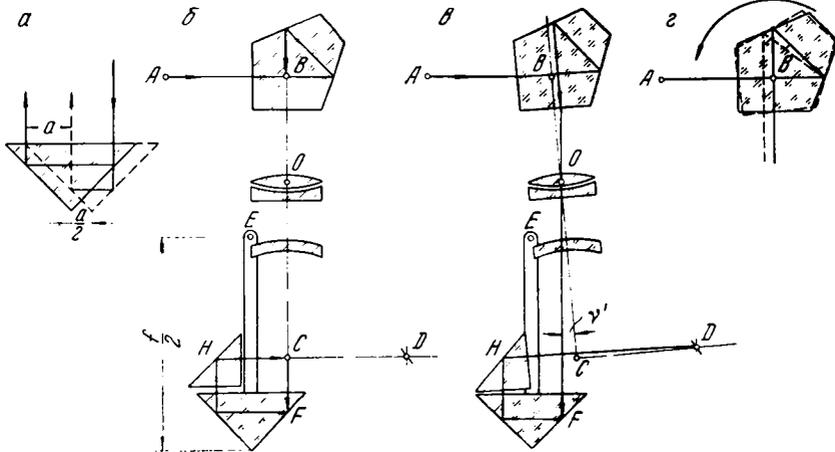


Рис. 175. Схема работы компенсатора и микрометра нивелира Kopi-007

лучей, повернутых на 270° параллельно самим себе (рис. 175, з). Величина перемещения отсчитывается по шкале с делениями, рассматриваемой через лупу 10 (см. рис. 174). Это приспособление служит микрометром при работе с нивелирными штриховыми рейками.

Автоматический нивелир Ni-B5 (рис. 176), изготовляемый заводом МОМ (ВНР), обеспечивает передачу высотных отметок со средней квадратической ошибкой на 1 км хода не более ± 2 мм.

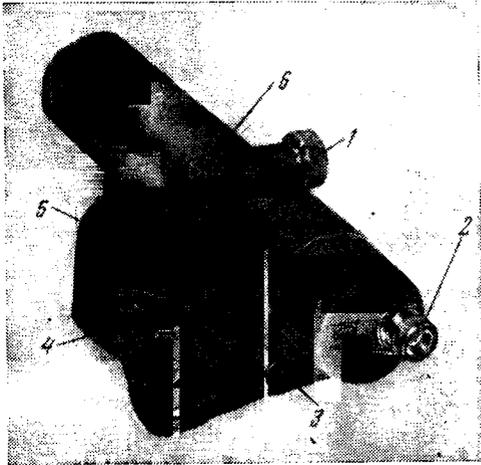


Рис. 176. Нивелир Ni-B5

Вертикальная ось цилиндрическая с бесконечным наводящим винтом, имеющим две ручки 4. Нивелир оснащен стеклянным горизонтальным лимбом, который может переставляться при помощи специального винта. Цена деления лимба 1° . Отсчет по лимбу производится при помощи шкалового микроскопа с ценой деления шкалы $10'$. Шкаловый микроскоп позволяет делать отсчет с точностью до $\pm 1'$. Окуляр 3 отсчетного микроскопа расположен рядом с окуляром 2 зрительной трубы. Штрихи лимба освещаются иллюминатором 5. Ось вращения

нивелира приводится в отвесное положение по круглому уровню 6, изображение пузырька которого передается в поле зрения трубы при помощи призмы 3 (рис. 177). Зрительная труба имеет внутреннюю фокусировку, осуществляемую винтом 1 (см. рис. 176), допускающим грубую и микрометрическую фокусировку.

Компенсатор состоит из трех прямоугольных призм 5, 6 и 7. Две из них (5 и 6) подвешены на двух парах нитей, а третья призма 7 жестко связана с корпусом зрительной трубы. Так как в данном случае нити попарно закреплены на линии $A-A$, то отрезок $a = 0$ и в соответствии с формулой (X,7) при наклонах зрительной трубы на угол ν

$$\beta = \frac{a}{b} \nu = \frac{0}{b} \nu = 0,$$

т. е. подвешенная система при наклонах трубы не наклоняется, а только перемещается параллельно самой себе.

Лучи света, идущие от рейки, проходят объектив 1, фокусирующую линзу 2, линзу 4 и, пройдя призмы компенсатора 5, 6 и 7, строят изображение рейки в плоскости сетки нитей 8, которое рассматривается через окуляр 9.

нитей, которая в данном случае будет находиться в точке C_1 . При этом:

$$OC = OC_1 = f;$$

$$B_1A'' + A''C_1 = s;$$

$$CC_1 = fv = s2v,$$

где f — эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива.

Воздушный демпфер гасит колебания компенсатора в течение 0,8 сек. Средняя ошибка установки компенсатором линии визирования в горизонтальное положение $\pm 0''{,}4$. Пределы работы компенсатора $\pm 8'$.

По требованию заказчика завод поставляет для нивелира микрометр с плоско-параллельной пластинкой в виде насадки, укрепляемой перед объективом зрительной трубы. В этом случае нивелирование производится по штриховым инварным рейкам.

Зрительная труба в сочетании с компенсатором дает прямое изображение.

Заводом МОМ выпускается нивелир Ni-B6, который в отличие от нивелира Ni-B5 не имеет горизонтального круга.

§ 78. НИВЕЛИР С НАКЛОННЫМ ЛУЧОМ ВИЗИРОВАНИЯ

Нивелир НЛ-3 с наклонным лучом визирования (рис. 179), изготовляемый в СССР, предназначен для определения превышений

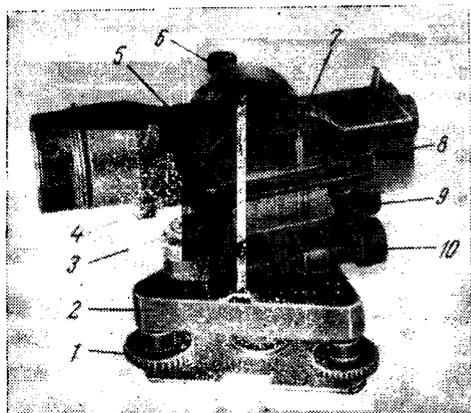


Рис. 179. Нивелир НЛ-3

как горизонтальным, так и наклонным лучом визирования. Нивелир позволяет передавать отметки наклонным лучом (при среднем расстоянии до рейки 250 м) со средней квадратической ошибкой на 1 км хода ± 5 см.

Вертикальная цилиндрическая ось нивелира входит во втулку треножника 2 и снабжена зажимным 9 и микрометрическими винтами. Зрительная труба может наклоняться в вертикальной плоскости в пределах $\pm 3^\circ$. Наклон трубы осуществляется зажимным 6 и микрометрическим 4 винтами. Для

грубого приведения оси вращения инструмента в отвесное положение служат подъемные винты 1 и круглый уровень 3. Плоскость зеркала 9 (рис. 180, а) в вертикальной плоскости составляет с осью

цилиндрического уровня 8 угол 45° (см. рис. 179). Пузырек уровня выводится на середину ампулы микрометрическим винтом 10 и рассматривается через контактную систему в призму 7.

