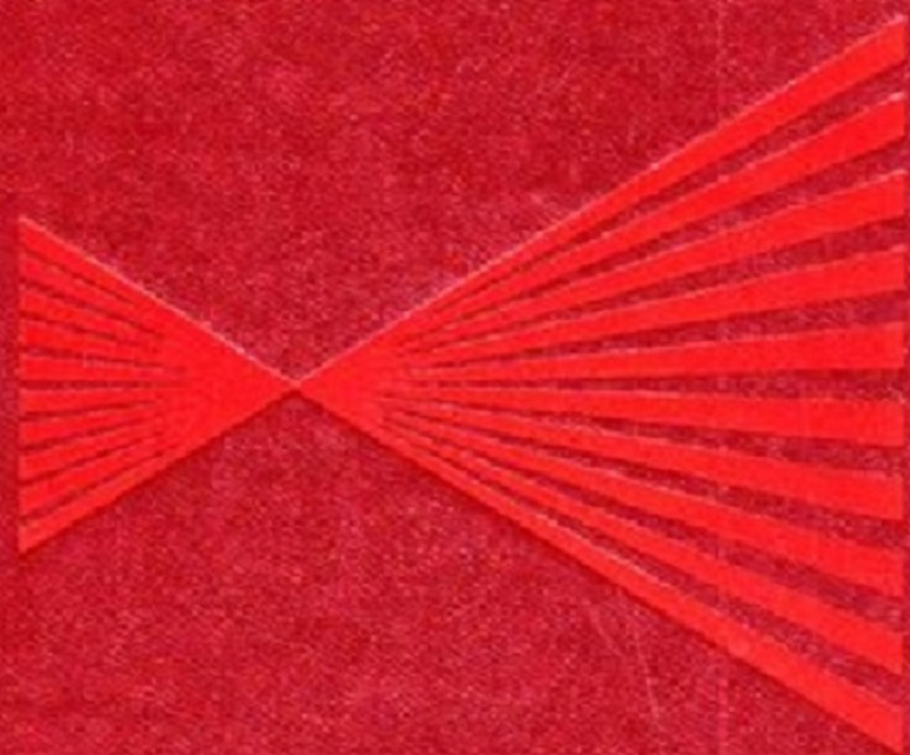


ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЕ

П. Н. КУЗНЕЦОВ
И. Ю. ВАСЮТИНСКИЙ
Х. К. ЯМБАЕВ



П. Н. КУЗНЕЦОВ
И. Ю. ВАСЮТИНСКИЙ
Х. К. ЯМБАЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ инструментоведение

ДОПУЩЕНО МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНИКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ



МОСКВА "НЕДРА" 1984

Кузнецов П. Н., Васютинский И. Ю., Ямбаев Х. К. Геодезическое инструментоведение: Учебник для вузов.— М.: Недра, 1984.—364 с.

Приведены основные положения геометрической и физической оптики, необходимые для изучения современных геодезических приборов. Рассмотрены теория и устройство отдельных частей геодезических приборов и методы их исследований. Кратко изложены технология изготовления оптического стекла и деталей из него, методы обработки металлов и других материалов, используемых при изготовлении приборов. Сформулированы основные правила эксплуатации, транспортировки и хранения геодезических приборов, вопросы безопасного ведения работ и технического обслуживания приборов. Рассмотрены принципиальные оптические схемы, устройство, исследования, проверки и юстировка основных типов геодезических приборов: теодолитов, нивелиров, дальномеров, тахеометров и кипрегелей и наиболее распространенных нестандартных геодезических приборов.

Для студентов геодезических специальностей вузов.

Табл. 24, ил. 200, список лит.— 50 назв.

Рецензенты: кафедра геодезии Львовского политехнического института и канд. техн. наук Г. Е. Рязанцев (ГПИ)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Геодезическое приборостроение в нашей стране за последние годы достигло значительных успехов. Обновился производственный парк геодезических приборов: теодолитов, нивелиров, дальномеров, кипрегелей. Широко внедряются электронные и лазерные приборы.

Современные геодезические приборы удобны в работе, высокопроизводительны, но их правильная эксплуатация требует от исполнителей углубленных знаний. С этой целью в учебные планы геодезических специальностей вузов с 1971 г. включена новая дисциплина «Геодезическое инструментоведение». За годы преподавания геодезического инструментоведения в ордене Ленина Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии на кафедре геодезии и обработки измерений накоплен определенный опыт, который авторы попытались обобщить в предлагаемом учебнике.

Учебник составлен в соответствии с новой программой, разработанной на кафедре и утвержденной Минвузом СССР.

Книга включает две части: основы инструментоведения и современные геодезические приборы.

Предисловие, гл. 1, §§ 5—21, 40—42, 47—49, 58—62, гл. 12 и приложение написаны П. Н. Кузнецовым; §§ 27—29, 43—46, 64, 65, гл. 11 — И. Ю. Васютинским; §§ 4, 22—26, 30, 31, гл. 5, 6, 9, § 63 — Х. К. Ямбаевым. В написании § 57 принимал участие В. А. Овчинников.

ОСНОВЫ ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЯ

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЯ

Геодезическое инструментоведение — прикладная техническая дисциплина, изучающая геодезические приборы, их теорию, устройство, методы исследований, а также правила обращения с приборами и ухода за ними.

В ленинском Декрете об учреждении Высшего геодезического управления в 1919 г., наряду с другими важнейшими целями, указывалось на решение задачи по изготовлению и снабжению геодезическими инструментами и оптическими приборами ведомств и учреждений страны и отмечалась важность организации научных работ не только в области геодезии, астрономии, картографии, но и в области оптики и геодезического инструментоведения.

На современном этапе интенсивного развития народного хозяйства нашей страны актуальность положений ленинского Декрета не только не уменьшается, а напротив, существенно увеличивается в связи с бурным развитием научно-технического прогресса и возросшим экономическим потенциалом СССР.

Одной из важнейших задач повышения качества подготовки молодых специалистов в области геодезии является углубление их знаний о геодезических приборах.

Инструментоведение тесно связано с геодезией, физикой, материаловедением и другими науками. Геодезическое инструментоведение в своем развитии, например, учитывает требования геодезии к точности, производительности и полевым экспедиционным условиям работы приборов. В свою очередь, геодезия при разработке и выборе методов измерений, проектировании и организации работ опирается на достижения геодезического приборостроения и геодезического инструментоведения.

Современный инженер-геодезист, инженер-астроном-геодезист, инженер-исследователь природных ресурсов Земли и Мирового океана должен хорошо знать геодезические приборы, чтобы уметь правильно их выбирать и успешно применять для данного вида и класса работ, устранять в случае необходимости их неисправности и участвовать в разработке новых высокопроизводительных геодезических приборов.

§ 2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЯ

Трудно установить время, когда были созданы первые простейшие геодезические инструменты. Их появление относится к глубокой древности и связано с насущными потребностями материальной жизни общества. Живопись на египетских гробницах свидетельствует о том, что в те времена земельные участки измерялись шнуром с узлами. При сооружении каналов применялись желоба, наполненные водой, и отвесы, подвешенные к концам желобов. В VI в. до н. э. существовали такие крупные инженерные сооружения, как канал между Нилом и Красным морем, оросительные системы в долине Нила. Эти сооружения не могли быть построены без соответствующих геодезических измерений, геодезических инструментов.

О развитии геодезических инструментов во II в. до н. э. свидетельствует сочинение Герона Александрийского «О диоптрах», где описаны простейшие инструменты для измерения углов и нивелиры, устроенные в виде сообщающихся сосудов, заполненных жидкостью. К той же эпохе относится изобретение александрийским астрономом Гиппархом угломерного инструмента — астролябии (в переводе на русский язык означает «беру звезду»).

В России появление первых геодезических инструментов относится к X—XII вв. В сборнике законов Древней Руси «Русская Правда», относящемся к XI в., содержатся постановления о земельных границах, которые устанавливались путем измерений на местности простейшими геодезическими инструментами.

В X в. багдадский астроном Худжанди изобрел секстант. Выдающийся хорезмский ученый-энциклопедист Бируни в своем трактате «Ключ к астрономии» изложил метод определения длины окружности Земли, написал обширный труд по топографии Средней Азии и сконструировал первую машину для деления лимбов. Универсальный прибор, заменяющий астролябию и квадрант, прибор из трех соединенных между собой линеек для измерения углов между направлениями на небесные светила, был установлен в обсерватории выдающегося узбекского астронома и математика Улугбека, жившего на рубеже XIV и XV вв.

В 1606 г. голландским мастером очков Липперсгеем получена привилегия от правительства на открытие зрительной трубы. К тем же годам относится изобретение микроскопа современником и соотечественником Липперсгея голландцем Янсенем.

Г. Галилей изготовил зрительную трубу в 1609 г.

В 1611 г. Кеплер создал зрительную трубу с сеткой нитей. Кеплером впервые была разработана теория зрительной трубы,

микроскопа и глазного аппарата — первая теория оптических приборов. «Его «Диоптрика» (1611 г.) по форме и содержанию, — пишет академик Г. Г. Слюсарев, — мало отличается от современных учебников по геометрической оптике...».

И. Ньютону принадлежат основные формулы параксиальной оптики, формулы для вычисления сферической аберрации одной сферической поверхности и открытие дисперсии.

Л. Эйлер первым дал расчеты ахроматического объектива для зрительной трубы.

М. В. Ломоносов предложил и построил «ночезрительную трубу», рефрактометр, отражательный зеркальный телескоп и более двух десятков инструментов для мореходной астрономии, разработал научные основы цветовидения и астрофизики. Используя свои приборы, открыл наличие атмосферы на Венере.

К. Ф. Гаусс в «Диоптрических исследованиях» (1840) заложил основы теории построения изображения в системе линз.

В 1662 г. французский механик М. Тевено изготовил цилиндрический уровень, усовершенствованный английским механиком Д. Рамсденом и французским ученым А. Шези, применившими шлифовку внутренней поверхности трубки.

Приспособления для отсчитывания по шкалам появились в XVII и XVIII вв. Верньер изобретен в 1620 г. голландцем П. Вернье. Микроскоп с винтовым микрометром сконструирован Рамсденом в XVIII в.

Дальномерные нити в зрительной трубе применены итальянцем Монтанари в 1674 г.

Первый теодолит, принципиально похожий на современный, был создан в 1730 г. английским механиком Д. Сиссоном. В 1791 г. он был усовершенствован Д. Рамсденом, установившим микроскоп и окуляр, и Т. Рейхенбахом в 1812 г., применившим дальномерные нити и повторительную систему.

Мензула изобретена около 1590 г. И. Преториусом. Вместо кипрегеля в то время использовалась линейка с диоптрами.

В 1643 г. итальянец Торричелли создал первый ртутный чашечный барометр, примененный на практике в 1647 г. Паскалем. Около 1800 г. появился сифонный барометр. Барометранероид изобретен в 1847 г. Дифференциальный барометр сконструирован в 1874 г. Д. И. Менделеевым, морской барометр — М. В. Ломоносовым в 1759 г.

Нивелиры нашли практическое применение лишь в середине XIX в. (в 1857 г. в мастерской Амслера—Лаффона построен нивелир с перекладным уровнем). Высокоточный нивелир с уровнем при трубе создан в 1890 г. русским геодезистом Д. Д. Гедеоновым.

В конце XVIII и начале XIX вв. сконструированы новые системы вертикальных осей. В тот же период русский механик И. П. Кулибин изготавливает астролябии с трубой, телескопы с отражательными зеркалами и мерные цепи.

Особое место в истории развития геодезического инструмен-

товедения и методов геодезических измерений занимают градусные измерения, проводимые в России с 1816 по 1855 г. на протяжении почти 40 лет под руководством военного геодезиста генерала К. П. Теннера и первого директора Пулковской обсерватории академика В. Я. Струве. Дуга Струве $25^{\circ}20'$ по меридиану, от берегов Северного Ледовитого океана до устья р. Дуная, протяженностью около 3000 км, измерена с наивысшей для того времени точностью. Градусные измерения Струве—Теннера оказали решающее влияние на развитие теории и методов геодезических и астрономических работ во всем мире. К. И. Теннер сконструировал оригинальный тип базисного прибора, который позволял измерять базисы с точностью 1 : 300 000. В. Я. Струве разработал названный его именем способ измерения углов в триангуляции, создал вертикальный круг и лучший для того времени базисный прибор, применявшийся в течение всего XIX в. Комплект прибора Струве хранится в лаборатории МИИГЛиК.

П. А. Зарубиным в 1850 г. создан планиметр. Профессором физики Новороссийского университета Ф. Н. Шведовым разработана система оптических дальномеров.

Как самостоятельная дисциплина геодезическое инструментование возникло в середине XIX в. в связи с быстрым развитием прикладной оптики и машиностроения.

Во второй половине XIX в. в Западной Европе стали быстро развиваться отрасли промышленности, занятые выпуском оптических и других точных приборов. Ускоренное развитие геодезического инструментования в этот период шло по двум направлениям. В связи с повышением требований к точности геодезических измерений большое внимание стало уделяться исследованиям геодезических приборов. Проводятся фундаментальные исследования К. И. Теннером, В. Я. Струве, Ф. В. Бесселем, С. Д. Рыльке, К. А. Петерсом и другими астрономами и геодезистами. Знаменитый русский ученый Д. И. Менделеев — создатель в 1893 г. Главной палаты мер и весов (Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева) — внес крупный вклад в совершенствование мер длины и их эталонирования. При нем была создана передовая система обеспечения достоверности и сопоставимости результатов измерений, выполняемых разными лицами, приборами и в разных условиях. Д. И. Менделеев по праву является основоположником метрологического обеспечения единства измерений.

Второе направление связано с введением элементов автоматки, в первую очередь, обусловленное стремлением упростить и ускорить процесс определения горизонтальных проложений и превышений тахеометрами и кипрегелями.

Первые попытки редуцировать механическим путем наклонные расстояния были сделаны французами Огреве в 1800 г., Муано в 1853 г., Санге в 1865 г.

В 70—80 гг. XIX в. началось изготовление тахеометров с подвижными линейками, с тангенциальным винтом или шкалой, устройствами для регулирования фокусного расстояния или расстояния между дальномерными нитями (тахеометры Санге, Вагнера, Крейтера и др.) [24].

Широкое распространение получили преобразователи оптико-механического и оптического типа с автоматическим регулированием расстояний между нитями [преобразователь итальянских инженеров Ронкагли и Урбани (1890 г.), диаграммы немецкого профессора Гаммера (1896 г.) и венгерского инженера Беззегя (1959 г.)].

Номограммные приборы с преобразователями типа диаграммы Гаммера выпускаются большинством западных фирм и в СССР до настоящего времени.

В 1925 г. по предложению швейцарского топографа Р. Босхардта фирмой «К. Цейсс» изготовлен редуционный тахеометр с дальномером двойного изображения. В наши дни прибор выпускается под названием Редта-002. Подобные приборы выпускались и другими фирмами: «Керн» — ДК-RT (1950 г.) «Вильд» — РДН (1945 г.). В СССР в 1970 г. создан новый редуционный тахеометр ТД (ТП) конструкции А. И. Захарова.

В конце XIX в. появились дальномеры внутрибазные. Среди современных приборов такого типа выпускаются: BRT-006 («К. Цейсс», Иена, 1960 г.), ТВ (СССР, А. И. Захаров, 1969 г.).

Созданию современных, малогабаритных и надежных геодезических приборов посвятили свою жизнь многие геодезисты и приборостроители. Например, швейцарский геодезист-конструктор Г. Вильд (1877—1951) предложил внутреннюю фокусировку в зрительной трубе, контактный уровень, цилиндрические оси, оптический микрометр, инварные рейки. Созданный в 1922 г. фирмой «К. Цейсс» первый оптический теодолит имел стеклянные круги, впервые примененные в Чехословакии (Йозеф и Ян Фрич, 1866 г.). В конструкции теодолита были внедрены изобретения Вильда.

Несмотря на все усилия русских ученых (геодезистов и астрономов) и определенные успехи отдельных мастерских (при Пулковской обсерватории — с 1839 г., при Генеральном штабе — с 1811 г. и др.), где были созданы многие точные геодезические и астрономические приборы (универсальные инструменты, повторительные круги, большие угломерные инструменты, базисные приборы, точные нивелиры и др.), а также мензулы и кипрегели, в дореволюционной России промышленное производство геодезических приборов было поставлено слабо. Не изготавливалась и оптика; лишь только в 1906 г. фабрика Таубера-Цветкова провела первый опыт по изготовлению оптических деталей, и в 1902 г. в Межевом институте начинается чтение курса теории оптических инструментов профессором П. М. Кисловым.

В 1910—1913 гг., когда производство геодезических приборов в царской России достигло наибольшего расцвета, выпуск минутных теодолитов московскими фабриками Швабе, Цветкова-Таубера и др. вместе составлял лишь около 2 тыс. в год. Не было налажено промышленное производство оптического стекла. Для точных и высокоточных геодезических работ использовались приборы иностранных фирм. Даже уровни, наводящие винты, кремальеры и микрометричные винты к теодолитам и мерные ленты ввозились из-за границы.

Благоприятные условия для развития отечественного геодезического приборостроения возникли после Великой Октябрьской социалистической революции. В 1918 г. был организован Государственный оптический институт (ГОИ). В 1919—1920 гг. освоено промышленное производство оптического стекла.

В 1923 г. были созданы заводы «Геодезия» и «Геофизика».