Зрительная труба помимо объектива 1—2 (см. рис. 180, а), фокусирующей линзы 3—4, призмы сетки нитей 5 и окуляра 6 имеет еще

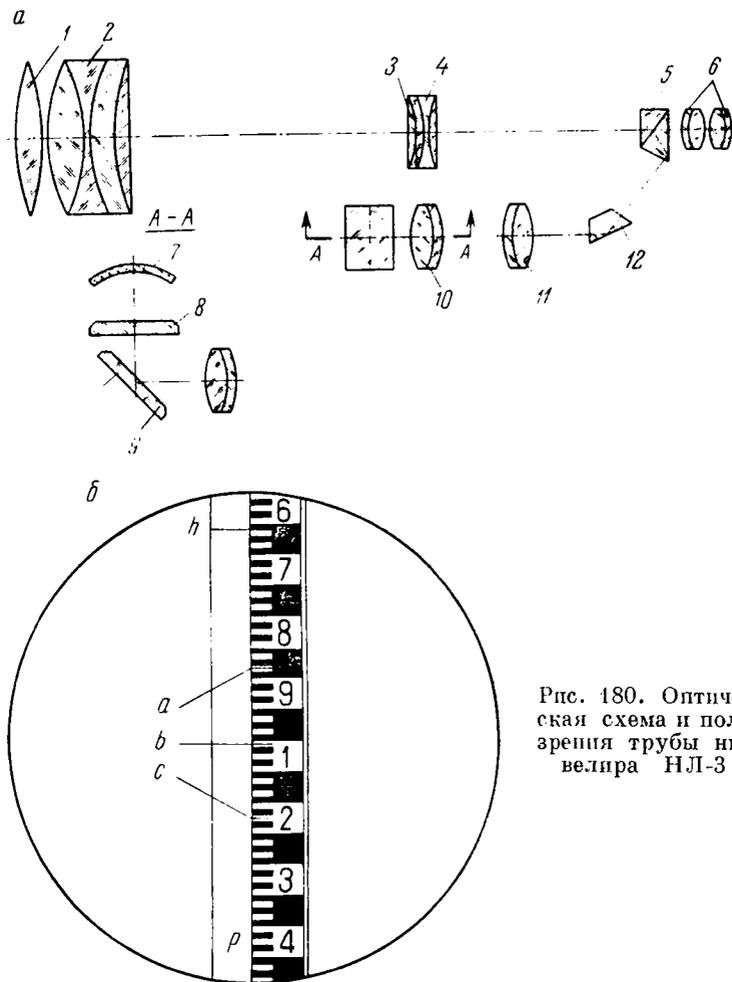


Рис. 180. Оптическая схема и поле зрения трубы нивелира НЛ-3

дополнительные оптические детали, образующие систему оптического высотомера, позволяющего определять превышения наклонным лучом (см. § 75). К этим деталям относятся: сетка нитей 8 с высотным штрихом, защищенная иллюминатором 7; зеркало 9, связанное жестко с цилиндрическим уровнем 8 (см. рис. 179); объективы 10—11, которые при помощи призмы 12 строят изображения высотного штриха в плоскости, по которой склеена призма-

сетка 5. В этой же плоскости вертикально помещена полоска амальгамы и нанесены три коротких штриха обычной сетки нитей.

Превышение можно определить наклонным лучом нивелированием вперед и из середины.

В первом случае среднюю нить сетки совмещают с целым дециметровым отсчетом на рейке и по высотному штриху делают отсчет. Перед каждым отсчетом по высотному штриху пузырек цилиндрического уровня выводят на середину.

Превышение вычисляют по формуле

$$h = k(n - b) + i - n, \quad (X,8)$$

где k — коэффициент высотомера, равный 5 в нивелире НЛ-3;

n — отсчет по средней нити сетки;

b — отсчет по высотному штриху;

i — высота инструмента.

Во втором случае операции, описанные ранее, производятся по двум рейкам. Превышение вычисляется по формуле

$$h = k[(a - b) - (n_a - n_b)] + (n_a - n_b), \quad (X,9)$$

где n_a и n_b — отсчеты по средней нити сетки при наведении трубы на заднюю и переднюю рейки;

a и b — отсчеты по высотному штриху соответственно по задней и передней рейке.

При наведении средней нити сетки на один и тот же отсчет ($n_a = n_b$) на рейках превышение вычисляется по формуле

$$h = k(a - b). \quad (X,10)$$

Для нивелирования горизонтальным лучом предварительно движением трубы совмещают высотный штрих со средней нитью сетки нитей.

На рис. 180, б показано поле зрения трубы нивелира НЛ-3: h — высотный штрих; p — полоска амальгамы, край которой совмещается с изображением рейки; a , b и c — штрихи сетки нитей.

§ 79. ВЫСОКОТОЧНЫЕ НИВЕЛИРЫ

Конструктивные особенности высокоточных нивелиров определяются основным требованием: инструмент должен фиксировать положение визирного луча относительно отвесной линии с очень высокой точностью. Непараллельность визирного луча оси уровня допустима не более $i = 20''$ и при этом угол i должен быть постоянным. Точность взгляда $m_{взг}$ определяется по формуле

$$m_{взг} = \frac{\Delta i d}{\rho}, \quad (X,11)$$

где Δi — изменение угла i ;

d — расстояние от нивелира до рейки.

Для современных нивелиров точность взгляда $m_{взг} = 0,08 \text{ мм}$ считается допустимой, что соответствует $\Delta i = 0",3$. Поэтому при конструировании нивелиров задаются условиями, чтобы $\Delta i = \pm 0",2$. Этим высоким требованиям в настоящее время отвечают глухие нивелиры с элевационным винтом и микрометром.

Высокоточный нивелир Н1 (рис. 181), изготавливаемый в СССР, предназначен для нивелирования I и II классов. Средняя квадратическая ошибка передачи высот на 1 км хода двойного нивелирования $\pm 0,5 \text{ мм}$.

Основные части нивелира: зрительная труба 5 с составным кожухом 7, в коробке которого установлен цилиндрический уровень, освещаемый зеркалом 9; тройник 4 с цилиндрической осью, элевационным винтом 10, Т-образным уровнем 11, закрепительным 2 и наводящим 3 винтами; подставка 13 с подъемными винтами 1.

Оптическая схема нивелира Н1 показана на рис. 182, а. Лучи света от рейки проходят положительную 1 и отрицательную 2 компоненты объектива, плоско-параллельную пластинку 3, фокусирующую линзу 4 и строят изображение рейки на сетке нитей 5. Лучи, идущие от концов пузырька уровня 10, пройдя контактные призмы 11, при помощи призм 12 и 9 попадают в объектив 8, который с помощью призмы 7 строит изображение совмещенных концов пузырька в плоскости сетки нитей 5. Изображения рейки, биссектора сетки нитей и пузырька уровня рассматриваются через окуляр 6.

Плоско-параллельная пластинка укреплена в оправе, которая связана поворотным механизмом с барабанчиком 20 (см. рис. 181, б). На барабанчике нанесена шкала в 110 делений. Основная шкала имеет 100 делений, а по краям имеются еще по пять дополнительных делений. Отсчет по шкале барабанчика делается по

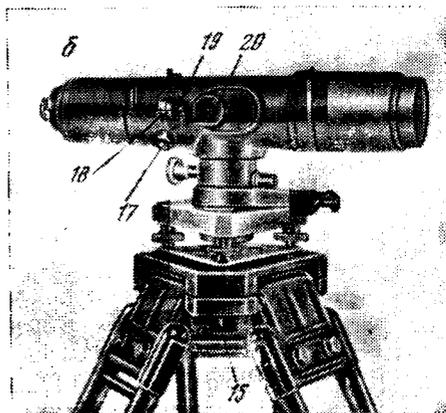
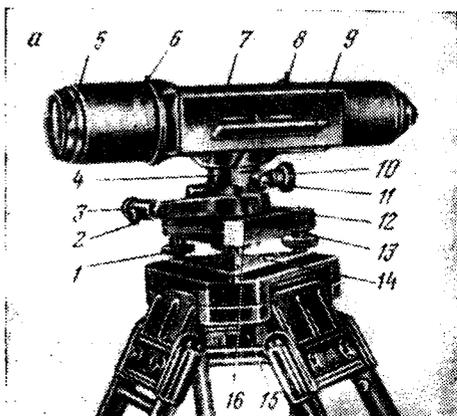


Рис. 181. Нивелир Н1

индексу через лупу 19, укрепленную в специальном кронштейне 18. Прежде чем делать отсчет, вращением барабанчика 20 вводят штрих рейки в биссектор сетки нитей. Отсчет по рейке на рис. 182, б равен 776 365.

Тройник 4 с осью и зрительной трубой (см. рис. 181, а) закрепляется в подставке 13 с помощью фиксатора 12. Для грубого приведения оси вращения инструмента в отвесное положение служит Т-образный уровень 11 с тремя исправительными винтами 16.