Основателем отечественной школы прикладной оптики и оптического, в том числе и геодезического, приборостроения по праву является проф. Н. М. Кислов, создавший капитальный труд «Теория оптических инструментов» (1915 г.).

Уже к 1926 г. были разработаны и изготовлены новые теодолиты ТТ-1 и ТТ-30, в 1927 г. освоен их серийный выпуск. В 1928 и 1929 гг. начинается серийный выпуск десятисекундного универсала, точного нивелира и оригинального мензульного комплекта «КШВ», в котором впервые применена односторонняя оптическая отсчетная система.

В 1934 г. выпускаются первые образцы пятисекундного универсала (У-5). К 1936 г. на основе требований, установленных профессором Ф. Н. Красовским, осваивается высокоточный триангуляционный теодолит ТТ-2/6, а также изготавливается кипрегельный высотомер талантливого советского изобретателя Г. Ю. Стодолкевича.

В 30-х годах на кафедре геодезии МИИГАиК под руководством профессора А. С. Чеботарева доценты А. С. Юркевич и Д. С. Шеин, в ЦНИИГАиК научные сотрудники М. В. Приданцев, Б. Н. Щербаков, Б. А. Ларин в содружестве с работниками завода «Электросталь» создали лучшие сорта инвара, первоклассные инварные проволоки и приборы для базисных измерений и полигонометрии. Базисный прибор Едерина, впервые внедренный в России в 1888 г., был существенно усовершенствован. Создана строгая теория подвесных мерных приборов. Изучена проблема измерения длин мерных приборов методом интерференции света и разработаны оригинальные принципы устройства компараторов стационарного и переносного типов.

К тому же периоду относятся работы ГОИ им. С. И. Вавилова по использованию физических методов измерения расстояний. В 1932—1934 гг. проведены первые опытные измерения расстояний радиолокационным способом при помощи фазового радиодальномера, научные и технические основы которого были

разработаны академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. В 1936 г. в ГОИ под руководством академика А. А. Лебедева был создан первый светодальномер с интерференционным модулятором, которым можно было измерять расстояния 3—4 км с относительной ошибкой 1:2000. Широкое развитие приборы этого рода получили после 1948 г., когда шведская фирма АГА в Стокгольме построила геодинетр конструкции Бергстранда и в 1957 г. Уодли создал конструкцию теллуromетра. В СССР в 1950—1960 гг. появились светодальномеры СВВ-1 В. П. Васильева, В. А. Величко; СТ-62 В. Д. Большакова, А. И. Демушкина; ЭОД-1; ГД-314 и др.

К 1938 г. был прекращен ввоз в СССР не только точных, но и высокоточных приборов. Накануне Великой Отечественной войны геодезическая служба страны получила первые образцы отечественных оптических теодолитов.

Таким образом, к 1941 г. все топографо-геодезические работы страны оснащались советскими геодезическими приборами, разработку и изготовление которых пришлось вести в полной изоляции. Западные фирмы, имеющие богатый вековой опыт создания геодезических приборов, держали свои теорин расчетов и новые технологии в большом секрете. Решающую роль здесь сыграли труды Н. М. Кислова.

В послевоенные годы геодезическое инструментоведение и приборостроение в нашей стране и за рубежом достигли качественно нового уровня развития.

Появились нивелиры с самоустанавливающейся линией визирования (НС-2 Г. Ю. Стодолкевича, 1946 г.; Ni 2 фирмы «Оптон», ФРГ, 1950 г.). Созданы новые дальномеры двойного изображения (ДНБ-2 В. А. Белицина, 1950 г.; ДД-2 И. А. Грейма и Г. Г. Никифорова, 1954 г.) В теодолитах стали применяться только стеклянные круги, а вместо уровня при алидаде вертикального круга — компенсаторы (Th и Tu фирмы «Аскания», 1956 г.; ОМТ-30 А. В. Мещерякова, 1957 г.). Оригинальные конструкции теодолитов и нивелиров с жидкостными и другими компенсаторами разрабатываются Н. А. Гусевым.

Качественному улучшению геодезических приборов в значительной мере способствовали новые зрительные трубы с ахроматическими и апохроматическими объективами, разработанные в 60-х годах в ГОИ им. Вавилова Д. Ю. Гальперном, Е. С. Полтыревой и О. В. Прониной, и новый способ нанесения штрихов на шкалах и лимбах методом напыления хрома в вакууме, разработанный на одном из заводов отечественной приборостроительной промышленности.

Внедрение лазеров, электронных микромодулей и других средств новой техники ознаменовало собой качественный скачок в развитии приборостроения в целом и геодезического приборостроения в частности.

Разработка и выпуск советских геодезических приборов и развитие геодезического инструментоведения связаны с дея-

тельностью институтов: ГОИ им. С. И. Вавилова, МИИГАиК, ЦНИИГАиК, ВНИИМИ и др.; ряда производственных предприятий и организаций и с именами Н. М. Кислова, Ф. Н. Красовского, А. С. Чеботарева, Б. В. Фефилова, А. Н. Ширяева, В. А. Белицина, Г. Ю. Стодолкевича и др.

§ 3. ТРЕБОВАНИЯ К ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ПРИБОРАМ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Требования к современным геодезическим приборам определяются:

- интенсивным развитием народного хозяйства страны и ограниченным приростом трудовых ресурсов;
- условиям эксплуатации, транспортировки и хранения приборов;
- техническими и технологическими возможностями промышленных предприятий страны;
- запросами потребителей.

Современные массовые геодезические приборы должны обеспечивать высокую производительность труда исполнителя при достаточной точности измерений; высокую надежность в процессе эксплуатации и транспортировки в полевых экспедиционных условиях; простоту и удобство операций и конкурентоспособность на мировом рынке.

Поставленным требованиям могут удовлетворить только приборы, имеющие малые габариты и массу, жесткие по конструкции, надежно сохраняющие юстировку, противостоящие коррозии и другим воздействиям внешней среды, имеющие минимум удобно расположенных рукояток управления, содержащие элементы автоматизации и сохраняющие длительное время надлежащий внешний вид.

При проектировании, разработке и выпуске геодезических приборов особое внимание следует уделять научно обоснованному выбору металла, оптического стекла и других материалов, из которых изготавливаются отдельные узлы прибора; тщательной разработке технологии изготовления деталей; сборке и юстировке прибора; обеспечивать доступность юстировки в полевых условиях. Нельзя выпускать приборы с малым светопропусканием, с полузакрытым полем зрения, недостаточным удалением выходного зрачка, низким качеством изображения зрительных труб и отсчетных устройств и т. д.

Общие технические требования к геодезическим приборам определены ГОСТ 23543—79. В соответствии с ГОСТ в качестве основных характеристик условий эксплуатации приборов приняты: температура среды 20 ± 5 °С; относительная влажность воздуха 60 ± 20 %; атмосферное давление $101,325 \pm \pm 3,333$ кПа (760 ± 25 мм. рт. ст.). Конструкция геодезических приборов должна быть технологичной, ремонтпригодной и

должна обеспечивать возможность контроля основных параметров и технических характеристик. Отклонения параметров по нижнему пределу не должны быть более 2 % от их номинальных значений. В ГОСТе установлены все другие требования к конструкции геодезических приборов, а также требования по устойчивости к внешним воздействиям и надежности приборов; требования к составным частям приборов и комплектности, упаковке, транспортировке и хранению геодезических приборов.

Первые стандарты на основные геодезические приборы в нашей стране начали создаваться с 1963 г. с целью повышения качества приборов и ускоренного внедрения в геодезическое приборостроение достижений научно-технического прогресса.

В СССР в настоящее время действует более 24 тыс. государственных стандартов. Ежегодно выпускается указатель «Государственные стандарты СССР». В нем все стандарты размещены по разделам, классам и группам, в соответствии с научно обоснованным классификатором государственных стандартов СССР. Разделы в указателе обозначаются прописными буквами русского алфавита, классы — буквой раздела и одной цифрой, а группа — буквой раздела, цифрой класса и второй цифрой группы. Например, группа «Геодезические приборы и инструменты» имеет шифр П42, класс «Геодезия и картография» — Т4, а раздел «Измерительные приборы, средства автоматизации и вычислительной техники» — П [36].

Перечень геодезических стандартов приводится в приложении.

В соответствии со стандартами геодезические приборы классифицируют по назначению и точности.

По назначению они делятся на семь основных подгрупп: 1. Теодолиты. 2. Нивелиры. 3. Дальномеры. 4. Тахеометры. 5. Кипрегели. 6. Комплекующие принадлежности к геодезическим приборам (штативы, рейки, оптические центриры, буссоли и т. п.). 7. Вспомогательные приборы и инструменты (планиметры, пантографы, эккеры, эклиметры, транспортиры и т. п.).

По точности делятся приборы только первых трех групп на высокоточные, точные и технические.

К высокоточным относятся преимущественно приборы, применяемые для производства основных геодезических работ: триангуляции, полигонометрии, нивелирования I и II классов и инженерных работ особо высокой точности.

К точным относятся приборы, применяемые для развития и сгущения главной геодезической основы и производства массовых инженерных работ.

К техническим относятся приборы, применяемые для построения съемочных сетей и производства съемок.

Для топографо-геодезического производства решающее значение имеет достоверность результатов измерений геодезическими приборами, так как измерения составляют основное содержание всех топографо-геодезических работ. Достоверность

и сопоставимость результатов измерений обеспечиваются единством мер и измерений или соответствующим метрологическим обеспечением (ГОСТ 1.25—76).

Обязательному метрологическому обеспечению из геодезических приборов подлежат, например, штриховые и шкаловые меры длины, свето- и радиодальномеры и другие дальномеры.

В системе ГУГК, как основной государственной отрасли по топографо-геодезическому производству, научно-методическое руководство и координирование работ по стандартизации и метрологии возложено на ЦНИИГАиК.

Обязательной государственной метрологической проверке подлежат средства измерений, применяемые в органах ведомственных метрологических служб в качестве исходных образцовых средств измерений, например трехметровый инварный жезл № 541 метрологической лаборатории МИИГАиК.

Рабочие средства измерений подвергаются ведомственному метрологическому надзору.

Производственные геодезические измерения выполняются в соответствии с требованиями нормативных документов (инструкций, наставлений и т. п.), практически регламентирующих индивидуальную аттестацию всех геодезических приборов, допускаемых к измерениям через систему поверок и исследований.

Так, например, метрологическое обеспечение линейных полевых измерений осуществляется компарированием рабочих мер на компараторе (полевом или стационарном), метрологическое обеспечение угловых измерений — с помощью известных в математике условий (сумма углов в треугольнике или другой фигуре), метрологическое обеспечение измерения превышений — через компарирование реек.

В целом вопросам метрологического обеспечения измерений в геодезии и геодезическом приборостроении всегда уделялось должное внимание. Появление новых высокоточных геодезических приборов, основанных на законах физической оптики, ставит решение этих задач на новый, более высокий уровень.

Геодезист всегда должен помнить, что качество измерений зависит не только от знаний и опыта исполнителя, но и от наличия пригодных к эксплуатации приборов и оборудования, от их метрологического обеспечения на различных стадиях производства работ.

Геодезические приборы, изготовленные на заводах в соответствии с требованиями метрологического обеспечения на средства измерений, до выполнения работ должны быть поверены и отъюстированы.

Поверкой называют установление пригодности средств измерений к использованию. В геодезии под поверкой понимают исследование, компарирование, выполнение полевых поверок и юстировку средств измерений. Метрологическая поверка геодезических приборов выполняется по специальной научно-технической документации, утвержденной головной или базовой

метрологической организацией, лицами, прошедшими специальное обучение, под непосредственным руководством главного метролога организации или учреждения. Результаты поверки фиксируются в журнале или свидетельстве. Обычно выполняют поверки: первичную (по получении прибора с завода), периодическую (перед началом геодезических работ в сезоне), внеочередную (после ремонта прибора), и т. п.

Кроме того, производятся рабочие поверки и исследования геодезических приборов, описанные в инструкциях и других нормативных документах. Более подробно с вопросами методического обеспечения единства измерений читатель может ознакомиться в книгах [8, гл. 5; 37].

Глава 2

СВЕДЕНИЯ ИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

В геодезических приборах применяются разнообразные оптические системы. На основе законов и положений геометрической оптики создаются достаточно точные теории этих систем. Построенные таким образом геодезические инструменты являются весьма совершенными оптическими приборами, работать с которыми может лишь специалист, имеющий прочные знания по геометрической оптике.

В современных геодезических приборах, особенно в светодальномерах, лазерных и других устройствах, важная часть вопросов теории оптических систем, связанная, например, с образованием и качеством изображения, разрешающей способностью и т. п., рассматривается с привлечением физической оптики, изучение которой также необходимо для получения углубленных знаний о приборах.

§ 4. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ЯВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИИ, ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА, ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Современные представления о свойствах и природе света исходят из предположения о единстве волновых и квантовых его свойств.

Существовало два представления о природе света. Согласно одному из них, свет рассматривается как распространение волн в особой упругой среде—эфире. Основателем этой теории был Х. Гюйгенс (1629—1695), впервые выдвинувший в 1678 г. волновую теорию распространения света.

Основателем другого воззрения на природу света был

И. Ньютон (1643—1727), который распространение света представил как поток мельчайших частиц-корпускул, испускаемых источником света прямолинейно во все стороны.

Прежде чем излагать явления, объясняемые волновым представлением о свете, напомним, что волны представляют собой процесс распространения колебаний, наиболее простым из которых является гармоническое. За время $t_2 - t_1$, называемое периодом колебания T , частица совершит полное колебание. Наибольшее отклонение, определяющее размах колебаний, называется амплитудой. Отклонение y частицы от положения равновесия в каждый момент времени можно определить по формулам

$$y = A \cos 2\pi \frac{t}{T}, \quad y = A \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad (2.1)$$

где $2\pi \frac{t}{T} = \varphi$ называется фазой колебаний; $2\pi/T = \omega$ — угловая или круговая частота колебаний;

$$\varphi = \omega t. \quad (2.2)$$

Под частотой колебаний f понимают число периодов в единицу времени

$$f = 1/T. \quad (2.3)$$

За время T волна распространяется на расстояние λ , представляющее собой наименьшее расстояние между частицами, колеблющимися в одной фазе, — длину волны. Скорость распространения волны определяется соотношением

$$v = \lambda/T = \lambda f. \quad (2.4)$$

Фазы $\varphi = \omega t$, отличающиеся друг от друга на величину $2N\pi$ (где $N=0, 1, 2, 3, 4 \dots$), будут одинаковыми. Фазы, отличающиеся друг от друга на нечетное число $(2N+1)\pi$, называются противоположными. За промежуток времени T фаза колебаний изменится на 2π , следовательно, период колебаний T зависит от угловой частоты ω :

$$T = 2\pi/\omega. \quad (2.5)$$

С учетом значения f из (2.3) формулу (2.5) можно представить в виде

$$1/f = 2\pi/\omega, \quad (2.6)$$

откуда $\omega = 2\pi f$.

В общем случае колебание может начинаться в любой момент времени. Тогда текущая фаза ψ выразится величиной

$$\psi = \omega t + \varphi_0,$$

где φ_0 — начальная фаза в момент времени $t=0$. В этом случае уравнения (2.1) будут иметь вид

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad y = A \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (2.7)$$

Если колебания распространяются вдоль некоторой прямой, то характеристики колебания в точке, находящейся на расстоянии D от точки начала колебаний, будут находиться в следующей зависимости:

$$y = A \sin \left[\omega \left(t - \frac{D}{v} \right) + \Phi_0 \right]. \quad (2.8)$$

Из вышеизложенного следует, что колебательный процесс характеризуется тремя параметрами: амплитудой, частотой и начальной фазой. Процесс изменения указанных параметров называется модуляцией (амплитудной, фазовой, частотной).

Основной принцип волновой теории (принцип суперпозиции волн) состоит в том, что каждая точка, до которой доходит сферическая волна, становится самостоятельным центром возбуждения. Сферическая поверхность, огибающая эти элементарные волны в данный момент времени, указывает положение фронта распространяющейся волны. На большом расстоянии от центра колебаний можно принять радиус волновой поверхности бесконечно большим. В таком случае световые лучи, которые всегда нормальны к волновой поверхности, можно считать идущими параллельно друг другу. Доказано, что световые волны являются поперечными, т. е. колебания в них направлены перпендикулярно к направлению распространения света.

В 1865 г. Максвелл установил, что свет по своей природе представляет явление волны электромагнитного поля. Испускание света — возбуждение электромагнитных волн. Эти волны образуют в пространстве два переменных поля — электрическое (E) и магнитное (H), расположенные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Скорость распространения света в вакууме хорошо известна и равна $c = 299\,792,458$ км/с. В реальной среде скорость распространения света всегда меньше и вычисляется по формуле

$$v = c/n, \quad (2.9)$$

где n — показатель преломления среды.

Согласно квантовой теории, основанной на идее прерывности всех процессов, излучение и поглощение световой энергии может происходить только определенными порциями — квантами, кратными некоторому значению $h\nu$, постоянному для данной частоты излучения.

Если обозначить через ϵ энергию, содержащуюся в одном кванте света, то она будет равна

$$\epsilon = h\nu, \quad (2.10)$$

где h — постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, ν — частота колебаний излучаемого света.