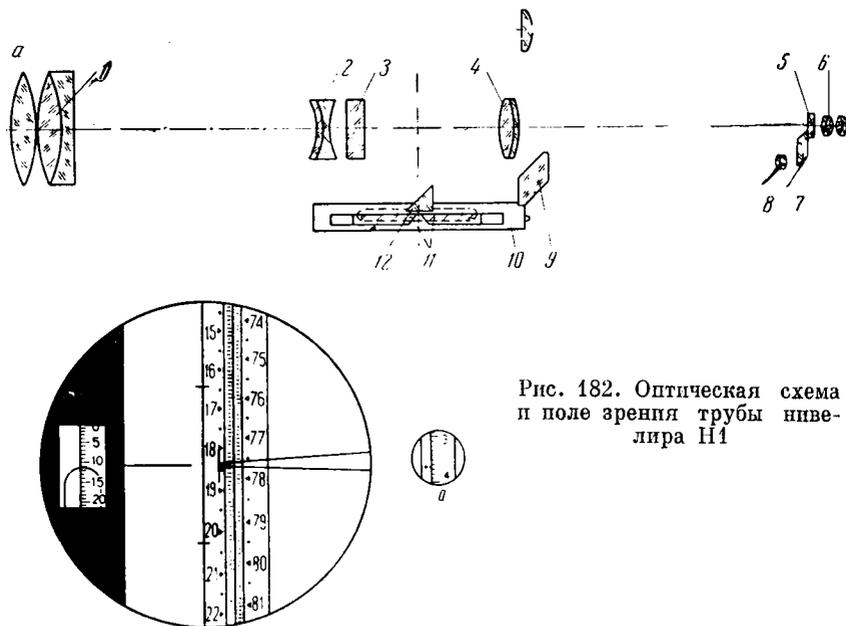


Рис. 182. Оптическая схема и поле зрения трубы нивелира Н1

Зрительная труба фокусируется при помощи трибки 17. На кожухе зрительной трубы укреплены целик 6 и мушка 8 для грубого наведения трубы на рейку. Подъемные винты имеют проточки для опоры пластинчатой пружины 14, в центральной части которой укреплена втулка с резьбой для станového винта 15.

Нивелир Н1 поставляется с комплектом инварных реек. В комплект входят: две инварные трехметровые рейки с основной и дополнительной полусантиметровыми шкалами; одна подвесная рейка длиной 1,2 м также с дополнительной шкалой.

Высокоточный нивелир Ni-004 (рис. 183), изготавливаемый народным предприятием «Карл Цейсс» (ГДР), предназначенный для нивелирования I и II классов, позволяет передавать отметки со средней квадратической ошибкой $\pm 0,4$ мм на 1 км хода двойного нивелирования.

Вертикальная ось имеет цилиндрическую форму и снабжена микрометрично-зажимным устройством с зажимным винтом в виде рычажка и микрометричным винтом 5.

Для выведения пузырька цилиндрического уровня на середину ампулы служит элевационный винт *б*. Для грубого приведения оси вращения инструмента в отвесное положение служат два цилиндрических уровня *7*, расположенные под прямым углом один к другому.

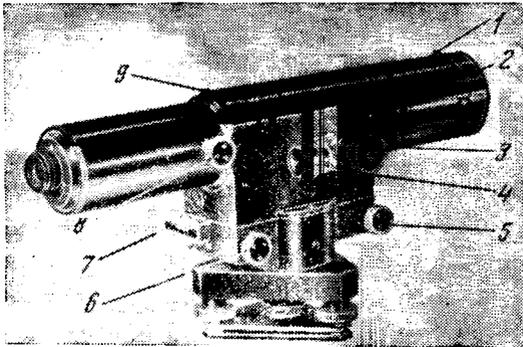


Рис. 183. Нивелир Ni-004

Основной цилиндрический уровень глубоко скрыт в корпусе нивелира, и совмещенное изображение его пузырька при помощи специальной оптической системы передается в поле зрения трубы.

Зрительная труба *2* хорошо защищена от вредного воздействия температуры и имеет встроенный микрометр с плоско-параллельной

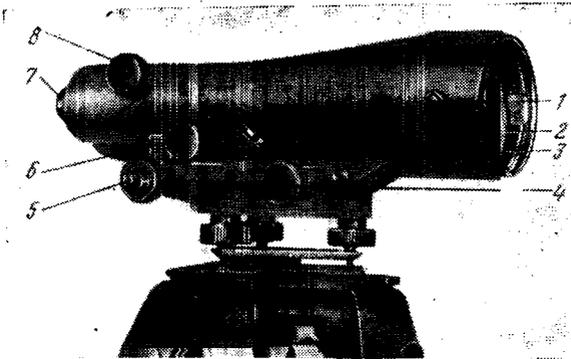


Рис. 184. Нивелир Ni-A1

пластинкой, наклон которой производится при помощи барабанчика *3* со шкалой. Для взятия отсчета с барабанчика служит лупа *4*. В соответствии с полусантиметровыми делениями рейки диапазон измерения микрометром равен 5 мм. Микрометр имеет 100 рабочих делений, поэтому цена деления его равна 0,05 мм. Фокусировка трубы

Обозначение инструмента	Зрительная труба *			Цена деления уровней	
	Увеличение Поле зрения	Разреша- ющая сила трубы	Предел визирования, м	круглого или устано- вочных	цилиндри- ческого
ПВ-1	$\frac{31^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	4"	3	7—15'	17—23"
Ni-030	$\frac{25^{\times}}{1^{\circ} 36'}$	4"	1,8	8'	30"
Ni-B1	$\frac{28^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	4"	1,2	6'	25"
НСМ-2А	$\frac{30,5^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	5"	3	8'	—
НЗР-1	$\frac{30^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	5"	2	10'	—
Koni-025	$\frac{20^{\times}}{1^{\circ} 40'}$	3",5	1,5	8'	—
Koni-007	$\frac{31,5^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	3",5	2,2	8'	—
Ni-B5	$\frac{28-32^{\times}}{1^{\circ} 20'}$	3"	3	8'	—
ПЛ-3	$\frac{30,7^{\times}}{1^{\circ} 15'}$	4",5	2	7—15'	30"
П1	$\frac{45^{\times}}{50'}$	2",6	4,2	2'	4" на 0,8 мм
Ni-004	$\frac{44^{\times}}{1^{\circ}}$	2"	3	2'	4" на 0,8 мм
Ni-A1	$\frac{40, 32, 24^{\times}}{1^{\circ} 04'}$	2,5—3,0"	2,5	2'	10" на 2 мм

* Коэффициент дальномера зрительной трубы для всех нивелиров равен 100.

Таблица 17

Компенсат ρ		Цена деления шкалы барабана плоско-параллельной пластинки, мм	Точность отсчета по лимбу горизонтального круга	Средняя квадратическая ошибка на 1 км хода, мм	Вес, кг: $\frac{\text{нивелира}}{\text{штатива}}$	Где изготовляется
пределы работы	точность установки визирной оси					
—	—	—	—	$\pm 3-4$	$\frac{1,8}{4}$	СССР
—	—	—	1'	$\pm 3-4$	$\frac{1,9}{4,5}$	ГДР, «Карл Цейсс»
—	—	—	1'	$\pm 3-4$	$\frac{2,2}{4,2}$	ВНР, завод МОМ
$\pm 8'$	$\pm 2''$	—	—	$\pm 3-4$	$\frac{2,2}{3,9}$	СССР
$\pm 15'$	$\pm 1''$	—	—	$\pm 3-4$	$\frac{2,4}{4,5}$	СССР
$\pm 10'$	$\pm 0'',5$	—	—	$\pm 2-3$	$\frac{1,7}{3,4}$	ГДР, «Карл Цейсс»
$\pm 10'$	$\pm 0'',5$	0,05	1'	$\pm 2-3$	$\frac{4,8}{5,6}$	ГДР, «Карл Цейсс»
$\pm 8'$	$\pm 0'',4$	0,05	1'	± 2	$\frac{2,3}{5,1}$	ВНР, завод МОМ
Наклон трубы $\pm 3^\circ$	—	—	—	± 50	$\frac{2,1}{4,0}$	СССР
—	—	0,05	—	$\pm 0,5$	$\frac{6,9}{6,5}$	СССР
—	—	0,05	—	$\pm 0,4$	$\frac{6,1}{6,8}$	ГДР, «Карл Цейсс»
—	—	0,05	—	$\pm 0,3$	$\frac{4,2}{5,2}$	ВНР, завод МОМ

осуществляется вращением винта 8. Для грубого наведения трубы на рейку служат целик 1 и мушка 9.