В 1905 г. А. Эйнштейн, развивая теорию Планка, изложил фотонную теорию, в которой излучение рассматривалось как поток фотонов, являющихся частицами материи, обладающими

не только энергией, но и импульсом (произведением силы на время действия) и массой движения.

Таким образом, опять возникла корпускулярная теория света на новой, волновой основе, что позволило объяснить в рамках одной теории интерференцию, дифракцию, фотоэффект и другие сложные вопросы физической оптики.

По современным теоретическим воззрениям физическая сущность света является весьма сложной, диалектически соединяющей в себе противоречивые корпускулярные и волновые свойства.

Дисперсия света. Дисперсией света называют явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины волны

$$n = f(\lambda_0). \quad (2.11)$$

Для большинства прозрачных веществ n возрастает с уменьшением λ_0 . Такой характер дисперсии называют нормальным. Зависимость n от λ_0 в области нормальной дисперсии описывается формулой Коши

$$n = a + \frac{b}{\lambda_0^2} + \frac{c}{\lambda_0^4} + \dots, \quad (2.12)$$

где a , b , c — постоянные, которые для каждого вещества определяются экспериментально.

Если вещество поглощает часть светового потока, то в области поглощения и вблизи нее может наблюдаться аномальная дисперсия, т. е. уменьшение показателя преломления с уменьшением длины волны.

В прозрачных средах в результате изменения направления распространения света при преломлении дисперсия света приводит к разложению света в спектр. Опыт показывает, что если луч белого света пропустить через преломляющую призму — прозрачное тело, ограниченное плоскими пересекающимися поверхностями, то на экране за призмой получим цветную полосу в следующей последовательности цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Характер дисперсии различных прозрачных сред, в том числе и разных сортов оптического стекла, различен.

Поглощение света. При прохождении света через вещество интенсивность его уменьшается — часть светового потока поглощается веществом. Опыт показывает, что изменение интенсивности на пути dl пропорционально длине этого пути и самой интенсивности:

$$dI = -\alpha I dl, \quad (2.13)$$

где α — коэффициент поглощения.

Из (2.13) имеем, что

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha l}. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) называют законом Бугера—Ламберта, по которому интенсивность света убывает экспоненциально с расстоянием от границы поглощения. Коэффициент поглощения зависит от длины волны света λ .

Рассеяние света. При прохождении света через неоднородные среды часть его рассеивается.

Если неоднородности в веществе малы по сравнению с длиной волны ($\approx 0,1 \lambda$), то интенсивность рассеянного света I обратно пропорциональна четвертой степени длины волны:

$$I = 1/\lambda^4. \quad (2.15)$$

Зависимость (2.15) носит название закона Релея. Если размеры неоднородностей в веществе сравнимы с длиной волны, то интенсивность рассеянного света становится обратно пропорциональной квадрату длины волны. Рассеянный свет является частично поляризованным.

Поляризация света. Электромагнитные волны, у которых направления электрического E и магнитного H полей сохраняются неизменными в пространстве или изменяются по определенному закону, называются поляризованными. Направлением поляризации условились называть направление электрического поля E волны ($E \perp H$). Плоскополяризованной или линейнополяризованной называют волну с неизменным направлением E . Солнечный свет состоит из множества плоскополяризованных волн со всевозможными направлениями поляризации. Электрическое поле суммарной волны беспорядочно меняет свою величину и направление, т. е. солнечный свет неполяризован. Солнечный свет можно превратить в плоскополяризованный, пропустив его через поляроид—пластинку, пропускающую волны с определенным направлением поляризации и поглощающую волны с другим направлением поляризации.

В случае круговой и эллиптической поляризации концы векторов E и H описывают окружности или эллипсы с частотой, равной частоте световых колебаний. В зависимости от направления вращения различают правую поляризацию (по часовой стрелке) и левую поляризацию (против часовой стрелки). При распространении волн в некоторых средах имеет место поворот плоскости поляризации.

Поляризация света проявляется при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков. Степень поляризации зависит от угла падения. Отраженный луч будет полностью поляризован, если тангенс угла падения равен относительному показателю преломления, т. е.

$$\operatorname{tg} i_{\text{в}} = n_{21}. \quad (2.16)$$

Это положение носит название закона Брюстера, а угол $i_{\text{в}}$ называют углом Брюстера, или углом полной поляризации. При падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи образуют прямой угол.

Линейно поляризованные световые волны можно получить, пропустив естественный свет через турмалиновую пластинку, вырезанную так, чтобы ограничивающие ее плоскости были параллельны кристаллографической оси. Установив вторую пластинку параллельно первой, но повернув кристаллографическую ось на 90° , получим полное гашение света.

Первую пластинку называют поляризатором (T_n), вторую — анализатором (T_a).

Интерференция света. Явление, заключающееся в том, что при наложении двух световых волн или более с одинаковой частотой и поляризацией в различных точках пространства происходит усиление или ослабление результирующей амплитуды световых колебаний в зависимости от соотношения между фазами колебаний световых волн в этих точках, называется интерференцией света. Согласно принципу суперпозиции при наложении двух световых волн суммарная амплитуда колебания электрической напряженности \vec{E} равна сумме колебаний каждой волны в отдельности: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Если $\vec{E}_1 = e\vec{A}_1 \sin \omega t$, а $\vec{E}_2 = e\vec{A}_2 \sin(\omega t + \varphi)$, где e — вектор поляризации, A — амплитуда волны, φ — сдвиг фазы между волнами, то результирующая волна имеет ту же самую частоту ω и поляризацию e , а ее амплитуда A зависит от сдвига фазы φ :

$$A = (A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi)^{1/2}. \quad (2.17)$$

Наибольшая величина амплитуды, равная $A_1 + A_2$, достигается при разности фаз $\varphi = 2\pi n$ (n — целое число), а наименьшая, равная $A_1 - A_2$, при $\varphi = \pi(2n + 1)$.

Если интерферирующие волны исходят из двух точечных источников, дающих световые колебания в одинаковой фазе, то разность фаз волн, приходящих от источников в какую-либо точку однородной среды, равна $\varphi = 2\pi(|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|)$, где \vec{r}_1 и \vec{r}_2 — расстояния от точки наблюдения до источников.

Так как разность хода между интерферирующими лучами $\Delta = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ не остается постоянной для всех точек наблюдения, то в пространстве возникают интерференционные полосы — чередующиеся максимумы и минимумы амплитуды результирующей волны. Наиболее четкая картина интерференции света наблюдается при равенстве амплитуд. В этом случае суммарная амплитуда равна $2A_1 = 2A_2$, а минимальное значение равно нулю.

Однако взаимодействовать между собой, т. е. интерферировать, могут только такие колебания, которые совпадают по направлению поляризации, имеют одинаковую частоту и разность фаз. Такие колебания называются когерентными. Они могут быть получены от одного источника света, путем разделения одного пучка световых лучей на две волны, распространяющиеся по разным путям, но в конце концов встречающихся

в одной точке, где происходит их сложение. Для описания когерентных свойств волны в направлении, перпендикулярном к направлению ее распространения, применяют термин пространственная когерентность, в отличие от термина временная когерентность, связанного со степенью монохроматичности волны. Часто понятие «когерентность» употребляют, говоря об одном колебании или волне, например, можно встретить утверждение, что белый свет некогерентен, а лазер излучает когерентный свет. Такие утверждения не имеют абсолютного значения, имеется в виду лишь то, что лазерное излучение обладает неизмеримо большей временной и пространственной когерентностью по сравнению с белым светом.

Дифракция света. Дифракция — явление проникновения света в область геометрической тени, т. е. дифракция приводит к отклонению распространения света от прямолинейного вблизи краев непрозрачных тел, к «огибанию» препятствий световыми лучами.

Так, например, если параллельный пучок света проходит через отверстие, размеры которого сравнимы с длиной волны света, то из-за дифракции световая волна огибает края отверстия, что приводит к дифракционной расходимости светового пучка. Из-за дифракционной расходимости резкие границы светового пучка расплываются, энергия рассеивается в сторону и волна по мере удаления от отверстия из плоской превращается в сферическую. Дифракционная расходимость характеризуется углом $\theta \approx \lambda/d$ (λ — длина волны, d — диаметр отверстия). Классическим доказательством явления дифракции света, в частности, и волновой природы света, вообще, является опыт Юнга.

Теория дифракции находит важное применение при вычислении разрешающей силы оптических систем. Согласно закону геометрической оптики в отсутствие аберраций каждая точка объекта должна изображаться резкой точкой. Однако в результате дифракции она всегда будет иметь вид светлого пятна конечного размера. Если два таких пятна в изображении (дифракционные картины) начнут перекрываться, чем ближе друг к другу центральные максимумы, тем труднее распознать наличие двух отдельных объектов. Согласно критерию Релея два изображения начнут разрешаться, если главный максимум одного совпадает с первым максимумом другого.

Если рассматривать зрительную трубу как телескопическую систему, то для удаленной визирной цели граница входного зрачка, совпадающая с оправой объектива, действует как дифракционное отверстие. Согласно формуле Фраунгофера [19] положение первого минимума интенсивности относительно центрального максимума задается соотношением

$$\sin \varphi = 1,22 \lambda/d, \quad (2.18)$$

где φ — угловое расстояние двух визирных целей, например, звезд, которые начинают разрешаться, т. е. которые мы можем

различить как отдельные. Учитывая малость угла φ , можно записать

$$\varphi = \frac{1,22 \lambda \rho_1}{d}. \quad (2.19)$$

Например, при $\lambda = 0,55$ мкм, диаметре объектива зрительной трубы $d = 40$ мм получим

$$\varphi'' = \frac{1,22 \cdot 0,55 \cdot 206 \cdot 265}{40 \cdot 10^3} = 3,4''.$$

Если на пути параллельного пучка когерентных световых лучей поместить зонную пластинку Френеля, представляющую собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные кольца, можно получить в некоторой точке P_0 максимум света. Для этого радиусы границ колец следует принять равными

$$r = a \sqrt{m}, \quad (2.20)$$

где m — целое число, a — радиус первой зоны (прозрачной).

В точке P_0 , находящейся на расстоянии $R_0 = a^2/\lambda$ (вдоль оси) от пластины, амплитуда волны складывается из действия всех вторичных волн только от прозрачных зон. Так как расстояния границ зон от точки P_0 отличаются на величину $\lambda/2$, то действие прозрачных зон совпадает по знаку. В результате амплитуда волнового поля в точке P_0 будет гораздо больше, чем в отсутствие зонной пластинки (отсутствует обратное по знаку действие зон, закрытых непрозрачными зонами). Таким образом, зонная пластина фокусирует свет в точку, подобно линзе с фокусным расстоянием $f = a^2/\lambda$.

В связи с широким внедрением лазерных источников когерентного излучения применение зонных пластин является перспективным при создании высокоточных методов и средств геодезических измерений [45].

Теоретическую разрешающую способность оптической системы можно определить пользуясь дифракционной теорией построения изображения. Если две светящиеся точки s_1 и s_2 находятся на небольшом расстоянии друг от друга, то их изображения, вследствие дифракции на входном зрачке объектива зрительной трубы, будут иметь вид не точек s_1' и s_2' , а дифракционных кружков рассеивания, состоящих из чередующихся темных и светлых колец. Согласно критерию Релея с помощью любой анализирующей системы различить отдельно эти два изображения s_1' и s_2' можно только при условии, что расстояние между их центрами не меньше радиуса r_1 первого темного кольца. Из теории дифракции известно, что эта величина равна

$$r_1 = 3,83 \lambda / \pi q, \quad (2.21)$$

где λ — длина волны излучения, для которой определяется разрешающая способность; $q \approx D_{\text{св}}/L'$ — апертурный угол; 3,83 — коэффициент для первого темного кольца.

Угловой размер радиуса первого темного кольца или минимальный угол между разрешимыми на пределе точками s_1 и s_2 в плоскости изображения при условии, что $L \rightarrow \infty$, $L' \approx f'$ — фокусное расстояние оптической системы, определяется по формуле

$$\sin \varepsilon = r'/f' = 3,83 \lambda / \pi D_{\text{св}} \approx 1,22 \lambda / D_{\text{св}}. \quad (2.22)$$

Для оптических систем, работающих в видимой области спектра $\lambda = 0,55$ мкм, тогда

$$P_{\text{дифф}} = \varepsilon'' = 0,671 \cdot \rho / D_{\text{св}}. \quad (2.23)$$

На практике с учетом всех погрешностей для приближенной оценки разрешающей способности зрительных труб используют соотношение

$$P_{\text{тр}} = 120'' / D_{\text{св}}. \quad (2.24)$$

Лазерные источники оптического излучения. Название «лазер» составлено из первых букв английского выражения, означающего в переводе «усиление света за счет вынужденного излучения». В основу действия лазеров положено явление усиления электромагнитных колебаний при помощи вынужденного излучения атомов и молекул.

Существуют три типа лазеров: на твердом теле, газах и полупроводниках. Лазер любого типа имеет в своем составе активное вещество, резонатор, источник возбуждения активного вещества и источник питания.

В качестве активного вещества применяют:

а) в лазерах на твердом теле — кристаллы рубина и другие кристаллические вещества (пластмассы и стекла с различными примесями);

б) в газовых лазерах — различные газы и смеси газов, например гелий-неоновый лазер;

в) в полупроводниковых лазерах — полупроводниковые материалы (арсенид галлия, арсенид-фосфат галлия, фосфид галлия и арсенид индия).

Поскольку физические основы действия лазеров излагаются в курсе физики, а вопросам их проектирования и применения посвящены отдельные курсы, здесь кратко рассмотрим лишь основные особенности их как источников излучения в современных геодезических приборах.

Свойства излучения лазеров оцениваются при помощи их основных характеристик: потока излучения (эквивалент механической мощности) или энергии излучения; направленности излучения или ширины луча; длины волны λ и ширины полосы $\Delta\lambda$ излучения; когерентности излучения.

Мощность излучения характеризует величину потока излучения, испускаемого генератором. В геодезических приборах применяются в основном газовые и полупроводниковые лазеры непрерывного излучения, мощность которых лежит в пределах

от единиц мВт до единиц Вт, а мощность лазеров на твердом теле может достигать в импульсе 10^6 — 10^2 Вт.

Направленность излучения характеризуется величиной угла расхождения луча. Наименьшее значение этого угла, ограничиваемое только явлением дифракции, может быть определено по формуле (2.18).

Если $\lambda = 0,63$ мкм, $d = 2$ мм, то

$$\varphi = \arcsin \frac{1,22 \lambda}{D} = 1'15''.$$
 (2.25)

Отсюда следует, что можно добиться очень малой расходимости. Практически величина φ зависит от ряда параметров оптического резонатора лазера, типа активного вещества и для серийных газовых лазеров (ОКГ-13, ЛГ-56, ЛГ-78 и т. п.) составляет от 3 до $10'$. Полупроводниковые и твердотельные лазеры имеют расходимость излучения до нескольких единиц градусов.

Поэтому для получения нужных параметров светового пучка используют так называемые внешние оптические формирователи, позволяющие либо уменьшать расходимость излучения при соответствующем увеличении диаметра светового пучка, либо фокусировать излучение на определенном расстоянии, либо получить световое пятно требуемых размеров.

Ширина линии излучения зависит от потока излучения и добротности оптического резонатора и может быть подсчитана по формуле

$$\Delta\nu_p = \frac{\tau c}{2\pi l},$$
 (2.26)

где τ — потери излучения при однократном прохождении его в активном веществе; c — скорость света в активном веществе; l — расстояние между зеркалами.

Так, если $\tau = 0,02$, $\lambda = 1,15$ мкм, $l = 100$ см, то

$$\Delta\nu_p = 1 \text{ МГц.}$$
 (2.27)

Когерентность — основное свойство лазеров. Она складывается из пространственной и временной составляющих. Когерентность во времени означает, что максимумы излучения следуют один за другим с постоянным периодом t . При изменении длины волны (частоты) интервалы между следованием максимумов становятся нерегулярными и когерентность уменьшается. При пространственной когерентности волны, излучаемые лазером, образуют плоский фронт, перпендикулярный к оси генератора. Излучение лазеров является плоскополяризованным.

В идеальном случае излучение лазера представляет собой плоскую или сферическую волну с большим радиусом кривизны, для которой распределение интенсивности подчиняется закону Гаусса, — так называемое одномодовое излучение TEM_{00} . При работе лазера в многомодовом режиме в поперечном

сечении пучка наблюдается несколько максимумов интенсивности. Одномодовый режим генерации лазера можно получить различными способами: настройкой резонатора, изменением размеров зеркала, изменением мощности накачки.

Величина угловой расходимости в одномодовом режиме минимальная, в многомодовом — максимальная. Генерация на основной моде TEM_{00} — необходимое условие получения высокой степени пространственной и временной когерентности, минимальной расходимости, минимальной ширины спектра излучения.

§ 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ПРАВИЛА ЗНАКОВ

Основу законов геометрической или лучевой оптики составляют понятия о светящейся точке и световом луче.

При распространении света, как известно, имеют место интерференция, дифракция и другие явления физической оптики, характеризующие волновую природу света, когда точечному излучению соответствует волновая поверхность, которая распространяется от источника света в виде электромагнитных колебаний. Однако многие оптические явления можно рассматривать исходя из представления, что оптическое излучение распространяется вдоль нормалей к волновой поверхности, называемых лучами, т. е. не принимать во внимание дифракцию и интерференцию.