Прецизионный нивелир Ni-A1 (рис. 184), выпускаемый заводом МОМ (ВНР), предназначен для нивелирования I и II классов. Средняя квадратическая ошибка передачи отметок на 1 км хода $\pm 0,5$ мм. Ni-A1 — глухой нивелир с элевационным винтом 5 и встроенным микрометром с плоско-параллельной пластинкой, вращающейся вокруг оси 1. Ось вращения нивелира цилиндрическая, имеющая фрикционную связь с втулкой подставки. Нивелир снабжен наводящим винтом 4.

Для грубого приведения оси вращения инструмента в отвесное положение служит круглый уровень 3, пузырек которого рассматривается в зеркало 2. Изображения шкалы микрометра (барабан 6) и индекса рассматриваются при помощи призмы через окуляр отчетного микроскопа, расположенный слева от окуляра 7 зрительной трубы. Шкала микрометра имеет 100 делений с ценой деления 0,05 мм. Зрительная труба фокусируется винтом 8. Она имеет три сменных окуляра с увеличениями 40×, 32× и 24×.

Техническая характеристика нивелиров приведена в табл. 17.

§ 80. РЕЙКИ НИВЕЛИРНЫЕ

Государственный стандарт (ГОСТ 11158—65) «Рейки нивелирные» предписывает изготовление следующих типов реек:

РН1 — рейка нивелирная односторонняя цельная штриховая для нивелирования I класса

РН2 — рейка нивелирная односторонняя цельная штриховая для нивелирования II класса

РН3 — рейка нивелирная двусторонняя цельная шашечная для нивелирования III и IV классов

РН4 — рейка нивелирная складная шашечная односторонняя или двусторонняя для нивелирования IV класса, технического на поверхности и 1 и 2 разрядов в подземных работах

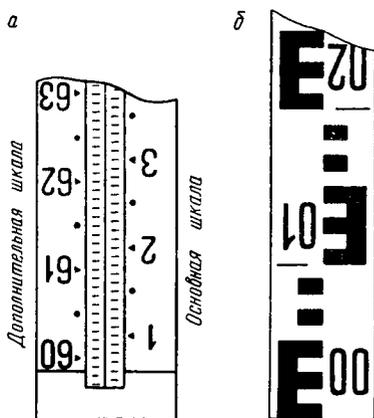
РНТ — рейка нивелирная двусторонняя складная шашечная для технического нивелирования

Основная и дополнительная шкалы на рейках РН1 и РН2 наносятся на полосу из инвара шириной

Рис. 185. Нивелирные рейки, соответствующие новому ГОСТу

24 мм, натянутой на деревянный брусок (рис. 185, а). Шашечные деления на рейках РН3 и РН4 наносятся на поверхность деревянного бруска (рис. 185, б).

Длины шкал реек РН1 и РН2 должны быть равны 3 и 1,7 м; РН3 — 3 м; РН4 — 4 и 2,1 м; РНТ — 4 м.



Расстояния между осями штрихов основной и дополнительной шкал реек РН1 и РН2 равны 5 мм, а величина пашек на рейках РН3, РН4 и РНТ — 10 мм.

В СССР выпускаются следующие типы нивелирных реек:

1) инварные рейки ИР с двумя шкалами (рис. 186, а) для нивелирования I и II классов длиной 3 и 1,2 м и расстоянием между штрихами 5 мм;

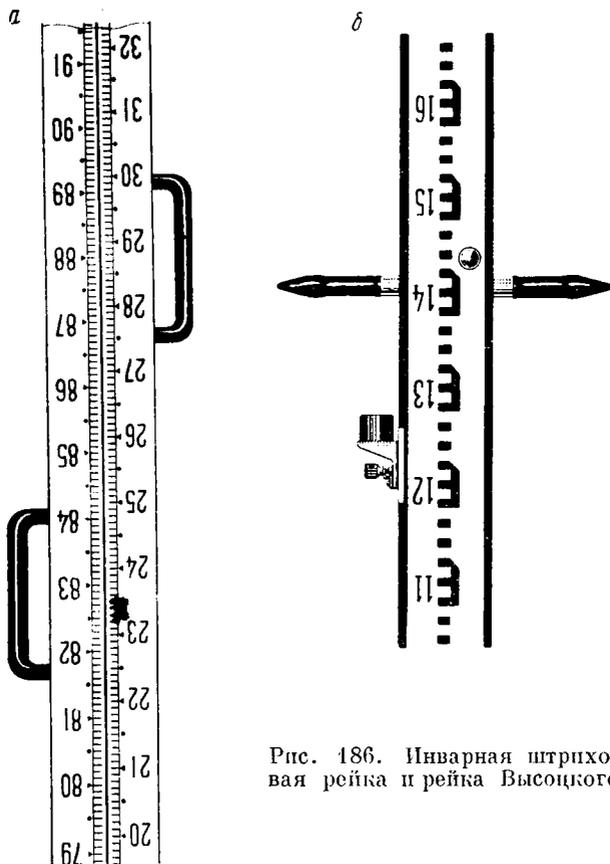


Рис. 186. Инварная штриховая рейка и рейка Высоцкого

2) трехметровая складная рейка НР3 двусторонняя с сантиметровыми делениями черного и красного цвета, предназначенная для нивелирования III и IV классов;

3) рейка Высоцкого (рис. 186, б) длиной 3 м цельная двусторонняя с сантиметровыми делениями черного и красного цвета, предназначенная для нивелирования III и IV классов;

4) рейка НР-1,5 длиной 1,5 м цельная двусторонняя с сантиметровыми делениями черного и красного цвета, предназначенная для нивелирования III и IV классов на поверхности и в шахте;

5) рейка НР-4 длиной 4 м складная односторонняя с сантиметровыми делениями черного и красного цвета, предназначенная для технического нивелирования на поверхности.

Народным предприятием «Карл Цейсс» в ГДР выпускаются рейки: четырехметровая складная рейка для нивелиров Koni-007 и Koni-025

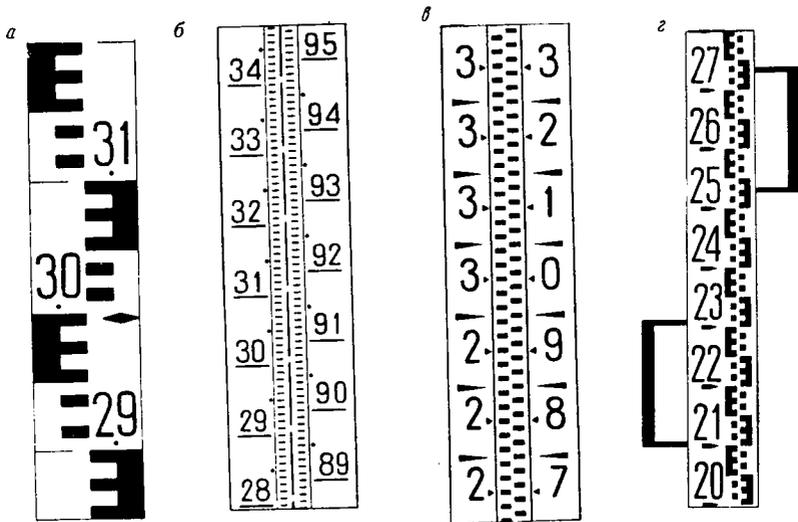


Рис. 187. Рейка народного предприятия «Карл Цейсс» и шашечная рейка для нивелира Ni-B5

(рис. 187, а); инварные трехметровые рейки с прямой и обратной оцифровкой предназначенные для нивелирования I и II классов (рис. 187, б и в). На рис. 187, г показана шашечная рейка, выпускаемая в Венгрии заводом MOM для нивелиров Ni-B5 и Ni-B6.