Раздел физической оптики, основывающийся на этом представлении, называется геометрической оптикой. В геометрической оптике источником света считается светящаяся точка, как геометрическая точка, не имеющая размеров, из которой световая энергия лучами распространяется во все стороны, а световой луч — геометрическая линия, прямая (нормаль к фронту световой волны), вдоль которой распространяется световая энергия.

Такое представление о световом излучении является отклонением от действительности, поэтому геометрическая оптика может рассматриваться лишь как предельный случай волновой оптики при длине световой волны, стремящейся к нулю, а светящаяся точка и световой луч являются геометрическими абстрактными понятиями реальных физических объектов.

Но, пользуясь условными понятиями светящейся точки и светового луча, можно с достаточной строгостью значительно проще представить принципы действия оптических систем на основе законов геометрической оптики, чем при помощи законов волновой оптики.

Световые лучи, исходящие из светящейся точки во все стороны, образуют неограниченный световой пучок. Если на пути лучей неограниченного пучка установить непро-

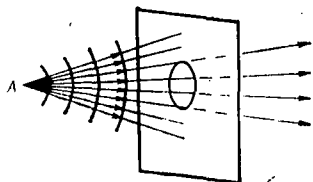


Рис. 1. Неограниченный и ограниченный пучки лучей



Рис. 2. Гомоцентрический пучок лучей. Действительное стигматическое изображение точек

зрачную пластину с отверстием (диафрагму), то можно получить ограниченный пучок (рис. 1). Пучок, лучи которого имеют одну общую точку пересечения, называется гомоцентрическим пучком лучей, точка пересечения лучей — центром пучка. Различают сходящиеся и расходящиеся гомоцентрические пучки лучей. Если светящаяся точка удалена в бесконечность, то узкий пучок лучей, исходящих из этой точки, образует параллельный пучок.

Задача любой оптической системы L (рис. 2) состоит в том, чтобы преобразовать один гомоцентрический пучок лучей (например исходящих из точки A) в другой, также гомоцентрический пучок лучей (например сходящихся в точке A'). Центры пучков, т. е. точки A и A' соответственно, называются предметом и изображением. Предмет AA_1 и его изображение $A'A_1'$ в таком случае рассматриваются как совокупности отдельных точек. Если пучок световых лучей после прохождения через оптическую систему сохраняет гомоцентричность, то каждая точка предмета дает только одну точку изображения. Такое изображение называется точечным или стигматическим. Пространство, в котором расположен предмет, называется пространством предмета; пространство, в котором расположено изображение, — пространством изображения. Если лучи выходят из точки A' , то эта точка будет предметом, а ее изображением будет точка A . Такие две точки, одна из которых является изображением другой, называются сопряженными точками относительно данной оптической системы. Каждому падающему лучу (пучку лучей) в пространстве предметов будет соответствовать преломленный луч (пучок лучей) в пространстве изображений.

Изображение, образованное пересечением действительных лучей после выхода их из оптической системы, называется действительным изображением. На рис. 2 точки A' и A_1' — действительные изображения точек A и A_1 . Изображение точки A в точке A' (рис. 3), образованное пересечением продолжений, выходящих из оптической системы лучей, называется мнимым изображением. Действительное изображение может быть получено на экране или фотопленке. Мнимое не может быть получено на экране.

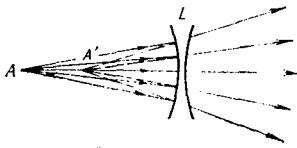


Рис. 3. Мнимое изображение точки

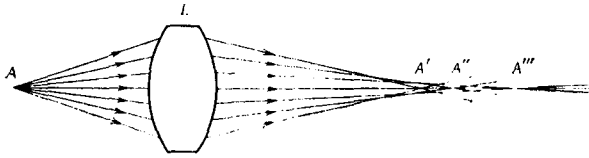


Рис. 4. Астигматическое изображение

Все реальные оптические системы, как правило, строят не строгое точечное, стигматическое изображение. Если лучи от точки предмета, после выхода из оптической системы, не все пересекаются в одной точке, такое изображение называется астигматическим. На рис. 4 выходящему из точки A гомотцентрическому пучку соответствует негомотцентрический пучок в пространстве изображений.

В геометрической оптике часто рассматриваются лучи, идущие вблизи от главной оптической оси (под малым углом к ней), такие лучи называются параксиальными лучами. Пучок параксиальных лучей называется параксиальным пучком.

Из опыта непосредственного наблюдения за оптическими явлениями природы установлены следующие законы, на которых основывается теория геометрической оптики:

- закон прямолинейного распространения света в однородной среде;
- закон независимого распространения света;
- закон отражения света;
- закон преломления лучей света на границе двух прозрачных сред;
- принцип обратимости.

Закон прямолинейного распространения света. В однородной и изотропной* среде свет между двумя точками распространяется по прямой, соединяющей эти точки. На основе закона прямолинейного распространения света объясняются тени и полутени, затмения Солнца и Луны; производятся все высокоточные геодезические и астрономические наблюдения.

Закон независимого распространения света. В геометрической оптике предполагается, что в сложном световом потоке отдельные лучи не влияют друг на друга и распространяются так, как будто других лучей не существует.

* Изотропной называется среда, имеющая одинаковые физические (в т. ч. и оптические) свойства по разным направлениям.

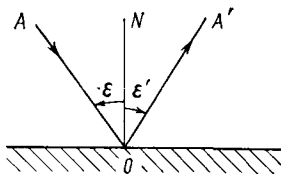


Рис. 5. Отражение луча

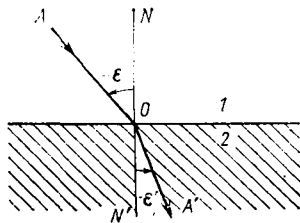


Рис. 6. Преломление луча

Закон отражения света. Луч падающий AO (рис. 5), луч отраженный OA' и нормаль NO к полированной отражающей поверхности в точке падения O находятся в одной плоскости; угол падения ε и угол отражения ε' равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку:

$$\varepsilon = -\varepsilon'. \quad (2.28)$$

Закон преломления лучей на границе двух прозрачных сред. При переходе из одной прозрачной среды в другую прозрачную среду луч, идущий неперпендикулярно к границе сред, изменяет свое направление, т. е. преломляется. Падающий луч AO (рис. 6), луч преломленный OA' и нормаль ON к поверхности раздела в точке падения лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для заданных оптических сред, при данных условиях (P, t, λ), есть величина постоянная и равная относительному показателю преломления этих сред ($n_{2,1}$)

$$\sin \varepsilon / \sin \varepsilon' = n_{2,1}, \quad (2.29)$$

где 2, 1 — вторая и первая среды.

Законы отражения и преломления света имеют первостепенное значение при расчете оптических систем.

Принцип обратимости. Законы преломления и отражения действуют и при обратном направлении хода лучей, т. е. выполняется принцип обратимости: луч преломленный может быть заменен на падающий, а падающий на преломленный; луч отраженный заменяется на падающий, а падающий на отраженный.

Правила знаков. В соответствии с ГОСТ 7427—76 при изложении вопросов геометрической оптики направление распространения света слева направо принимается за положительное. Для отрезков и углов используются следующие правила знаков.

Для оптических систем с осевой симметрией оптическая ось (ось симметрии) принимается за ось OZ , меридиональная плоскость (плоскость чертежа) — за плоскость YOZ в правой системе координат,

Линейные отрезки в направлении распространения света от выбранного начала и кверху от оптической оси положительны, в обратном направлении — отрицательны.

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

Углы считаются положительными, если они отсчитываются по ходу стрелки часов от установленных исходных линий (ось, нормаль и т. п.), и отрицательными — если против хода.

§ 6. ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ. ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Показатель преломления данной среды по отношению к вакууму называется абсолютным показателем преломления среды или просто показателем преломления среды и обозначается буквой n с индексом номера среды. Например, закон преломления света через абсолютные показатели из (2.29) запишется так:

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'. \quad (2.30)$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при прохождении света через поверхность раздела двух сред есть величина постоянная, называемая оптическим инвариантом.

Когда углы ε и ε' малы (параксиальный луч), то равенство (2.30) упрощается:

$$n \varepsilon = n' \varepsilon'. \quad (2.31)$$

В волновой теории [19] доказывается справедливость выражения

$$n'/n = v/v', \quad (2.32)$$

где v , v' — скорости распространения света в средах.

Принимая одну из оптических сред за вакуум ($n'=1$), получим формулу для вычисления абсолютного показателя преломления

$$n = c/v, \quad (2.33)$$

где $c = 299\,792\,458,7 \pm 1,1$ м/с — скорость распространения света в вакууме*, v — скорость распространения света в рассматриваемой среде. Принимая $v = \lambda\nu$, где ν — частота, λ — длина волны, имеем

$$n = c/\lambda\nu, \quad (2.34)$$

т. е. показатель преломления света зависит от длины волны.

* Значение скорости света в вакууме приведено по данным, принятым в августе 1976 г. на XVI Генеральной Ассамблее Международного геофизического и геодезического союза в Гренобле.

Определить показатель преломления вещества в вакууме сложно, поэтому в технике показатели преломления определяют в воздухе, при этом показатель преломления воздуха принимается равным

$$n_{\text{в}} = 1 + 0,000294 \frac{B}{1 + t/273}, \quad (2.35)$$

где B — давление в мм рт. ст.*, t — температура воздуха. При $t = 20^\circ \text{C}$, $B = 760$ мм рт. ст. имеем $n_{\text{в}} = 1,000274 \approx 1,0003$.

В большинстве случаев расчета оптических систем принимается $n_{\text{в}} = 1$.

Среда с большим показателем преломления считается оптически более плотной. Например, если луч идет из воздуха в стекло под углом $\epsilon = 30^\circ$, то, зная $n' = 1,5163$ и $n = 1$, из выражения (2.30) получим: $\sin \epsilon' = 0,32975$, и угол преломления: $\epsilon = 19^\circ 15' 13''$. На практике ϵ' иногда вычисляется до $0,01''$.

Полное внутреннее отражение. Всякое преломление света неизбежно сопровождается отражением части лучей от поверхности, разделяющей две среды с различными показателями преломления. При переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную преломленный луч света отклоняется от нормали сильнее. Если увеличивать постепенно угол падения, начиная от нуля, то при некотором угле падения наступает такой момент, после которого лучи не будут проникать в оптически менее плотную среду, весь пучок отразится полностью. Запишем оптический инвариант

$$\sin \epsilon / \sin \epsilon' = 1/n. \quad (2.36)$$

На рис. 7 видно, что при угле ϵ_{max} угол $\epsilon' = 90^\circ$ луч будет скользить по поверхности, тогда

$$\sin \epsilon_{\text{max}} = 1/n, \quad (2.37)$$

откуда

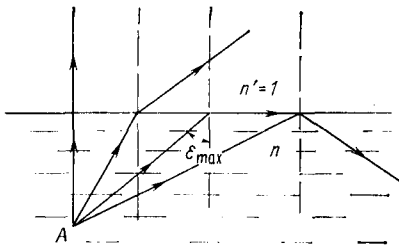
$$\epsilon_{\text{max}} = \arcsin 1/n \quad (2.38)$$

Угол ϵ_{max} называется критическим углом падения. Если продолжать увеличивать угол ϵ , то ϵ' будет больше 90° и уравнение оптического инварианта потеряет смысл. Все лучи будут идти обратно в более плотную среду, отражаясь от разделительной поверхности. Это явление, открытое в 1604 г. Кеплером, получило название явления полного внутреннего отражения.

Явление полного внутреннего отражения используется в волоконной оптике (световодах) и в рефрактометрии.

В геодезических приборах применяют многочисленные призмы полного внутреннего отражения.

* 1 мм рт. ст. = 133 Па.



Прозрачная среда	n	ϵ_{\max}
Алмаз	2,47	23°53'
Стекло флинт	1,77	34 51
Стекло крон	1,53	40 94
Стекло оконное	1,50	42
Вода	1,33	48 45
Лед	1,31	49 46
Воздух	1,00027	88 40
Водород	1,00014	89 02

Рис. 7. Полное внутреннее отражение

Выше приводятся показатели преломления и критические углы падения для некоторых прозрачных сред относительно вакуума.

§ 7. ПРИНЦИП ФЕРМА. ОПТИЧЕСКАЯ ДЛИНА ПУТИ

Основные законы геометрической оптики известны еще со времен Древней Греции. Но общих закономерностей распространения света в среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления (например, атмосфере) не было установлено до середины XVII в., когда французский математик П. Ферма (1601—1665) предложил свой принцип: «Природа действует всегда наиболее короткими путями». Согласно принципу Ферма световой луч распространяется по пути, на прохождение которого требуется минимальное время. Математическое выражение принципа Ферма связано с оптической длиной пути. Это понятие геометрической оптики, определяющее длину пути, который прошел бы свет в вакууме за время, в течение которого он распространяется от начальной точки A до конечной точки A' в рассматриваемых оптических средах. Под оптической длиной пути (l) понимается произведение геометрической длины пути луча l в однородной среде на показатель преломления этой среды:

$$l = nl. \quad (2.39)$$

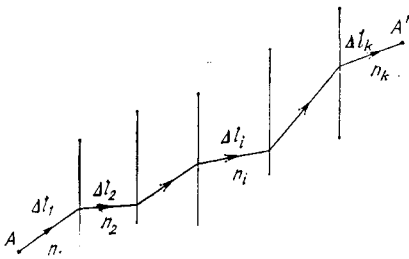


Рис. 8. Принцип Ферма. Оптическая длина пути

Для неоднородной среды между точками A и A' (рис. 8) оптический путь определится выражением

$$l = \sum_1^k n_i \Delta l_i, \quad (2.40)$$

где n_i , Δl_i — соответственно показатели преломления и геометрические длины путей

каждой из k сред, принятых за однородные. В пределе

$$(l) = \int_A^{A'} n dl. \quad (2.41)$$

Обозначим время, необходимое для распространения света на расстояние dl , через dt , имеем

$$dt = dl/v, \quad (2.42)$$

где v — скорость распространения света в среде с показателем преломления n . Время, необходимое для распространения света из точки A в точку A' , равно

$$t = \int_A^{A'} \frac{dl}{v} = \int_A^{A'} \frac{ndl}{c}. \quad (2.43)$$

Согласно принципу наименьшего времени Ферма вариация интеграла, которым определяется время распространения света, должна обращаться в нуль:

$$\delta t = \delta \int_A^{A'} \frac{dl}{v} = 0 \quad (2.44)$$

или

$$\delta (l) = \delta \int_A^{A'} n dl = 0. \quad (2.45)$$

Это и есть математическое выражение принципа Ферма. Выражение (2.45) является более общим, чем принцип Ферма, сформулированный первоначально [13].

Так как условие $\delta t = 0$ не является условием только минимума, это есть условие экстремума (минимума, максимума) или стационарности, следовательно, свет при распространении между двумя точками может «выбирать» не только путь, требующий минимального времени прохождения, но также путь, требующий максимального времени, либо пути, требующие одинакового времени. Это основной принцип геометрической оптики.

Из принципа Ферма могут быть получены основные законы геометрической оптики и путь света в среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления [13, с. 168].

§ 8. ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО, СИСТЕМЫ ЗЕРКАЛ

Плоское зеркало — оптическая деталь с плоской отражающей поверхностью.

Чтобы построить изображение точки в плоском зеркале, достаточно продолжить отраженные лучи до их пересечения или отложить от зеркальной плоскости в противоположную сторону по перпендикуляру расстояние s' , равное расстоянию s до предмета (рис. 9).

Изображение в плоском зеркале является мнимым, равным предмету по размерам, одинаковым по форме, цвету и положению, симметрично расположенным относительно зеркальной поверхности, но не совместимым с предметом при любых поворотах и перемещениях в одной плоскости. Зеркальное изображение может быть только наложено на предмет. Зеркальное изображение еще называется полуобращенным. Изображение линии и любого тела в плоском зеркале суть изображение семейства отдельных точек предмета.

Оптическая сила* плоского зеркала равна нулю, поэтому при расчетах оптических систем плоские зеркала не принимаются во внимание.

В геодезических приборах широко применяются или отдельные плоские зеркала, или системы плоских зеркал для изменения направления луча, оборачивания изображения, параллельного смещения луча, при подсветке шкал, в компенсаторах наклона, отсчетных оптических системах, для построения прямых и других углов и т. п.

На рис. 10—14 показаны случаи применения одиночных плоских зеркал и систем плоских зеркал.

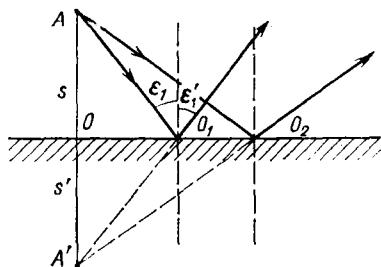


Рис. 9. Ход лучей и изображение в плоском зеркале

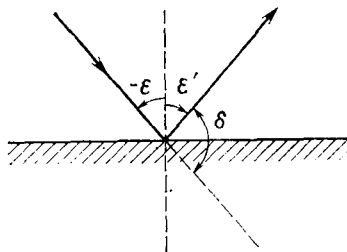


Рис. 10. Отклонение луча плоским зеркалом

* Отношение показателя преломления в пространстве изображений к заднему фокусному расстоянию системы называется оптической силой ($\Phi = n/f'$).