§ 81. ПОВЕРКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ НИВЕЛИРОВ

Основное требование, предъявляемое к нивелирам, — горизонтальность оси визирования в момент взятия отчета по рейке — определяется идеей метода геометрического нивелирования.

Для нивелиров с цилиндрическим уровнем это требование сводится к обеспечению параллельности визирной оси трубы и оси цилиндрического уровня.

Проверки глухих нивелиров. Выполнение основного требования в сочетании с обеспечением удобства работы приводит к необходимости выполнения в глухих нивелирах ряда условий.

1. Ось цилиндрического уровня должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира.

2. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира.

3. Ось цилиндрического уровня и геометрическая ось зрительной трубы должны находиться в параллельных отвесных плоскостях.

4. Визирная ось зрительной трубы должна быть параллельна оси цилиндрического уровня.

5. Одна из нитей сетки должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира.

Проверка условия 1 обязательна для нивелиров без элевационного винта. Устанавливают цилиндрический уровень параллельно линии, проходящей через два подъемных винта; вращая винты в разные стороны, выводят пузырек уровня на середину; поворачивают нивелир на 90° и третьим подъемным винтом вновь выводят пузырек на середину. Далее поворачивают инструмент на 180° , и если пузырек уровня окажется на середине, то условие выполнено. Если пузырек сместится, то исправительными винтами уровня перемещают его к середине на половину смещения. Окончательно выводят пузырек на середину подъемным винтом. Проверку повторяют до тех пор, пока пузырек перестанет сходить с середины при поворотах нивелира на 180° . Одновременно его ось вращения окажется отвесной.

Проверка условия 2. Подъемными винтами выводят пузырек круглого уровня на середину и поворачивают верхнюю часть нивелира на 180° . Если пузырек останется на середине, то условие выполнено. Если пузырек сместится, то исправительными винтами круглого уровня перемещают пузырек к середине на половину его смещения. Исправление достигается в два-три приема. При выполнении первой проверки, после приведения оси вращения нивелира в отвесное положение по цилиндрическому уровню, пузырек круглого уровня (если он при этом сместился с середины) устанавливают на середину его исправительными винтами.

Проверка условия 3 производится для нивелиров с элевационным винтом. На расстоянии 50 м от рейки устанавливают нивелир так, чтобы один из его подъемных винтов был расположен по направлению на рейку. Приводят вертикальную ось нивелира в отвесное положение по круглому уровню. Элевационным винтом выводят пузырек цилиндрического уровня на середину и делают отсчет по рейке. Действуя подъемными винтами, расположенными справа и слева от трубы нивелира, придают нивелиру небольшой наклон, следя, чтобы отсчет по рейке при этом не изменился, и замечают, на сколько делений и в какую сторону сместился пузырек уровня или остался на месте. Далее приводят инструмент в начальное положение, проверяют отсчет по рейке и вновь наклоняют нивелир теми же подъемными винтами, но в противоположную сторону, сохраняя неизменным отсчет по рейке. Если пузырек не смещается с середины или смещается в обоих случаях в одну сторону, то условие выполнено. При смещении пузырька в разные стороны больше чем на одно деление положение оси уровня исправляют его боковыми исправительными винтами.

Проверка условия 4 осуществляется двойным нивелированием. Для этого в землю забивают два кола на расстоянии 80 м один от другого. Между кольями дважды устанавливают нивелир так, чтобы его окуляр находился в 2—3 см от лицевой плоскости одной из реек

при наведении трубы на другую рейку. При каждой установке нивелира приводят его ось вращения в отвесное положение по круглому уровню, измеряют высоту инструмента по рейке, установленной вблизи окуляра, и делают отсчет по рейке при точно выведенном на середину пузырьке цилиндрического уровня.

Вычисляют ошибку отсчитывания по рейке, возникающую вследствие непараллельности визирной оси зрительной трубы оси цилиндрического уровня, по формуле

$$x = \frac{(a_1 + a_2)}{2} - \frac{(i_1 + i_2)}{2}, \quad (\text{X}, 12)$$

где a_1 и a_2 — отсчеты по рейкам при первой и второй установках нивелира;

i_1 и i_2 — высоты инструмента при тех же его установках.

Для технических и точных нивелиров ошибка x не должна превышать ± 4 мм. Если $x > \pm 4$ мм, то делают исправление: горизонтальную нить устанавливают вертикальными исправительными винтами сетки на отсчет, равный $(a_2 - x)$. В нивелире с элевационным винтом нить совмещают с отсчетом $(a_2 - x)$ при помощи элевационного винта, а сместившийся при этом пузырек уровня устанавливают на середину исправительными винтами цилиндрического уровня.

В высокоточных нивелирах угол i между проекциями визирной оси и оси цилиндрического уровня на вертикальную плоскость должен быть меньше $20''$.

При этой проверке в кольца забиваются кованые гвозди с полусферическими головками, на которые устанавливаются прецизионные рейки. Угол i определяется по формуле

$$i = \frac{(i_1 + i_2) - (a_1 + a_2)}{2d} \rho, \quad (\text{X}, 13)$$

где d — расстояние между кольями;

i_1 и i_2 — высоты инструмента при первой и второй его установках;

a_1 и a_2 — отсчеты по рейкам при этих же установках нивелира.

Если угол $i > 20''$, то трубу нивелира при помощи элевационного винта устанавливают на отсчет по рейке, равный $(a_2 + d \frac{i}{\rho})$, и вертикальными исправительными винтами уровня выводят пузырек уровня на середину ампулы. Затем вторично определяют угол i , и если $i < 20''$, то окончательное его значение определяют тремя приемами.

Расхождение между значениями угла i , полученными в разных приемах, не должно отличаться больше чем на $4''$. За окончательное значение угла i принимается среднее арифметическое из трех приемов.

Проверку и исправление угла рекомендуется делать в пасмурную погоду.

Проверка условия 5. На рейку, установленную неподвижно на расстоянии 20—30 м от нивелира, наводят зрительную трубу. Наводящим винтом плавно вращают трубу в горизонтальной пло-

скости. Если при этом отсчет по горизонтальной нити не будет изменяться, то условие выполнено, если отсчет будет изменяться, то сетку поворачивают. Для этого ослабляют винты, скрепляющие окулярный патрубок, поворачивают его и вновь закрепляют винты.

И Поверки и исследования нивелиров с самоустанавливающимися визирными осями. Основное требование для нивелиров этого типа заключается в следующем. При наклонах вертикальной оси вращения нивелира, не превышающих расчетные, линия визирования должна быть горизонтальна. Прежде чем приступить к работе с нивелиром, должны быть выполнены следующие проверки и исследования.

1. Оси установочных цилиндрических уровней должны быть перпендикулярны, а оси круглых уровней параллельны вертикальной оси вращения нивелира.

2. Горизонтальная нить сетки должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента.

Эти две проверки производятся так же, как первые две проверки глухого нивелира.

3. Линия визирования должна быть горизонтальна при наклонах оси вращения нивелира в пределах рабочих углов компенсатора.

Прежде чем производить эту проверку, необходимо исследовать правильность работы компенсатора. Для этого нивелир по установочным уровням приводят в рабочее положение. На расстоянии 80 м по направлению одного из подъемных винтов на забитый в землю кол устанавливают рейку. Вращением подъемного винта вначале в одном, а затем в противоположном направлении наклоняют трубу и берут отсчеты по рейке. Все отсчеты должны быть одинаковыми.

Если отсчеты меняются, то исправление может быть выполнено опытным механиком в условиях мастерской.

После этого проверка условия 3 производится так же, как и аналогичная (четвертая) проверка глухого нивелира без элевационного винта.

Проверки нивелира НЛ-3. Нивелир НЛ-3 должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира.

2. Горизонтальная нить сетки должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира.

Эти две проверки производятся так же, как у глухого нивелира.

3. Коэффициент высотмера должен быть равен 5.

Коэффициент k определяется по формуле

$$k = \frac{h_0}{h}, \quad (X,14)$$

где h_0 — превышение, полученное геометрическим нивелированием;
 h — превышение, полученное нивелированием наклонным лучом визирования.

Для проверки закрепляют точки A и B на расстоянии 100—150 м друг от друга на разных высотах так, чтобы превышение между

ними было не менее 4 м. Нивелир НЛ-3 устанавливают в стороне от створа точек на равных расстояниях (100—150 м) от них. Визирную нить наводят на одинаковые отсчеты $n_a = n_b$ на каждой рейке и берут отсчеты a и b по высотому штриху. Составляют разности

$$(n_a - a) - (n_b - b) = b - a.$$

Эти измерения производят сериями, не менее четырех, и в каждой серии должно быть по десять определений превышений.

Определив среднее арифметическое из разностей $(b_1 - a_1)$, $(b_2 - a_2)$, . . . , $(b_n - a_n)$, по формуле (X,10) получают

$$h = k(b - a)_{\text{ср}}. \quad (\text{X},15)$$

Так как превышения h_0 и h должны быть равны:

$$h_0 = h = k(b - a)_{\text{ср}}, \quad (\text{X},16)$$

то

$$k = \frac{h_0}{(b - a)_{\text{ср}}}. \quad (\text{X},17)$$

Приведение коэффициента высотомера к 5 производится в оптико-механической мастерской.

Если коэффициент не равен 5, то в вычисленное по формуле (X,10) превышение вводят поправку

$$\Delta h = (5 - k)h. \quad (\text{X},18)$$

4. При параллельных положениях визирной оси трубы и оси контактного уровня изображение высотомерного штриха должно совпадать с визирным штрихом.

Проверка производится двойным нивелированием. Нивелир устанавливают в точках A и B , расположенных на расстоянии 100—150 м одна от другой. При каждой установке нивелира визирную нить наводят на отсчет по рейке, равный высоте нивелира, и берут отсчет по высотому штриху. По полученным отсчетам вычисляют ошибку отсчитывания по рейке

$$x = \frac{i_A + i_B}{2} - \frac{b + a}{2}, \quad (\text{X},19)$$

где i_A и i_B — высота нивелира в точках A и B ;

a и b — отсчеты по высотому штриху по рейкам в точках A и B .

Если x окажется больше 2 мм, то трубу, наведенную высотомерным винтом на отсчет a , закрепляют зажимным винтом 6 (см. рис. 179) и вращением микрометрического винта 10 высотомерный штрих ставят на отсчет по рейке, равный $(b + x)$. После этого исправительными винтами уровня 8 выводят пузырек на середину ампулы.

Исследование хода фокусирующей линзы. На ровной открытой местности с твердым грунтом разбивают полуокружность радиусом 50 м и на продолжении диаметра AB закрепляют точку M на расстоянии 10 м от точки A (рис. 188). На полуокружности закрепляют кольями точки P_1, P_2, \dots, P_9 на расстояниях 20, 30, \dots , 100 м от точки M . В точке C устанавливают нивелир и берут отсчеты по рейке, последовательно устанавливаемой в точках $A, P_1, P_2, \dots, P_9, B$ в прямом и обратном ходах. Из прямого и обратного ходов вычисляют средние превышения точек P_1, P_2, \dots, B над точкой A , свободные от ошибок перефокусировки трубы.

Затем устанавливают нивелир над точкой M и вновь определяют средние превышения точек P_1, P_2, \dots, B над точкой A из прямого и обратного ходов.

Сравнивая между собой превышения одноименных точек, полученные нивелированием в точках C и M , определяют характер и величины ошибок от неправильного хода фокусирующей линзы. Для технических нивелиров эта ошибка не должна превышать 2 мм.

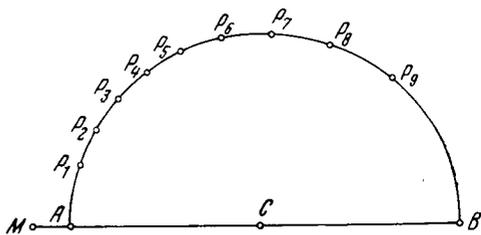


Рис. 188. Исследование правильности хода фокусирующей линзы

Определение средней квадратической ошибки определения превышения на станции. Средняя квадратическая ошибка определения превышения на станции находится из наблюдений двух сторон двух реек, удаленных от нивелира на одинаковые расстояния. Для нивелиров Н1, Н2 и НС2 эти расстояния равны 50 м; для нивелиров Н3 и НС3 — 75 м; для нивелира НС4 — 100 м; для нивелиров НТ, НПС — 150 м. Превышения определяют при исследовании нивелиров Н1, Н2 и НС2 не менее чем из 50 наблюдений и при исследовании нивелиров Н3, НС3, НС4, НТ и НПС не менее чем из 30 наблюдений.

Наблюдения выполняются преимущественно в пасмурную погоду или в утренние часы сериями, каждая из которых состоит из 10 измерений. При переходе от одной серии к другой изменяют высоту нивелира на произвольную величину.

Во время исследований рейки должны быть строго вертикальны, а штатив устойчив.

Средняя квадратическая ошибка вычисляется по формуле

$$M = \pm \sqrt{\frac{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 + \dots + \mu_n^2}{n}}, \text{ мм,}$$

где n — количество серий измерений;

μ_i вычисляется по формулам:

при исследовании нивелиров с уровнями

$$\mu_i = \pm \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{9}};$$

при исследовании нивелиров с самоустанавливающимися линиями визирования

$$\mu_i = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{10}};$$

где V_i — отклонения измеренных превышений от среднего арифметического в каждой серии;

δ_i — отклонение измеренных превышений от их значения, принимаемого за истинное.

Г Л А В А XI

УХОД ЗА МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

§ 82. ХРАНЕНИЕ, ОСМОТР И ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Хранить инструменты следует в специальном помещении — складе. Склад должен быть сухим, светлым и с хорошей вентиляцией. Температура склада должна поддерживаться постоянной в пределах 12—16° С.

Для хранения инструментов в складе устанавливаются полочные стеллажи. Стеллажи не рекомендуется устанавливать у наружных стен, печей и батарей центрального отопления. Инструменты на полках хранятся в ящиках. Штативы, рейки и веши хранятся в стойках, укрепленных к внутренним стенам, или в стойках в виде клеточных стеллажей*.

Любое имущество, поступающее на склад, может приниматься только при наличии приходных документов: счетов, накладных и т. п. На каждый поступающий инструмент составляется акт, в котором указывается, когда, откуда и от кого он получен, его наименование, номер, завод-изготовитель, подробное описание состояния инструмента, его принадлежностей и упаковки. Акт составляется в трех экземплярах: один остается на складе, другой передается в бухгалтерию, третий высылается поставщику; при отсутствии претензий высылка копии акта поставщику не обязательна.

На складе ведутся инвентарная и материальная книги, по которым в любой момент можно установить количество и качество всего имущества, находящегося на складе.

В инвентарную книгу в соответствующий раздел (теодолиты, нивелиры и т. д.) заносят в порядке поступления имущество долгосрочного хранения. Книга должна содержать следующие данные: когда и откуда поступил инструмент; его название, наименование завода, заводской и инвентарный номер, перечень принадлежностей,

* Подробнее об этом можно прочесть в книге: Леонтович В. Г. «Уход за геодезическими инструментами». Изд-во Академии архитектуры УССР, 1953.

стоимость и дефекты. Кроме того, в книге отмечают результаты осмотров, чистки, проверок, ремонтов и т. п.

В материальную книгу заносят сведения о поступлении и расходе имущества с ограниченным сроком хранения. Фабричный номер инструмента при помощи трафаретов или пуансонов наносят на штативы, ящики и другие принадлежности, относящиеся к нему.

Для каждого инструмента составляют паспорт, в котором дается описание инструмента, заносятся результаты исследований, приводится перечень обнаруженных дефектов. В дальнейшем паспорт пополняют сведениями о недостатках, выявленных в процессе полевых работ.