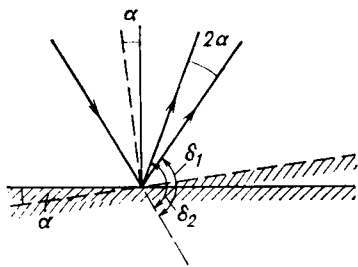


Рис. 11. Изменение направления луча, отраженного зеркалом

Рис. 12. Смещение луча двумя параллельными зеркалами

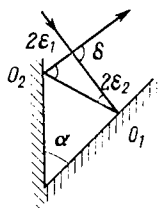
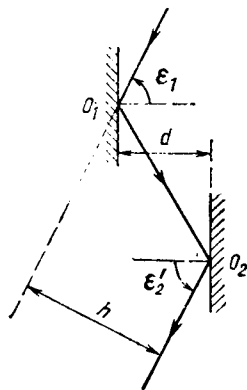


Рис. 13. Построение прямых углов эккером

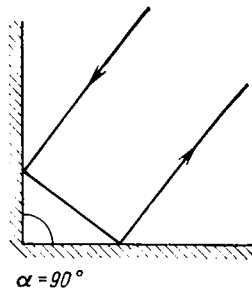


Рис. 14. Оборачивание луча системой из двух зеркал

На рис. 10 угол отклонения луча от первоначального направления

$$\delta = 180 - 2|\epsilon|. \quad (3.1)$$

При повороте зеркала на угол α (рис. 11) угол отклонения луча изменится на 2α , т. е.

$$\delta_2 - \delta_1 = 2\alpha. \quad (3.2)$$

Два параллельно установленных зеркала на рис. 12 смещают луч параллельно самому себе ($\epsilon_1 = \epsilon_2'$) на величину

$$h = O_1O_2 \sin(180 - 2\epsilon) = O_1O_2 \sin 2\epsilon,$$

где $O_1O_2 = d/\cos \epsilon'$, d — расстояние между зеркалами,

$$h = 2d \sin \epsilon. \quad (3.3)$$

Два зеркала, расположенные под углом α (рис. 13), изменяют направление луча на угол

$$\delta = 2\alpha. \quad (3.4)$$

Если $\alpha = 45^\circ$, то система двух зеркал является эккером — прибором для построения прямых углов.

Действительно, на рис. 13: $\delta = 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$, как внешний угол треугольника O_1O_2M . Угол $\alpha = 180 - (90 - \varepsilon_1) - (90 - \varepsilon_2) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, откуда имеем $\delta = 90^\circ$.

На рис. 14 угол α между двумя зеркалами равен 90° , такая система оборачивает луч.

Плоские зеркала мало весят и дают неискаженное изображение, но их трудно установить в приборах. Применение зеркал сопряжено со значительными потерями света. При $\lambda = 0,555$ мкм посеребренная поверхность зеркал отражает до 96 % света, амальгамированная алюминием — до 95 %, золотом — до 74 %, хромом — до 46 %. Металлические зеркала больше отражают света (от 60 до 100 %), но они быстро тускнеют, особенно в условиях влажного климата.

При изготовлении зеркал требуется высокое качество обработки зеркальной поверхности. Кроме того, в ответственных узлах приборов не следует применять плоские зеркала с внутренним покрытием во избежание двоения изображения.

Наряду с плоскими зеркалами в геодезических приборах широко применяются отражательные призмы.

§ 9. ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПРИЗМЫ

Призма — оптическая деталь с плоскими поверхностями, образующими между собой двугранные углы.

Различают призмы: преломляющие (в том числе оптические клинья) (§ 16), спектральные, поляризационные и отражательные. Спектральные и поляризационные призмы здесь не рассматриваются. Отражательные призмы* отличаются тем, что угол падения любого луча на входную грань равен углу преломления этого луча на выходной грани. Как правило, это призмы полного внутреннего отражения.

По сравнению с плоскими зеркалами отражательные призмы имеют ряд преимуществ: одна призма может заменить одно, два зеркала и более; призма надежнее устанавливается и юстируется в приборе, при этом углы между отражающими гранями призмы всегда остаются постоянными; в призмах полного внутреннего отражения отсутствуют потери света (но когда углы падения близки к углу ε_{\max} , лучи света отражаются неполностью, некоторые из них преломляются, что вызывает частичное затемнение поля зрения оптической системы — это существенный недостаток отражательных призм, по этой причине, например, в пентапризмах отражательные грани амальгамируются); призма Дове и другие призмы применяются более широко, чем системы плоских зеркал, и их нельзя заменить зеркалами; в отражательных призмах не возникает двоения луча.

* Призма, имеющая отражательные грани, называется отражательной призмой.

Важной характеристикой отражательных призм является длина хода луча в призме. Отношение длины хода луча в призме к диаметру отверстия пучка лучей называется коэффициентом призмы.

Для отражательной призмы должно выполняться условие: призма, если ее разверткой* является плоскопараллельная пластинка, в параллельном пучке лучей не должна давать хроматизма.

В геодезических приборах применяют одинарные отражательные призмы, составные призмы и системы призм. Призмы с четным числом отражательных граней дают конгруэнтное изображение предмета, с нечетными — неконгруэнтное (зеркальное). Исключением является призма-«крыша».

Принято единое обозначение отражательных призм. Каждую призму обозначают двумя буквами и числом градусов в угле, на который отклоняется луч после прохождения через призму. Первая буква указывает на число отражающих граней: А — одна, Б — две, В — три. Вторая буква характеризует конструкцию призмы: Р — равнобедренная, П — пента, У — полупента, С — ромбическая, Л — Лемана, М — дальномерного типа. Крышу условно считают за одну грань и обозначают индексом «К» у первой буквы. Из любой отражательной призмы можно получить «крышу», если заменить одну отражательную грань крышей (две отражательные грани, установленные под углом 90°). Каждую составную призму (систему призм) обозначают начальной буквой ее названия и числом градусов в угле, на который отклоняется луч. Например, А — 0° — призма Аббе, угол отклонения 0° , П — 0° — призма Пехана, угол отклонения 0° .

На рис. 15 представлены примеры одинарных призм с одной (а, б, в), двумя (г, д, е, ж) и тремя (з) отражающими гранями. Первые три призмы дают полуобращенное (зеркальное) изображение, причем призма Дове удлиняет ход луча «крыша» (см. рис. 15, в) изменяет направление луча. Призма БР — 180° с двумя отражающими гранями (см. рис. 15, г) дает обращенное изображение, смещая и оборачивая луч. Ромбопризма (см. рис. 15, д) смещает луч параллельно самому себе, как плоскопараллельная пластинка (изображение не изменяется). Пентапризма (см. рис. 15, е) поворачивает направление луча на 90° , не изменяя изображения. Полупентапризма (см. рис. 15, ж), не изменяя изображения, меняет направление луча на 45° . Призма Шмидта (см. рис. 15, з) дает полуобращенное изображение и изменяет направление луча на 45° .

Составные призмы, приведенные на рис. 16, дают зеркальные изображения, причем в призме-кубе (рис. 16, а) склеенная

* Развертка призмы заключается в нахождении плоскопараллельной пластинки, эквивалентной призме по геометрической длине хода осевого луча.

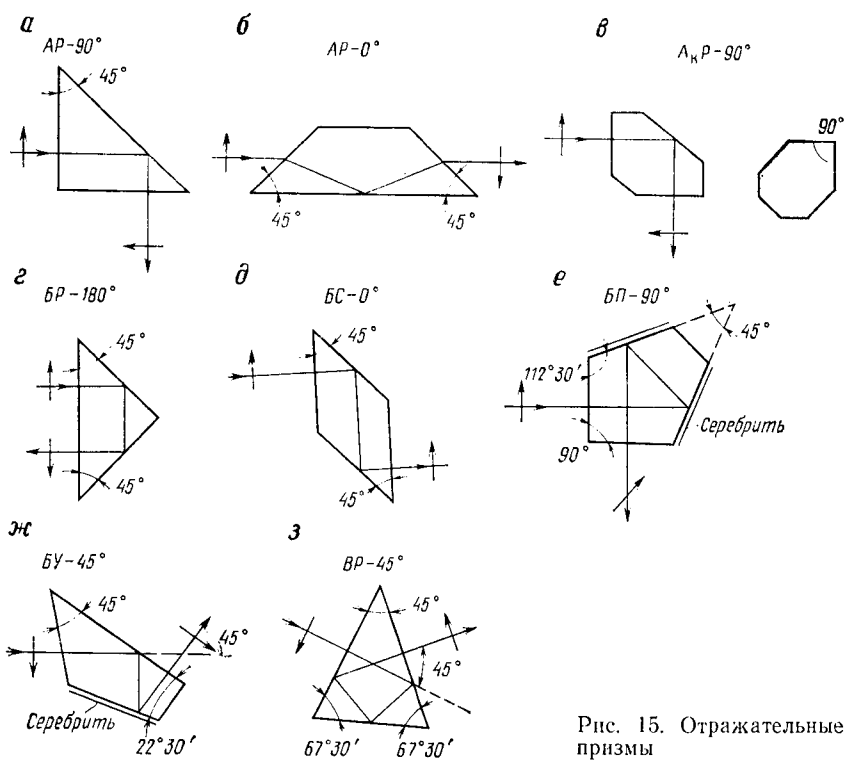


Рис. 15. Отражательные призмы

грань посеребрена, а в призме Аббе (рис. 16, б) посеребрена вторая отражающая грань.

На рис. 17 показаны оборачивающие системы. В системе Порро первого рода (рис. 17, а) главным требованием при установке является взаимная перпендикулярность прямоугольных ребер AB одной и CD второй призмы. На рис. 17, б показана система Порро второго рода. Обе эти системы дают обращенное изображение, смещают луч, но не изменяют его направления.

Приведенные на рис. 15, 16, 17 и другие отражательные призмы и системы призм находят широкое применение в геодезических приборах.

Отражательные призмы применяются для изменения направления оптической оси системы (в нивелирах с компенсаторами, номограммных тахеометрах и кипрегелях); оборачивания изображения (в зрительных трубах с прямым изображением); удлинения габаритного хода луча; разделения пучков лучей и в других случаях, наряду с системами плоских зеркал.

Например, призмы $AP-90^\circ$, $БР-180^\circ$ являются составными частями большинства оптических отсчетных и других систем.

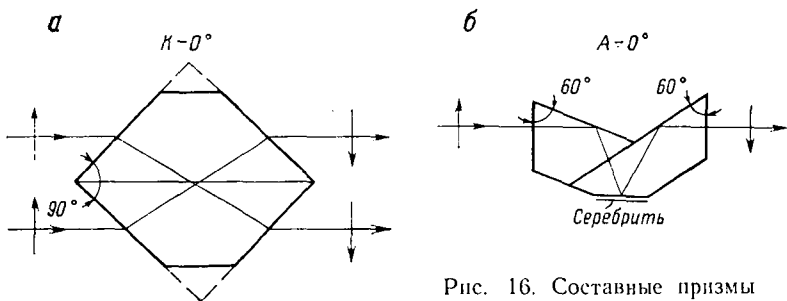


Рис. 16. Составные призмы

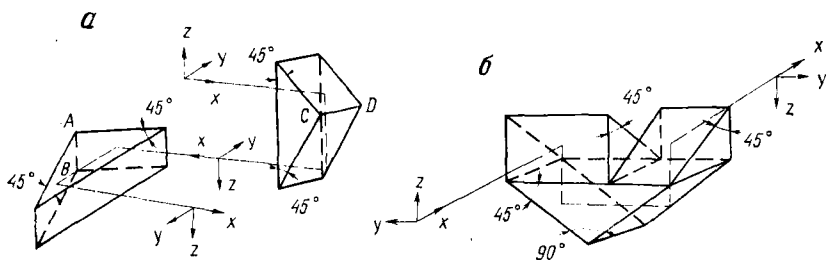


Рис. 17. Оборачивающие системы призм

Призма Дове используется в юстировочных приборах для проверки главного условия в нивелирах, в номограммных тахеометрах для удлинения хода луча. Полупентапризма применяется как окулярная призма в кипрегеле КН, создавая удобства для наблюдателя, особенно при больших наклонах трубы. Ромб-призма используется в оптическом микрометре Редта. Пентапризма применяется в оптических отсчетных и визуальных системах, в эккерах, всюду, где углы падения могут изменяться (в нивелире Н-10КЛ в оптическую систему включены две пентапризмы). Оборачивающие системы находят применение в нивелирах с компенсаторами [NiB (МОМ) — система Порро II рода] и используются в трубах с прямым изображением. Составные призмы чаще применяют в сложных нестандартизованных геодезических приборах.

Призмы, или призмные отражательные системы, должны проверяться на возможность появления вредных (паразитных) отражений. Паразитных изображений можно избежать, если полный размер призмы не превышает требуемого светового размера, или путем применения специальных шторок.

§ 10. СФЕРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО

В качестве оптической детали с отражающей поверхностью в геодезических и астрономических приборах применяют сферическое зеркало (часть шаровой амальгамированной поверх-

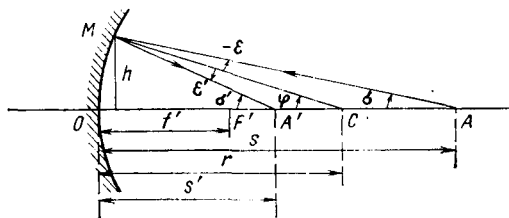


Рис. 18. Ход луча и изображение в сферическом зеркале

ности). На рис. 18 показан ход параксиального луча, падающего в точке M на вогнутое сферическое зеркало. Луч выходит из точки A , лежащей на главной оптической оси OC . Точка O является вершиной сферы, точка C — центр сферы, $OC = r$ — радиус сферы.

Легко убедиться в том, что расстояние до изображения A' от вершины O , равное s' , не зависит от угла падения (если луч проходит вблизи главной оптической оси), а зависит только от расстояния s от вершины сферы до предмета A и от радиуса сферы r , что точки A и A' — сопряженные точки.

По закону отражения радиус сферы MC является биссектрисой угла при точке M . По свойству биссектрисы имеем равенство отношений

$$AM/A'M = AC/A'C.$$

Учитывая по условию параксиального пучка, что $h \ll r$, принимаем $AM = AO = s$; $A'M = A'O = s'$. Отношения перепишутся в виде

$$\frac{s}{s'} = \frac{s' - r}{r - s'}$$

или

$$sr - ss' = ss' - s'r.$$

Разделим равенство на $ss'r$, получим

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) является основным уравнением сферического зеркала.

Уравнением (3.5) доказано, что расстояние до изображения s' в сферическом зеркале не зависит от угла падения ϵ и от углов ϕ и σ , а зависит только от радиуса сферы r и расстояния до предмета s . Вывод справедлив лишь для пучка лучей, идущего вблизи главной оптической оси.

Все другие лучи, выходящие из точки A под тем же условием, также соберутся в точке A' , которая является ее изображением в сферическом зеркале. Точки A и A' — сопряженные точки.

Пользуясь уравнением (3.5), удалим точку A в бесконечность ($s = \infty$), тогда изображение точки A будет в фокусе зеркала. Из уравнения (3.5) получим формулу оптической силы сферического зеркала, помещенного в воздухе или пустоте,

$$1/s' = 2/r = 1/f', \quad (3.6)$$

откуда фокусное расстояние (см. рис. 18)

$$f' = r/2. \quad (3.7)$$

С учетом (3.7) уравнение (3.5) обращается в известную основную формулу геометрической оптики

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'}. \quad (3.8)$$

Формулы (3.5), (3.6), (3.7) и (3.8) с изменением знака являются общими и для сферического выпуклого зеркала.

Приведем некоторые правила по построению изображений в сферическом зеркале и примеры к ним.

Точка (предмет) на главной оптической оси

1. Из точки проводится произвольный луч до зеркальной поверхности.

2. Через фокус проводится вспомогательный луч, параллельный данному, и его отраженный луч до пересечения с фокальной плоскостью.

3. Изображение получится на главной оси на продолжении линии, соединяющей точки: пересечение основного луча с зеркальной поверхностью и пересечение отраженного вспомогательного луча с фокальной плоскостью.

Точка (предмет) вне главной оптической оси

1. Из точки проводится луч, параллельный главной оси, его отраженный луч пройдет через фокус.

2. Через точку из центра сферы проводится побочная ось.

3. Изображение получится вне главной оси на пересечении побочной оси с отражением основного луча.

На рис. 19—22 показаны ход лучей и построение изображений в сферических зеркалах (вогнутом и выпуклом). На рис. 19, *a* и 20, *a* предмет расположен между фокусом и вершиной зеркала ($0 < s < f$). Изображение будет мнимое, прямое, увеличенное и расположено за зеркалом ($0 > -s' > -\infty$). На рис. 19, *б* и 20, *б* предмет находится между фокусом и центром ($f < s < 2f = r$). Изображение действительное, обратное, увеличенное, за центром ($\infty > s' > 2f$). На рис. 19, *в* и 20, *в* предмет за двойным фокусным расстоянием ($2f < s < \infty$). Изображение действительное обратное, уменьшенное и расположено между центром и фокусом.