Неисправные инструменты направляют в ремонт. При этом составляют сопроводительный документ, в котором указывается, какие исправления следует сделать. Копия этого документа остается на складе. После ремонта при приемке составляют акт, подтверждающий наличие исправлений.

Для производства работ со склада выдаются только вполне исправные инструменты. Выдача инструмента производится определенному лицу, чтобы ответственность была конкретной, не обезличенной. Приемка инструмента на склад после окончания полевых работ сопровождается тщательным осмотром. При обнаружении повреждений или утере комплектующих частей составляется акт. При осмотре теодолитов и нивелиров прежде всего обращается внимание на зажимные и микрометрические части инструмента, а вторые обеспечивать плавное движение. Нужно обращать внимание также на исправность футляра, закрепительных колодок, винтов и замка ящика.

Осмотр штатива должен подтвердить наличие всех болтов, крепящих ножки к головке, станového винта, исправность башмаков и т. д. При осмотре рейки нужно обращать внимание на исправность пятки и арматуры, служащей для складывания или скрепления частей рейки, а также на наличие трещин и повреждений изображений шашек и цифр.

§ 83. ЧИСТКА И СМАЗКА ИНСТРУМЕНТОВ

Геодезические инструменты должны содержаться в идеальной чистоте. Для этого их нужно ежедневно после работы тщательно очищать от пыли, а в дождливую погоду протирать и просушивать. Чистку следует производить полотняными, стиранными тряпками. Пыль нужно удалять с инструмента мягкой кистью, чтобы не повредить лакировку.

Чистку следует начинать с верхних частей и заканчивать нижними. Нужно следить, чтобы кисть не касалась смазанных маслом частей. Для предотвращения окисления неокрашенные и никелированные части инструмента следует протирать слегка промасленной тряпочкой. Остатки масла и грязи смываются с осей, втулок и винтов бензином, спиртом или эфиром. При этом следят, чтобы растворители не попадали на лакированные поверхности и лимбы.

Чистку оптических частей следует производить только в крайних случаях, так как очень легко повредить просветляющую пленку, что ухудшает качество оптических частей.

При чистке лимбов и верньеров нужно избегать касания их поверхностей пальцами, так как при этом можно легко разрушить краску штрихов и оставить пятна, затрудняющие отсчетывание. Хорошее изображение шкал лимбов и верньеров зависит прежде всего от правильной установки иллюминаторов, луп и микроскопов. Поэтому прежде чем приступать к чистке лимбов и верньеров, следует проверить установку этих систем.

Пыль с лимбов нужно смахивать мягкой кисточкой.

Для смазки трущихся поверхностей инструмента следует применять те масла, которые рекомендует завод в описаниях, прилагаемых к инструментам. При смазке нужно следить, чтобы масло не попадало на поверхности, покрытые краской и лаком.

Разборка инструмента может производиться только при крайней необходимости и только опытным работником. Разборку производят в крытом, хорошо освещенном помещении в условиях, обеспечивающих сохранность деталей инструмента. Прежде чем приступить к разборке, нужно изучить конструкцию инструмента. В процессе разборки нужно запоминать последовательность ее с тем, чтобы потом в обратном порядке собрать инструмент.

Мелкий ремонт инструмента, например регулировку подъемных винтов, замену сетки нитей и исправительных винтов, исправление пружин, замену ампул уровней и др. должен уметь выполнять сам маркшейдер или геодезист. Для этого необходимо иметь следующий набор инструментов и материалов: отвертки разных размеров, плоскогубцы, круглогубцы, кусачки, пинцет, напильник с мелкой насечкой, чистые полотняные тряпки, бензин, спирт, масло, вазелин, гигроскопическую вату, гипс, зубную щетку; запасные части: исправительные винты, сетки в диафрагмах, ампулы уровней, молочные и предохранительные стекла.

Среди ремонтов, которые могут выполняться непосредственно маркшейдером или геодезистом, некоторого навыка требуют: исправление пружин контрупоров микрометричных винтов и замена разбитой ампулы уровня.

Исправление пружины контрупора производят тогда, когда она не сдвигает палец при вывинчивании винта. При исправлении пружину надевают на стержень подходящего диаметра (например, на гвоздь) и растягивают ее.

Для замены разбитой ампулы оправу уровня снимают с инструмента, отделяют от оправы концевые пробки и при помощи отвертки удаляют из оправы осколки ампулы и гипс. Осторожно вставляют в оправу новую ампулу и, совместив деления с отверстием оправы, поджимают ее при помощи прокладок из бумаги к верхней части оправы. Затем заливают внутрь оправы гипс, разведенный до консистенции густой сметаны, и вставляют концевые пробки. Вытесненный пробками гипс удаляют после застывания.

§ 84. ОБРАЩЕНИЕ С ИНСТРУМЕНТАМИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ И ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

На место работы инструменты должны отправляться упакованными в ящики. Все принадлежности, находящиеся в ящике, должны быть прочно закреплены. Штативы упаковывают в ящики или обшивают мешковиной или рогожей. Рейки обматывают соломенными жгутами, а затем обшивают рогожей. Прецизионные рейки транспортируют упакованными в ящики.

Если до места работы приходится ехать на грузовике или подводе, то ящики с инструментами и тюки со штативами и рейками следует укладывать так, чтобы они не могли перемещаться, а сверху их нужно накрыть брезентом. При перевозке на подводе инструменты должны быть привязаны к ней веревками.

При спуске в шахту ящик с инструментом нельзя ставить на дно клетки, его следует держать в руках.

На поверхности легкие инструменты при расстояниях между станциями, меньших 1 км, можно переносить на штативе в собранном виде. Прежде чем переносить инструмент на штативе, надо все съемные части (буссоль, отвес) уложить в ящик. Нужно закрепить становой и зажимные винты, магнитную стрелку буссоли, на объектив надеть крышку. После этого вынуть ножки штатива из земли, сдвинуть и застегнуть.

При переходах в подземных выработках инструмент должен быть снят со штатива. Нести его следует в руках, держа за подставку или уложив в ящик.

При подъеме большого инструмента на сигнал нужно принять меры, чтобы предохранить его от падения или от ударов о сигнал. Подъем производится с наружной стороны сигнала на канате при помощи двух блоков под непосредственным руководством самого наблюдателя. Оптические теодолиты в специальной упаковке, допускающей их переноску за плечами, разрешается поднимать на сигнал по лестницам.

После установки инструмента на штатив, прежде чем приступить к центрированию и нивелированию его, нужно подъемные и микрометрические винты поставить на середину их хода; неудобно для работы и вредно для инструмента, когда винты находятся в крайних положениях.

Подъемные винты изнашиваются прежде всего из-за несоблюдения правил установки инструмента: нужно следить, чтобы головка штатива устанавливалась как можно более горизонтально; это сократит излишнее вращение подъемных винтов при окончательном нивелировании инструмента, устранив перекос винтов и ускорит установку инструмента в рабочее положение.

Работать исправительными винтами следует осторожно, и перед тем как начать действовать одним, нужно отпустить другой. Во время работы с инструментом подвижные его части надо перемещать так, чтобы движение было плавным, без толчков и резких остановок.

Инструмент должен содержаться в чистоте, поэтому, прежде чем укладывать его в ящик, нужно кисточкой и куском фланели очистить его от пыли и грязи. Если инструмент попал под дождь, то перед укладкой в ящик следует дать ему просохнуть и затем обтереть фланелевой тряпкой.

Хороший уход за геодезическим и маркшейдерским инструментом гарантирует высокую точность его работы, безотказность в работе и долговечность.

ЛИТЕРАТУРА

- Араев И. П. Оптические теодолиты средней точности. М., Геодезиздат, 1955.
- Баргенов А. Г. Оптические контрольно-измерительные приборы. М., ОНТИ, 1937.
- Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. М., изд-во ГМУ, 1966.
- Грейм И. А. Маркшейдерско-геодезические дальномеры. М., Углетехиздат, 1956.
- Груббер О. Оптическое измерение длин и полигонометрия. М., Углетехиздат, 1959.
- Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические приборы и инструментование. М., Углетехиздат, 1958.
- Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. М., изд-во «Недра», 1968.
- Дурнева П. И. Современные зарубежные нивелиры с самоустанавливающей линией визирования. «Геодезия и картография», 1956, № 4.
- Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. М., Геодезиздат, 1959.
- Захаров А. И., Зуйков И. И. Теодолиты средней точности и оптические дальномеры. М., изд-во «Недра», 1965.
- Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. М., изд-во «Недра», 1966.
- Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М., изд-во «Недра», 1966.
- Леонтович В. Г. Уход за геодезическими инструментами. Изд-во Академии архитектуры УССР, 1953.
- Маслов А. В. О зрительной трубе с внутренней фокусировкой. Труды Моск. ин-та инж. землеустройства, 1954, № 1.
- Оглоблин Д. Н., Рейзенкинд И. Я. Новые маркшейдерские приборы. М., изд-во «Недра», 1967.
- Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. М., Физматгиз, 1958.
- Романов Л. А. Технические нивелиры. Геодезиздат, 1956.
- Соколов М. Н. Теодолиты малой и средней точности. М., Геодезиздат, 1956.
- Турыгин И. А. Прикладная оптика. М., изд-во «Машиностроение», 1965.
- Фефилов Б. В. Прикладная оптика. М., Геодезиздат, 1947.
- Филоненко А. С., Шипицын Н. Г. Практикум по высшей геодезии. Исследование высокоточных геодезических инструментов. М., изд-во «Недра», 1965.
- Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М., изд-во «Машиностроение», 1966.
- Шипиловский А. А. Прикладная физическая оптика. М., Физматгиз, 1961.
- Яровой В. Д. Краткий очерк развития геодезического инструментостроения в СССР. М., Геодезиздат, 1955.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
§ 1. Предмет и содержание курса	5
Г л а в а I. Основные сведения из геометрической оптики	5
§ 2. Основные законы геометрической оптики	9
§ 3. Плоские зеркала	10
§ 4. Плоско-параллельная пластинка	12
§ 5. Призмы	15
§ 6. Центрированная оптическая система. Преломление лучей сферической поверхностью	18
§ 7. Идеальная оптическая система	20
§ 8. Главные точки, плоскости и фокусные расстояния центрированной оптической системы	21
§ 9. Формулы для определения координат сопряженных точек относительно фокусов и главных точек	24
§ 10. Формулы для определения увеличения оптической системы	25
§ 11. Построение изображений сопряженных точек и отрезков через оптические системы	27
§ 12. Сочетание двух оптических систем с общей осью	31
§ 13. Оптическая сила системы. Диоптрия	31
§ 14. Линзы конечной толщины. Формулы для определения фокусного расстояния, положения главных плоскостей и фокусов	35
§ 15. Тонкие линзы. Эквивалентные системы из тонких линз. Телеобъектив	38
§ 16. Понятие о действующей диафрагме. Входной и выходной зрачки	40
§ 17. Диафрагма поля зрения	43
Г л а в а II. Оптические части маркшейдерско-геодезических инструментов	43
§ 18. Классификация оптических частей маркшейдерско-геодезических инструментов	43
§ 19. Лупа	44
§ 20. Микроскоп	46
§ 21. Зрительная труба	47
§ 22. Определение увеличения зрительной трубы	53
§ 23. Поле зрения трубы	55
§ 24. Разрешающая способность зрительной трубы	57
§ 25. Потери света в оптической системе. Просветление оптики	59
§ 26. Яркость зрительной трубы	62
§ 27. Хроматическая и сферическая аберрации	64
§ 28. Сложные объективы	69
§ 29. Сложные окуляры	70
§ 30. Колебания визирной оси зрительной трубы при фокусировке	72

§ 31.	Точность визирования зрительной трубы	73
§ 32.	Коллиматоры и коллиматорные пары	75
Г л а в а III. Осевые устройства и механические части инструментов		77
§ 33.	Общие сведения	77
§ 34.	Вертикальные оси теодолитов	77
§ 35.	Микрометрично-зажимные устройства горизонтального круга	84
§ 36.	Подставки и горизонтальные оси зрительных труб	88
§ 37.	Подставки-треножки	91
§ 38.	Вертикальные оси и микрометрично-зажимные устройства в нивелирах. Элевационный винт	93
§ 39.	Исправительные винты уровней и сеток нитей	96
§ 40.	Штативы, консоли, устройства центрирования и сигналы	97
Г л а в а IV. Уровни		102
§ 41.	Назначение и устройство уровней	102
§ 42.	Геометрические элементы уровня и типы ампул	104
§ 43.	Определение наклонности оси уровня	106
§ 44.	Уровни с призмёнными системами	108
§ 45.	Определение цены деления уровня	109
Г л а в а V. Отсчетные устройства в угломерных инструментах		118
§ 46.	Виды отсчетных устройств	118
§ 47.	Лимбы	119
§ 48.	Верньер	121
§ 49.	Микроскоп-оценщик	122
§ 50.	Шкаловый микроскоп	124
§ 51.	Односторонний оптический микрометр	130
§ 52.	Двусторонние оптические микрометры	133
Г л а в а VI. Оптические дальномеры		147
§ 53.	Классификация оптических дальномеров. Предрасчет точности	147
§ 54.	Нитяной дальномер в трубе с внутренней фокусировкой	149
§ 55.	Принцип измерения параллактического угла β и базиса b в дальномерах двойного изображения	153
§ 56.	Дальномеры двойного изображения с постоянным базисом при определяемой точке	158
§ 57.	Дальномеры двойного изображения с постоянным параллактическим углом	164
§ 58.	Дальномеры двойного изображения редуционные	173
§ 59.	Дальномеры двойного изображения с переменным базисом при инструменте	177
Г л а в а VII. Теодолиты		186
§ 60.	Новый государственный стандарт «Теодолиты»	186
§ 61.	Теодолиты технической точности оптические	186
§ 62.	Теодолиты точные оптические	195
Г л а в а VIII. Инструментальные ошибки измерения углов		207
§ 63.	Ошибки измерения углов	207
§ 64.	Эксцентриситет алидады горизонтального круга	208
§ 65.	Коллимационная ошибка	213
§ 66.	Ошибка от неперпендикулярности оси вращения трубы вертикальной оси инструмента	215
§ 67.	Ошибка, вызываемая наклоном вертикальной оси инструмента	216
§ 68.	Ошибки нанесения делений лимба, отсчитывания и визирования	218
§ 69.	Проверки и исследования угломерных инструментов	219
Г л а в а IX. Тахеометры		225
§ 70.	Новый государственный стандарт «Тахеометры»	225
§ 71.	Тахеометры-автоматы	226
§ 72.	Редуционный тахеометр Redta-002	234

§ 73. Базисный редуционный тахеометр BRT-006	239
§ 74. Столик Kartie-250	243
Г л а в а X. Нивелиры	247
§ 75. Общие сведения о современных нивелирах	247
§ 76. Глухие нивелиры с уровнем	250
§ 77. Нивелиры с самоустанавливающимися визирными линиями	253
§ 78. Нивелир с наклонным лучом визирования	264
§ 79. Высокоточные нивелиры	266
§ 80. Рейки нивелирные	272
§ 81. Проверки и исследования нивелиров	274
Г л а в а XI. Уход за маркшейдерско-геодезическими инструментами	281
§ 82. Хранение, осмотр и паспортизация	281
§ 83. Чистка и смазка инструментов	282
§ 84. Обращение с инструментами при транспортировании и во время работы	284
Литература	285

Федоров Борис Дмитриевич

МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Редактор издательства *Т. Н. Малышева*. Техн. редакторы *В. В. Соколова, Л. Г. Лаврентьева*
Переплет художника *Э. Л. Эрман* Корректор *М. В. Дроздова*

Сдано в набор 16/XI 1970 г. Подписано в печать 26/I 1971 г. Т-00623. Формат 60 × 90^{1/16}.
Печ. л. 18. Уч.-изд. л. 17,9. Бумага № 1. Индекс 1—1—1. Заказ 2059/3245—10.
Тираж 8700 экз. Цена 76 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский пр., 91.