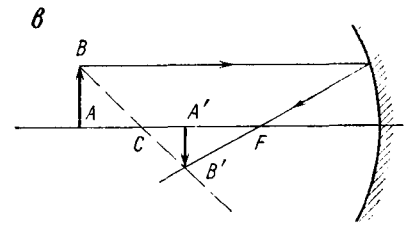
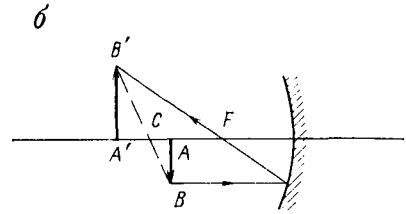
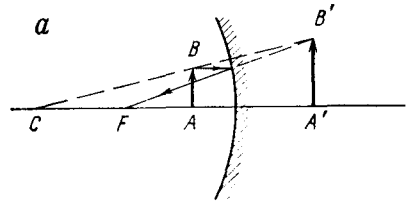
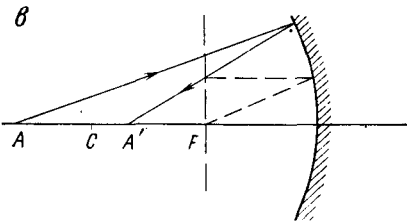
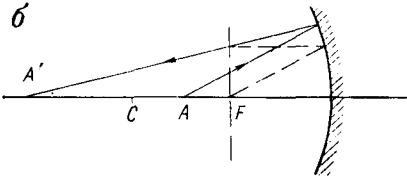
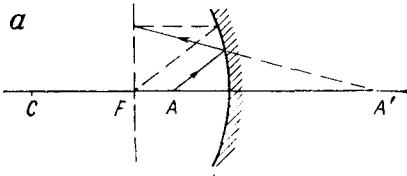


Рис. 19. Построение изображения точки, расположенной на оптической оси, в вогнутом сферическом зеркале

Рис. 20. Построение изображения точки, расположенной вне оптической оси, в вогнутом сферическом зеркале

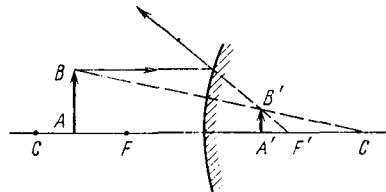
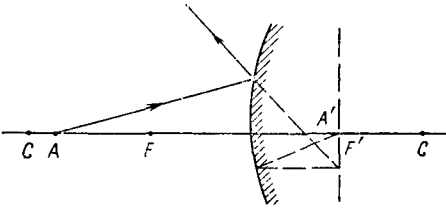


Рис. 21. Построение изображения точки, расположенной на оптической оси, в выпуклом сферическом зеркале

Рис. 22. Построение изображения точки, расположенной вне оптической оси, в выпуклом сферическом зеркале

Изображение в выпуклом зеркале (рис. 21 и 22) всегда будет мнимое, прямое, уменьшенное и расположено между фокусом и вершиной.

Для контроля построения изображения, когда предмет находится вне главной оптической оси, могут быть использованы и другие лучи, например, лучи, идущие через главный фокус и через вершину сферы.

Примером применения сферических зеркал в геодезических приборах является зеркально-линзовая труба Д. Д. Максудова и др.

Знания о построении изображений в плоских и сферических зеркалах позволяют построить изображения в цилиндрических и конических зеркалах, где по одному сечению будет плоское зеркало, а по второму — сферическое.

§ 11. ЦЕНТРИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Наибольшее распространение в геодезических приборах имеют детали со сферическими преломляющими поверхностями. Как правило, они объединены в центрированные оптические системы линз, призм, зеркал и т. п. В оптической центрированной системе центры кривизны всех преломляющих и отражающих поверхностей оптических деталей, входящих в систему, располагаются на одной прямой, называемой оптической осью системы.

Простейшей оптической центрированной системой является оптическая система с одной сферической преломляющей поверхностью. На рис. 23 сферическая поверхность с вершиной O и радиусом r разделяет две оптически прозрачные среды с показателями преломления n и n' . Центр сферы — точка C и оптическая ось — OC .

В системе с одной сферической поверхностью оптическая ось принимается условно, в такой системе оптических осей может быть бесчисленное множество.

На расстоянии s от поверхности раздела на оптической оси выберем точку A (предмет). Из этой точки проведем произвольный луч AM (в области параксиального пучка, когда $h \ll \ll r$) до границы раздела двух сред. Изображение предмета после преломления получится в точке A' на расстоянии s' от сферической поверхности. Докажем, что все другие параксиальные лучи, исходящие из точки A , после преломления на заданной сферической поверхности соберутся также в точке A' на оптической оси, что расстояние до изображения не зависит от угла падения, а зависит лишь от удаления предмета от сферы и радиуса сферы.

На рис. 23 луч из точки A в точку M идет под малым углом ($-\sigma$) к оптической оси. Лучи падающий и преломленный образуют с нормалью MC (радиусом кривизны сферы) соответственно малые углы падения ($-\varepsilon$) и преломления ($-\varepsilon'$). Высота точки падения M над оптической осью равна h .

По закону преломления при малых углах имеем

$$n(-\varepsilon) = n'(-\varepsilon').$$

Для $\triangle AMC$ угол ($-\varepsilon$) является внешним и равен сумме внутренних углов, не смежных с ним, $-\varepsilon = \varphi - \sigma$; аналогично из $\triangle CMA'$ $-\varepsilon' = \varphi - \sigma'$.

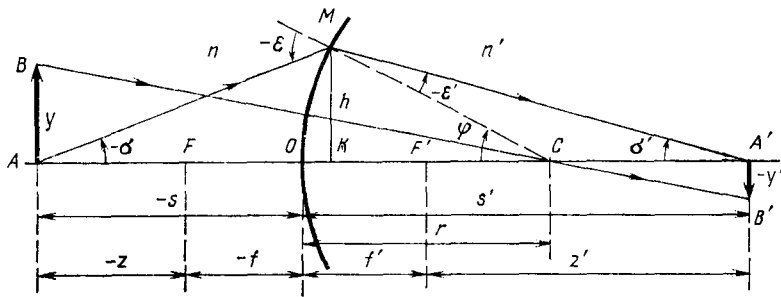


Рис. 23. Преломление луча сферической поверхностью

Подставим значения углов, получим

$$n(\varphi - \sigma) = n'(\varphi - \sigma'). \quad (3.9)$$

Значения углов $(-\sigma)$, σ' и φ определяются из $\triangle AMK$ и $\triangle KMA'$, когда отрезок $OK \rightarrow 0$.

Имеем

$$-\sigma = h/|-s|; \quad \sigma' = h/s'; \quad \varphi = h/r.$$

С учетом полученных выражений углов уравнение (3.9) примет окончательный вид

$$n \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{r} \right). \quad (3.10)$$

Полученное уравнение называется нулевым инвариантом Аббе или формулой Аббе. При заданных величинах n , n' и r каждому значению s соответствует единственное расстояние до изображения s' , т. е. все лучи параксиального пучка, исходящего из точки A , пересекут оптическую ось в одной точке A' , которая является изображением точки A . Точки A и A' — сопряженные точки сферической преломляющей поверхности с радиусом r .

Формула (3.10), записанная в несколько ином виде, носит название основной формулы параксиальной оптики;

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (3.11)$$

Формулы (3.10) и (3.11) приближенные, но при очень малых отношениях h/r соответствуют достаточно точно стигматическому изображению.

Формулы (3.10) или (3.11) являются основными в параксиальной оптике. Из них вытекают все основные свойства параксиальной оптики и получаются другие, важные для расчета формулы.

Если предмет удален в бесконечность ($s = -\infty$), то $s' = f'$. Подставим эти значения в формулу (3.11), получим уравнение для вычисления заднего фокусного расстояния

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

или

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (3.12)$$

Если в бесконечности находится изображение ($s' = \infty$), то $s = f$, подставляя эти значения в формулу (3.11), найдем переднее фокусное расстояние

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

или

$$f = -\frac{nr}{n' - n}. \quad (3.13)$$

Найдем отношение фокусных расстояний путем деления уравнения (3.12) на уравнение (3.13)

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (3.14)$$

Определим оптическую силу Φ системы через ее фокусное расстояние

$$\Phi = \frac{n' - n}{r} \quad (3.15)$$

или

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}. \quad (3.16)$$

Подставляя значение оптической силы (3.15) в основную формулу (3.11), получим выражение

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \Phi. \quad (3.17)$$

Поделим правую и левую части этого выражения на $(n' - n)/r$, получим

$$\frac{1}{s'} \cdot \frac{n'}{n' - n} r - \frac{1}{s} \cdot \frac{n}{n' - n} r = 1. \quad (3.18)$$

Введем фокусные расстояния из формул (3.12) и (3.13) в выражение (3.18), будем иметь формулу Гаусса (3.19) —

основное уравнение преломления луча

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1. \quad (3.19)$$

Придадим формуле Гаусса другой вид. Для этого отрезки, определяющие положение предмета и изображения, будем отсчитывать не от вершины сферы (точки O), а соответственно от переднего и заднего фокусов (F и F'). На рис. 23 обозначим отрезки $-z = FA$ и $z' = F'A'$ и фокусные расстояния $-f = OF$ и $f' = OF'$. В соответствии с принятыми обозначениями имеем

$$-s = -f - z, \quad (3.20)$$

$$s' = f' + z'. \quad (3.21)$$

Подставляя значения (3.20) и (3.21) в формулу Гаусса (3.19), получим

$$\frac{f'}{f' + z'} + \frac{f}{f + z} = 1. \quad (3.22)$$

После простых преобразований получим формулу Ньютона

$$ff' = zz'. \quad (3.23)$$

Построим на рис. 23 изображение не точки, а светящегося малого отрезка $A'B'$, т. е. определим величину изображения y' через установленные зависимости и величину предмета y . Из точки B проведем луч нормально к сферической поверхности. Он пересечет разделительную сферу без преломления, и в точке B' получится изображение точки B .

Из подобия треугольников ABC и $A'B'C'$ имеем

$$\frac{-y'}{y} = \frac{s' - r}{-s + r}$$

или

$$\frac{y'}{y} = \frac{r - s'}{r - s} = \beta, \quad (3.24)$$

откуда

$$y' = \frac{r - s'}{r - s} y. \quad (3.25)$$

Формула (3.24) или $\beta = y'/y$ есть линейное (поперечное) увеличение системы. Линейное увеличение также можно определить и по другим формулам, приведем их без выводов:

$$\beta = -f/z, \quad (3.26)$$

$$\beta = -z'/f', \quad (3.27)$$

В основной формуле (3.10) приведем выражения в скобках к общим знаменателям, получим

$$n \left(\frac{s-r}{s} \right) = n' \left(\frac{s'-r}{s'} \right) \quad (3.28)$$

или

$$\frac{r-s'}{r-s} = \frac{ns'}{n's}. \quad (3.29)$$

Сравнивая выражения (3.24) и (3.29), имеем

$$y'/y = ns'/n's = \beta. \quad (3.30)$$

Для парааксиального пучка s' и s в формуле (3.30) заменим через выражения

$$s' = h/\sigma'; \quad s = h/\sigma,$$

получим, после сокращения на h , инвариант Гюйгенса — Гельмгольца

$$ny\sigma = n'y'\sigma'. \quad (3.31)$$

Произведение $ny\sigma$ инвариантно для пространства предметов и пространства изображений любой поверхности центрированной системы.

На рис. 24 изображение первой сферической поверхности является предметом для второй, изображение второй является предметом для третьей и т. д.

Таким образом, центрированная оптическая система обладает свойством сохранять гомоцентричность парааксиального пучка независимо от числа преломляющих (или отражающих) поверхностей.

В общем виде, согласно рис. 24, можно записать

$$n_1 y_1 \sigma_1 = n_2 y_2 \sigma_2 = \dots = n_w y_w \sigma_w. \quad (3.32)$$

Сферическая преломляющая поверхность характеризуется также угловым увеличением γ , отношением углов σ' и σ , образованных преломленным и падающим парааксиальными лучами с оптической осью,

$$\gamma = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma'/\sigma. \quad (3.33)$$

Чтобы найти зависимость между угловым и линейным увеличениями, воспользуемся инвариантом Гюйгенса—Гельмгольца. Уравнение (3.31) запишем в виде

$$\sigma'/\sigma = ny/n'y'$$

или, с учетом линейного увеличения (3.24), получим

$$\gamma\beta = n/n'$$

или

$$\gamma = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}. \quad (3.34)$$

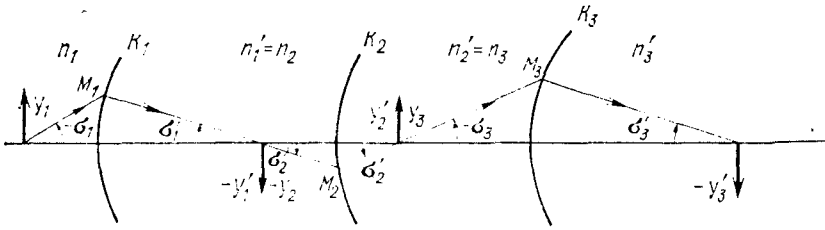


Рис. 24. Вывод уравнения Гюйгенса—Гельмгольца

Произведение углового и линейного увеличений — постоянная величина, равная отношению показателей преломлений сред, или угловое увеличение обратно пропорционально линейному увеличению и зависит от показателей преломления сред.

Для оптической системы в воздухе или в пустоте имеем

$$\gamma\beta = 1. \quad (3.34')$$

На основе уравнения (3.14) формулу (3.34) можно записать в виде

$$\gamma\beta = -f/f'. \quad (3.35)$$

Соответственные точки предмета и изображения, в которых $\gamma=1$, называются узловыми. Если $n=n'$, то главная плоскость совпадает с узловой, а главная точка — с узловой точкой.

Продольное увеличение системы определяют по формуле

$$\alpha = -z'/z, \quad (3.36)$$

где z и z' — сопряженные отрезки на оси, или

$$\alpha = \frac{z'^2}{ff'} = \frac{ff'}{z^2} = -\frac{f'}{f} \beta^2 = \frac{n'}{n} \beta^2. \quad (3.37)$$

С учетом (3.35) устанавливается зависимость между α , β , γ :

$$\alpha\gamma = \beta. \quad (3.38)$$

Продольное увеличение α систем связано с глубиной резкого изображения оптической системы вдоль оси.

Линейное увеличение β систем характеризует увеличение предмета в фокальной плоскости, рассматриваемое окуляром.

Наконец, видимое или окулярное увеличение Γ есть отношение двух изображений на сетчатке: изображения предмета, рассматриваемого через оптическую систему, к изображению того же предмета, рассматриваемого невооруженным глазом. Видимое увеличение можно определить как отношение тангенсов углов, под которыми предмет рассматривается через оптическую систему и невооруженным глазом

$$\Gamma = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega. \quad (3.39)$$

§ 12. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА
ДВУМЯ СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ. ЛИНЗА

Пусть на пути параксиального луча света, исходящего из точки A_1 , расположенной на общей оптической оси C_2C_1 , установлены две сферические поверхности с радиусами кривизны r_1 и $-r_2$ (рис. 25). После преломления первой поверхностью луч A_1M пойдет по направлению MN , продолжение которого пересечет оптическую ось в точке A_1' , на расстоянии s_1' , определяемом формулой Аббе (3.10),

$$n_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{r_1} \right) = n_1' \left(\frac{1}{s_1'} - \frac{1}{r_1} \right). \quad (3.40)$$

В точке N луч снова преломится, пойдет по направлению NA_2' и пересечет оптическую ось в точке A_2' на расстоянии s_2' . Если бы светящаяся точка была расположена в точке A_2' , то луч $A_2'N$ после преломления в точке N пошел бы по направлению NM , а изображение точки A_2' было бы мнимым и получилось бы в точке A_1' на расстоянии s_1' . Тогда уравнение (3.10) для этого случая записалось бы в виде

$$n_1 \left(\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{r_2} \right) = n_1' \left(\frac{1}{s_1'} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.41)$$

Пренебрегая толщиной вещества — величиной d , после вычитания из уравнения (3.40) уравнения (3.41) получим

$$n_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2'} \right) - n_1 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = -n_1' \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

или, после приведения подобных членов, имеем

$$n_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2'} \right) = (n_1 - n_1') \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.42)$$

Уравнение (3.42) является уравнением тонкой линзы ($d=0$). Запишем уравнение (3.42) в виде

$$\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2'} = \frac{n_1 - n_1'}{n_1} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.43)$$

Если первой средой является воздух ($n_1=1$), а показатель преломления вещества линзы n_1' обозначить через n , то получим в общем виде уравнение тонкой линзы:

$$\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2'} = (1 - n) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.44)$$

При $s_1 = \infty$ получим формулу оптической силы тонкой линзы, помещенной в воздухе,

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.45)$$

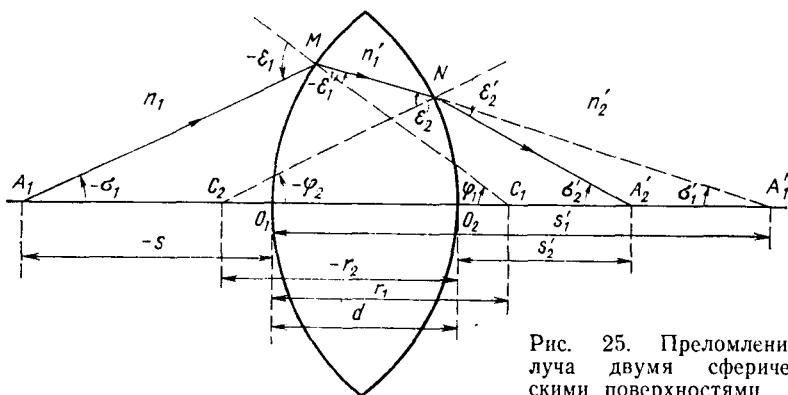


Рис. 25. Преломление луча двумя сферическими поверхностями

Подставляя $1/f'$ в правую часть равенства (3.44), получим в окончательном виде уравнение тонкой линзы в воздухе

$$\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f_1}. \quad (3.46)$$

Линза является самой простой центрированной оптической системой. Она состоит из двух сферических поверхностей, ограничивающих прозрачный материал (обычно стекло). В частных случаях одна из поверхностей линзы может быть плоскостью ($r = \infty$).

Линза называется тонкой, если ее толщина d мала по сравнению с радиусами кривизны. В тонкой линзе вершины поверхностей совпадают с главными точками и совпадают между собой, образуя центр линзы. Линия, проведенная через центр тонкой линзы и через центры кривизны поверхностей, называется оптической осью линзы. Центральную часть тонкой линзы можно принять за плоскопараллельную пластинку. Лучи, проходящие через центр линзы, практически не преломляются.

Плоскости, проходящие через фокусы линзы и перпендикулярные к оптической оси, называются фокальными плоскостями.

Для построения изображений в тонкой положительной линзе (рис. 26) достаточно провести: луч 1, падающий на первую поверхность линзы параллельно оптической оси, который после преломления пересечет ось по другую сторону линзы в точке F' , расположенной на расстоянии f' от линзы; затем луч 2, падающий на линзу и проходящий через ее фокус F , этот луч выходит из линзы параллельно ее оптической оси и луч 3, проходящий через оптический центр линзы, не изменяющий своего направления.

Формулы параксиальной оптики, полученные в § 11, применимы к оптическим системам с двумя преломляющими сферическими разделительными поверхностями и более.

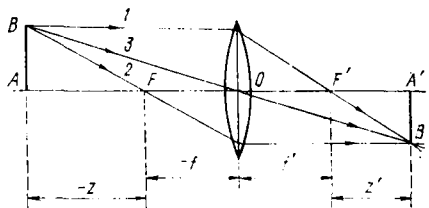


Рис. 26. Ход лучей и построение изображений в тонкой линзе

§ 13. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Простейшая оптическая центрированная система (линза) для широкого пучка лучей дает весьма несовершенное изображение. Идеальных оптических систем, которые давали бы стигматическое изображение независимо от ширины пучка, в природе не существует, за исключением плоских зеркал. Но реальные центрированные оптические системы, как правило, имеющие значительные диаметры входных отверстий, также призваны давать изображения хорошего качества, т. е. строить стигматические или близкие к стигматическим изображения. Это достигается специальными расчетами оптических систем, подбором и сочетанием линз с различными радиусами кривизны их поверхностей, разными сортами оптического стекла и определением промежутков между линзами. Теория таких расчетов достаточно громоздка. Поэтому для оценки качества реальных оптических систем их сравнивают с идеальной оптической системой.

Теория идеальной оптической системы, разработанная Гауссом в 1841 г., есть чисто геометрическая теория, устанавливающая соотношения между точками, линиями, плоскостями. Она основывается на следующих положениях:

— каждой точке пространства предметов соответствует только одна точка в пространстве изображений (точки сопряженные);

— каждой прямой линии пространства предметов соответствует только одна прямая линия в пространстве изображений (линии сопряженные);

— если какая-либо точка в пространстве предметов лежит на прямой, то сопряженная с ней точка также лежит на прямой, сопряженной с первой прямой;

— всякая плоскость изображается плоскостью, сопряженной с первой.

Оптическая ось идеальной центрированной системы является осью симметрии.

Теория Гаусса установила ряд так называемых кардинальных точек и плоскостей, задание которых полностью описывает все свойства оптической системы и позволяет пользоваться ею, не рассматривая реального хода лучей в системе.

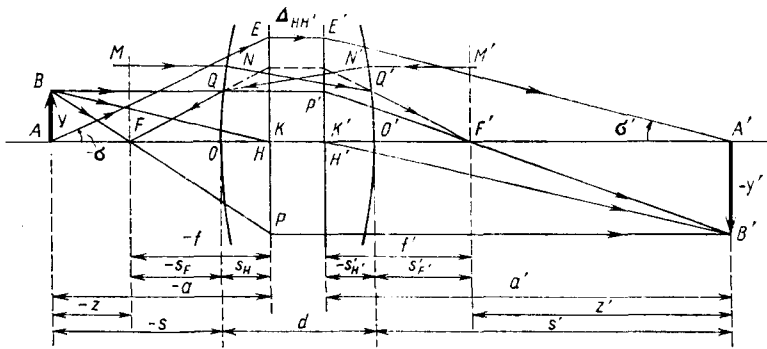


Рис. 27. Ход лучей и построение изображений в идеальной оптической системе. Кардинальные плоскости и точки

На рис. 27 представлена идеальная оптическая система с двумя сферическими поверхностями. Первая сферическая поверхность с вершиной O и последняя — с вершиной O' . $FOO'F'$ — оптическая ось системы.

Чтобы построить изображение точки через эту систему, достаточно знать положение двух пар сопряженных точек, называемых кардинальными. Это точки F и F' — передний и задний фокусы; H и H' — передняя и задняя главные точки*, т. е. знать фокусные расстояния и положение главных плоскостей**.

Задняя главная плоскость H' определяется пересечением продолжений лучей MN пространства предметов, идущих параллельно оси, и $Q'F'$ — преломленного луча, идущего через фокус.

Передняя главная плоскость H аналогично определится, если параллельный луч идет в пространстве изображений $M'N'$, а преломление его QF — в пространстве предметов.

Точки пересечения главных плоскостей с оптической осью есть главные точки системы (H' — задняя главная точка, H — передняя главная точка).

Задний фокус системы — точка F' . Сопряженная с ней точка находится в бесконечности в пространстве предметов на оптической оси.

* Когда $n \neq n'$, то в качестве кардинальных точек могут быть использованы узловые точки K и K' , проходя через которые сопряженные лучи в пространствах предметов и изображений не изменяют направления.

** Когда $n = n'$, узловые точки совпадают с главными. Главными плоскостями называются две сопряженные плоскости, расположенные перпендикулярно к оптической оси и проходящие через главные точки. Для главных плоскостей линейное увеличение $\beta = +1$.

Передний фокус системы — точка F . Сопряженная с ней точка находится в пространстве изображений на оптической оси в бесконечности.

Заднее фокусное расстояние $f' = H'F'$ — расстояние от задней главной точки до заднего фокуса.

Переднее фокусное расстояние $f = HF$ — расстояние от передней главной точки до переднего фокуса (отрицательное). Фокусные расстояния можно выразить через высоту h и углы $-\sigma$ и σ' .

$$f = h/\operatorname{tg}(-\sigma), \quad (3.47)$$

$$f' = h/\operatorname{tg}\sigma'. \quad (3.48)$$

Задний и передний вершинные фокальные отрезки есть расстояния от вершин до фокусов, $s'_{F'} = OF'$ и $-s_F = OF$.

Задняя и передняя фокальные плоскости проходят через фокусы перпендикулярно к оптической оси.

Расстояния задней (передней) главной плоскости от вершины последней (первой) поверхности системы

$$s'_{H'} = s'_{F'} - f', \quad (3.49)$$

$$s_H = s_F - f. \quad (3.50)$$

Пусть оптическая система задана кардинальными точками H , H' и F , F' . Получим формулы, определяющие положение всех сопряженных точек системы относительно оптической оси, фокусов и главных точек.

В пространстве предметов возьмем произвольный отрезок AB , перпендикулярный к оптической оси. Его положение в пространстве предметов определится координатами концов отрезка, точек A и B (по оптической оси $-Z$; перпендикулярно к ней: O ; y).

Найдем положение сопряженного отрезка $A'B'$ в пространстве изображений. Для этого достаточно из точки B провести два луча (один параллельно оптической оси до задней главной плоскости, далее через F' ; второй через F до передней главной плоскости, далее параллельно оси, в соответствии со свойствами главных плоскостей). Пересечение лучей (точка B') есть изображение точки B . Точка A' (изображение точки A) получится как основание перпендикуляра, опущенного из точки B' на оптическую ось.

Положение изображения отрезка (точек A' и B') определится координатами: на оптической оси $+z'$, перпендикулярно к оси, соответственно, O и $(-y')$. Положение отрезка $A'B'$ относительно задней главной плоскости определится расстоянием s' из формулы Гаусса (3.19), справедливой, как и другие уравнения, для одной или нескольких сферических поверхностей.

В подтверждение рассмотрим подобные треугольники ABF и FHP , а также $A'B'F'$ и $F'H'P'$, имеем

$$-y'/y = -f/z = z'/f' \quad \text{или} \quad \beta = y'/y = -f/z = -z'/f',$$

откуда $ff' = zz'$, получим известное уравнение Ньютона, позволяющее определить положение изображения относительно задней фокальной плоскости по известным фокусным расстояниям и заданному положению предмета относительно передней фокальной плоскости

$$z' = ff'/z.$$

Если значения $-z$ и z' заменить в соответствии с рис. 27: $z = s - f$, $z' = s' - f'$, то получим формулу Гаусса (3.19), и расстояние до изображения относительно задней главной плоскости

$$s' = \frac{sf'}{s - f}.$$

Для оптической системы, помещенной в воздухе, крайние среды имеют показатель преломления $n' = n = 1$, тогда из уравнения (3.14) имеем

$$f' = -f. \quad (3.51)$$

С учетом (3.51) формула Гаусса (3.19) обращается в формулу (3.46) тонкой линзы в воздухе.

Уравнение (3.46), называемое формулой отрезков, используется для определения положения изображения относительно задней главной плоскости

$$s' = \frac{sf'}{s + f'}.$$

Чтобы определить требования, которым должна удовлетворять идеальная оптическая система, когда лучи идут широким гомоцентрическим пучком, проведем луч AE из точки A (см. рис. 27) под произвольным углом $(-\sigma)$ к оптической оси. Сопряженный с ним луч $E'A'$ образует с оптической осью угол σ' .

Из рис. 27

$$EH = E'H' = -s \operatorname{tg}(-\sigma) = s' \operatorname{tg} \sigma'.$$

Из уравнений (3.20) и (3.21) подставим $-s$ и s' , получим

$$-(z + f) \operatorname{tg}(-\sigma) = (z' + f') \operatorname{tg} \sigma'. \quad (3.52)$$

Из уравнений (3.26), (3.27) и (3.24) получим z и z' :

$$z = -\frac{y}{y'} f, \quad z' = \frac{y'}{y} f'.$$

Подставим эти значения в выражение (3.52), после некоторых преобразований получим

$$y'f' \operatorname{tg} \sigma = -yf \operatorname{tg} \sigma. \quad (3.52')$$

Уравнение (3.52') справедливо для идеальных систем при любых углах σ и σ' .

Для параксимального пучка имеется уравнение (3.31).

Сопоставляя уравнения (3.52') и (3.31) для параксимальной области (когда $\text{tg } \sigma = \sin \sigma \approx \sigma/\rho$ и $\text{tg } \sigma' = \sin \sigma' = \sigma'/\rho$), получим уравнение (3.14). Если крайние среды одинаковы ($n' = n$), когда линза, например, в воздухе, то $f' = -f$.

Увеличения (линейное, продольное и угловое) идеальной оптической системы определяются также известными формулами: (3.24), (3.26), (3.27), (3.36), (3.37), (3.34), (3.35), (3.38) параксимальной оптики, т. е. идеальная система для реальных приборов осуществима только в параксимальной области.

Наконец, воспользуемся свойствами главных плоскостей и кардинальных точек для графического построения изображений.

На рис. 28 точка A расположена в пространстве предметов на расстоянии $(-z)$ от переднего фокуса, на оптической оси. Изображение этой точки можно построить, используя следующие два луча: луч AQ , проведенный под произвольным углом $(-\sigma)$ к оптической оси; луч CP , проведенный параллельно оптической оси, через точку пересечения первого луча с передней фокальной плоскостью.

После преломления в системе (по свойству главных плоскостей) второй луч обязательно пройдет через задний фокус F' . Искомое изображение точки A' есть точка пересечения оптической оси и преломленного первого луча, проведенного через точку Q' , параллельно преломленному второму лучу $P'F'$. Расстояние от заднего фокуса до изображения равно z' .

Правильность графического построения доказывается справедливостью формулы Ньютона по отношению точек A и A' . Из подобных треугольников CQP и $ACF \cdot F'P'H'$ и $A'F'D'$ имеем

$$PQ/FC = CP/AF \text{ и } D'F'/P'H' = F'A'/H'F'.$$

Учитывая, что $D'F' = Q'P' = QP$ (по построению), запишем

$$CP/AF = F'A'/H'F',$$

причем $CP = -f$; $AF = -z$; $A'F' = z'$; $H'F' = f'$, откуда $zz' = ff'$, следовательно, точки A и A' действительно являются сопряженными.

Рассмотрим пример построения изображения, когда предмет находится вне оптической оси.

На рис. 28 отрезок AB расположен перпендикулярно к главной оптической оси на расстоянии $(-z)$ от передней фокальной

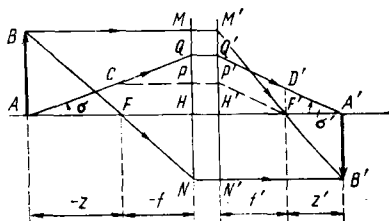


Рис. 28. Построение изображения точки, расположенной на оптической оси. Построение изображения отрезка, расположенного перпендикулярно к оптической оси

плоскости. Точка B находится вне оси, а точка A на оси. Изображение отрезка AB можно построить следующими двумя лучами, проведенными из точки B : лучом BM , проведенным параллельно оптической оси, который после преломления в системе (на задней главной плоскости) обязательно пройдет через задний фокус F' ; лучом BN , проходящим через передний фокус F , который после преломления в системе (на передней главной плоскости) пойдет параллельно оси.

На пересечении преломленных лучей получится искомая точка B' . Перпендикуляр из этой точки на ось в пересечении с осью даст точку A' — изображение точки A .

Доказательство справедливости построения, подобно предыдущему, можно сделать, используя две пары подобных треугольников: $\triangle ABF \sim \triangle FNH$ и $\triangle F'B'A' \sim \triangle F'N'H'$. Откуда определяется уравнение (3.23).

§ 14. СИСТЕМА ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ЛИНЗ

В геодезических приборах, как правило, применяются системы из двух, трех линз и более. Покажем, что две линзы и более можно заменить одной, оптические действия которой эквивалентны действиям составляющих систему линз.

Пусть на рис. 29 на одной оптической оси установлены две линзы (L_1 и L_2), заданные соответственно главными плоскостями H_1H_1' и H_2H_2' ; фокусами F_1F_1' и F_2F_2' и расстоянием между линзами e (от задней главной плоскости линзы L_1 до передней главной плоскости линзы L_2). Определим положение кардинальных точек H, H', F, F' эквивалентной линзы L .

Из точки B проведем луч BM_1 , параллельный общей оптической оси. После преломления в первой линзе луч пройдет через ее задний фокус F_1' и после преломления во второй линзе через F' — задний фокус эквивалентной линзы. Пересечение продолжений лучей BM_1 и $M_2'F'$ есть точка B' — изображение точки B в эквивалентной системе L . Перпендикуляр, опущенный из точки B' на ось, даст заднюю главную точку H' эквивалентной системы.

Передняя главная плоскость H линзы L может быть найдена, если построить изображение точки C' через систему в обратном порядке, проведя луч $C'N_2'$ параллельно оптической оси, затем через F_2 и F в точку C (пересечение продолжений лучей $C'N_2'$ и $N_1'F$).

Графическое построение дает ясное представление о ходе лучей в сложной оптической системе, но не обеспечивает необходимой точности определения положения кардинальных точек эквивалентной линзы.

Определим f и f' и положение главных плоскостей эквивалентной системы L аналитически.

Дано: $h_1, -h_1', -f_1, f_1, -f_2f_2', e$, также известно $\Delta = e - f_1' + f_2 = -(f_1' - f_2 - e)$.

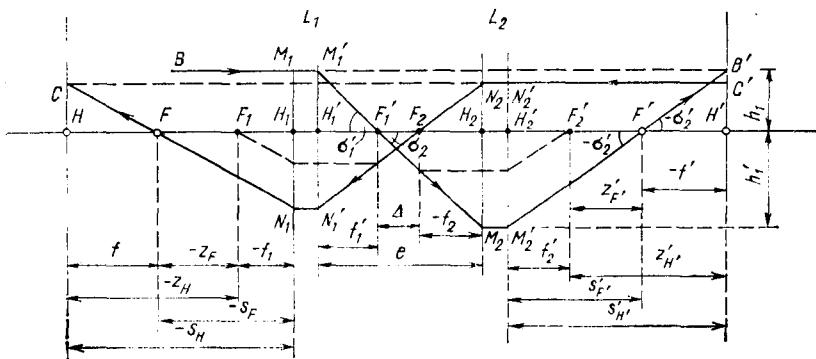


Рис. 29. Определение положения кардинальных точек эквивалентной линзы

Требуется определить $-f, f', -z_F, z'_F, -z_H$ и z'_H .

Для решения на рис. 29 обозначим соответствующие величины. Точку F_2' примем за начальную, тогда положение заднего фокуса F' эквивалентной линзы относительно точки F_2' определится величиной z'_F , по формуле Ньютона, так как F_1' и F' являются сопряженными точками относительно линзы L_2 (причем $-z_{F_2} = \Delta$).

Имеем

$$z'_F = z'_{F_2} = -f_2 \cdot f'_2 / \Delta, \quad (3.53)$$

где Δ — оптический интервал. На рис. 29 $\Delta > 0$,

$$\Delta = -(|f'_1 - f_2 - e|) = e - (|f'_1| + |f_2|). \quad (3.54)$$

Положение переднего фокуса F системы определится относительно точки F_1 . Обозначим $FF_1 = -z = -z_F$ и $F_1'F_2 = \Delta = z'_F$, получим по формуле Ньютона относительно линзы L_1

$$z_F = z_{F_1} = f'_1 f_1 / \Delta. \quad (3.55)$$

Определим фокусные расстояния эквивалентной линзы L . Из $\triangle M_1'F_1'H_1'$ и $\triangle B'H'F'$ имеем

$$f'_1 = h_1 / \sigma'_1; \quad f' = h_1 / -\sigma'_2.$$

Сравнивая полученные выражения, запишем

$$f'_1 \sigma'_1 = f' \sigma'_2$$

или

$$f' = f'_1 \frac{\sigma'_1}{\sigma'_2}. \quad (3.56)$$

Из $\Delta F_1 H_2 M_2$ и $\Delta H_2' F_1' M_2'$ определим h' :

$$h' = (\Delta - f_2) \sigma_2 = - (f_2' + z_{F'}) \sigma_2'.$$

Найдем отношение углов, подставляя вместо $z_{F'}$ его значение (3.53), имеем

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = - \frac{(f_2' - f_2 f_2' / \Delta)}{\Delta - f_2} = - \frac{f_2'}{\Delta}. \quad (3.57)$$

Формула (3.56) с учетом (3.57) имеет вид

$$f' = - \frac{f_1' f_2'}{\Delta} = - \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - e}. \quad (3.58)$$

Аналогичным путем, при обратном ходе луча из точки C' , найдем

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta} = - \frac{f_1 f_2}{f_1' - f_2' - e}. \quad (3.59)$$

Положение главных точек H и H' относительно фокусов эквивалентной системы определится по формулам

$$z_{H'} = z_{F'} - f', \quad (3.60)$$

$$-z_H = z_F - f. \quad (3.61)$$

Подставим значения $z_{F'}$, z_F , f' и f из формул (3.53), (3.55), (3.58) и (3.59), получим

$$z_{H'} = f_2' \frac{f_1' - f_2}{\Delta}, \quad (3.62)$$

$$z_H = f_1 \frac{f_1' - f_2}{\Delta} = z_1. \quad (3.63)$$

Кардинальные точки эквивалентной системы могут быть определены относительно первой H_1 и последней H_2' главных плоскостей отрезками

$$H_1 F = -s_F, \quad H_2' F' = s_{F'}.$$

$$\text{и } H_1 H = -s_H, \quad H_2' H' = s_{H'}.$$

В соответствии с обозначениями на рис. 29 имеем

$$s_F = z_F + f_1, \quad (3.64)$$

$$s_{F'} = z_{F'} + f_2', \quad (3.65)$$

или, с учетом значений z_F и $z_{F'}$ из (3.53) и (3.55), получим

$$s_F = f_1 \left(1 + \frac{f_1'}{\Delta} \right), \quad (3.64')$$

$$s_{F'} = f_2' \left(1 - \frac{f_2}{\Delta} \right). \quad (3.65')$$

При подстановке значения Δ из (3.54) получим

$$s_F = f \frac{f_2 + e}{f_2}, \quad (3.64'')$$

$$s'_{F'} = f' \frac{f'_1 - e}{f'_1}. \quad (3.65'')$$

Отрезки s_H и $s'_{H'}$ равны:

$$s_H = z_H + f_1, \quad (3.66)$$

$$s'_{H'} = z'_{H'} + f'_2. \quad (3.67)$$

С учетом формул (3.54), (3.62) и (3.63)

$$s_H = f_1 \frac{e}{\Delta} = f \frac{e}{f'_2}, \quad (3.68)$$

$$s'_{H'} = f'_2 \frac{e}{\Delta} = f' \frac{e}{f'_1}. \quad (3.69)$$

Линейное поперечное увеличение эквивалентной системы определится формулой

$$\beta = -f/z, \quad (3.70)$$

где

$$z = z_1 - z_F, \quad (3.71)$$

или, с учетом z_F из (3.55), имеем

$$z = z_1 - \frac{f_1 f'_1}{\Delta}. \quad (3.72)$$

Подставляя значения f и z из (3.59), (3.72) в (3.70), получим

$$\beta = \frac{f_1 f_2}{f_1 f'_1 - z_1 \Delta}. \quad (3.70')$$

Увеличение β также равно

$$\beta = y'_2 / y_1. \quad (3.70'')$$

Оптическая сила системы, помещенной в воздухе, определится формулой (3.45).

За единицу оптической силы принимается диоптрия: $\Phi = 1 \text{ дп} = 1/1 \text{ м}$.

Например, система с фокусным расстоянием $f' = 250 \text{ мм}$ имеет оптическую силу 4 диоптрии.

Оптическая сила эквивалентной системы равна

$$\Phi = \frac{f'_1 + f'_2 - e}{f'_1 f'_2} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2} \quad (3.73)$$

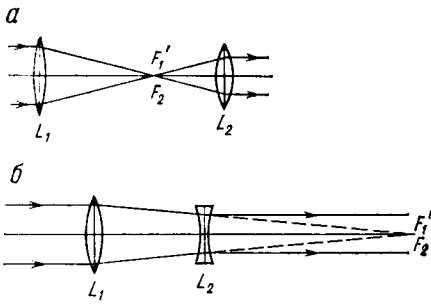


Рис. 30. Простейшие телескопические системы

или

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - e \Phi_1 \Phi_2. \quad (3.73')$$

Учитывая широкое распространение эквивалентных систем в геодезических приборах, приведем некоторые замечания.

Свойства эквивалентных систем, при прочих равных условиях, зависят от оптического интервала Δ и e — расстояния между линзами.

1. Если $e < |f_1| + |f_2|$, то $\Delta > 0$, $\Phi > 0$. Система работает как положительная линза. При $e = 0$ составляющие линзы соприкасаются, а их оптическая сила равна сумме оптических сил составляющих линз, т. е. $\Phi_{\text{эк}} = \Phi_1 + \Phi_2$.

2. Если $e > |f_1| + |f_2|$, то $\Delta < 0$, $\Phi < 0$. Система работает как рассеивающая линза.

3. Если $e = |f_1| + |f_2|$, то $\Delta = 0$, $\Phi = 0$, $f = \infty$. Такая система называется телескопической. Телескопическими системами являются зрительные трубы геодезических приборов. На рис. 30, а, б приведены оптические системы простейших зрительных труб Кеплера и Галилея.

В телескопических системах задний фокус первой линзы (F_1') совмещен с передним фокусом второй линзы (F_2). Параллельный пучок, попадающий в телескопическую систему, выходит из нее также параллельным пучком (главные плоскости системы находятся в бесконечности).

Параллельные пучки, входящие в телескопическую систему под углом к оптической оси, выходят из нее также параллельными пучками, но под большими углами. Это важное свойство телескопических систем обеспечивает спокойное, без напряжения, наблюдение глазом через трубу.

Подставляя в формулу (3.70') $\Delta = 0$, приходим к важному выводу о том, что линейное (поперечное) увеличение телескопической системы постоянно для всех сопряженных точек и не зависит от положения предмета,

$$\beta = f_2/f_1' = \text{const}, \quad (3.74)$$

так как $z_1 \Delta = 0$.

Угловое увеличение для системы в воздухе будет равно

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

Если обе составляющие телескопическую систему линзы помещены в воздухе, то из (3.74) имеем

$$\beta = -f_2'/f_1', \quad (3.75)$$

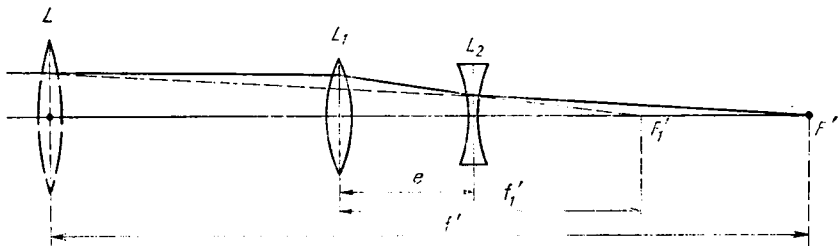


Рис. 31. Телеобъектив

так как $f_2' = -f_2$. Подставим (3.75) в выражение γ , получим

$$\gamma = -f_1'/f_2'. \quad (3.76)$$

Сопоставляя уравнения (3.75) и (3.76), получим

$$\gamma\beta = 1, \quad (3.77)$$

т. е. и угловое увеличение телескопической системы является постоянным. Продольное увеличение тоже постоянно и равно

$$\alpha = \beta^2. \quad (3.78)$$

Видимое увеличение Γ телескопической системы также постоянно и равно угловому увеличению:

$$\Gamma = \gamma. \quad (3.79)$$

Видимое увеличение телескопической системы, состоящей из объектива и окуляра, может быть определено по формулам

$$\Gamma = f_{об}'/f_{ок}'. \quad (3.80)$$

и

$$\Gamma = D_{вх}/D_{вых}. \quad (3.81)$$

Если в телескопическую систему входит еще оборачивающая система с линейным увеличением β , то

$$\Gamma = \frac{f_{об}'}{f_{ок}'} \beta. \quad (3.82)$$

Замена двух линз одной эквивалентной линзой наглядно представлена на рис. 31. Оптические системы, в которых соединяются линзы под условием $e < |f|$, называются телеобъективами, они широко распространены в геодезических приборах.

Если имеется несколько оптических систем, которые требуется заменить одной, то всегда можно сначала заменить две линзы одной эквивалентной системой, затем полученную эквивалентную систему соединяют с третьей линзой и т. д. Используя выведенные расчетные формулы для двух линз, можно получить кардинальные точки для эквивалентной системы с любым числом составляющих линз.

§ 15. ЛИНЗЫ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Расчеты конструктивных элементов реальных оптических систем ведутся с линзами конечной толщины.

Применяя дважды формулу Аббе (3.10) к первой и второй сферическим поверхностям линзы (см. рис. 25 и 27) и учитывая толщину d линзы, получим формулы для линзы конечной толщины [6]

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{r_1 r_2}, \quad (3.83)$$

$$f = -f',$$

$$s_f = -f' \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_2} \right), \quad (3.84)$$

$$s_{f'} = f' \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1} \right), \quad (3.85)$$

$$s_H = -f' d \frac{n-1}{n r_2}, \quad (3.86)$$

$$s_{H'} = -f' d \frac{n-1}{n r_1}, \quad (3.87)$$

$$\Delta_{HH'} = \frac{d(n-1)(r_2 - r_1 + d)}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}. \quad (3.88)$$

По формулам (3.83)—(3.88) можно вычислить оптическую силу, фокусные расстояния и определить положение кардинальных точек линзы по заданным или выбранным радиусам кривизны поверхностей, показателю преломления оптического стекла или другого материала и толщине линзы.

В геодезических приборах применяются разные типы линз: положительные (собираательные), имеющие большую толщину на оптической оси, чем на краях, $\Phi > 0$, и отрицательные (рассеивающие), у которых, напротив, большая толщина на краях и $\Phi < 0$.

На рис. 32 для основных типов линз показаны: положение главных плоскостей и фокусов, ход лучей при построении изображений, оптическая сила и радиусы кривизны поверхностей.

Двоуклювая линза (рис. 32, а) имеет

$$r_1 > 0; \quad r_2 < 0; \quad \Phi = (n-1) \left(\frac{1}{|r_1|} + \frac{1}{|r_2|} \right) - \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{|r_1 r_2|}.$$

Оптическая сила линзы больше нуля ($\Phi > 0$), линза собираательная, так как первое слагаемое формулы (3.83) всегда положительно (для линз, применяемых в геодезических приборах, оно больше второго слагаемого в 30—60 раз). Расчеты по формулам (3.86) и (3.87) показывают, что главные точки и плоскости находятся внутри линзы.

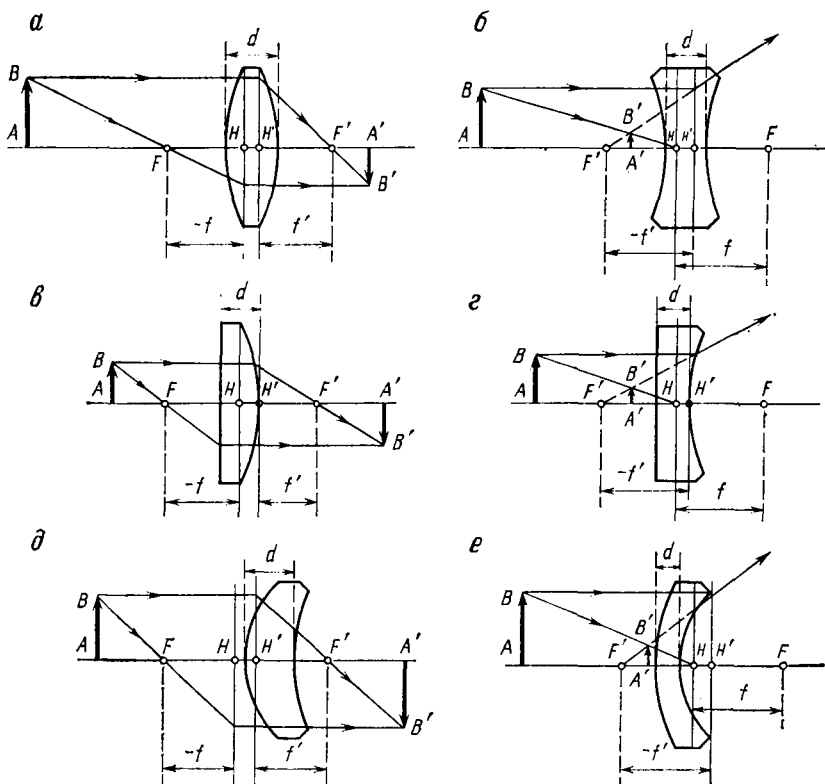


Рис. 32. Основные типы линз. Ход лучей, построение изображений

Двоуконвогнутая линза (рис. 32, б) имеет $r < 0$; $r_2 > 0$.

$$\Phi = -(n-1) \left(\frac{1}{|r_1|} + \frac{1}{|r_2|} \right) - \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{|r_1 r_2|} < 0.$$

Оптическая сила линзы всегда отрицательная — линза рассеивающая. Главные плоскости — внутри линзы.

Плоско-выпуклая линза (рис. 32, в) имеет $r_1 = \infty$, $r_2 < 0$; $\Phi = (n-1) \frac{1}{|r_2|}$; $s_{F'} = f'$; $s_F = \frac{r_2}{n-1} + \frac{d}{n}$; $s_{H'} = 0$;

$$s_H = \frac{d}{n}.$$

Плоскость H — внутри линзы, плоскость H' — касательная, $\Phi > 0$, линза собирающая.

Выпукло-плоская линза (на рис. не показана) имеет $r_1 > 0$; $r_2 = \infty$; $s_F = f$;

$$s_{F'} = \frac{r_1}{n-1} - \frac{d}{n}; \quad s_H = 0; \quad s_{H'} = -\frac{d}{n}; \quad \Phi = (n-1) \frac{1}{r_1} > 0;$$

линза — собирающая. Плоскость H' — касательная, плоскость H — внутри линзы.

Плоско-вогнутая линза (рис. 32, z) имеет $r_1 = \infty$; $r_2 > 0$; $s'_F = \frac{r_2}{n-1} + \frac{d}{n}$; $s_{H'} = 0$; $s_H = \frac{d}{n}$;

$\Phi = -(n-1) \frac{1}{|r_2|} < 0$; линза — рассеивающая. Плоскость H' — касательная, плоскость H — внутри линзы.

Вогнуто-плоская линза (на рис. не показана) имеет $r_1 < 0$; $r_2 = \infty$; $s_F = f$; $s'_F = \frac{r_1}{n-1} - \frac{d}{n}$; $s_{H'} = -\frac{d}{n}$;

$s_H = 0$; $\Phi = (n-1) \frac{1}{r_1} < 0$;

линза — рассеивающая. Плоскость H — касательная, плоскость H' — внутри линзы.

Положительный мениск (рис. 32, ∂) имеет $r_1 > 0$; $r_2 > 0$; $r_1 < r_2$;

$$\Phi = (n-1) \left(\frac{1}{|r_1|} - \frac{1}{|r_2|} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{|r_1 r_2|} > 0;$$

линза — собирающая; $s_H < 0$; $s_{H'} < 0$. Главные плоскости находятся перед линзой. При большой толщине линзы плоскость H' может оказаться впереди плоскости H .

Отрицательный мениск (рис. 32, e) имеет $r_1 > 0$; $r_2 > 0$; $r_1 > r_2$;

$$\Phi = -(n-1) \left(\frac{1}{|r_1|} - \frac{1}{|r_2|} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{|r_1 r_2|} < 0;$$

линза — рассеивающая; $s_H > 0$; $s_{H'} > 0$. Обе главные плоскости находятся за линзой (H — ближе к линзе). При большой толщине линзы плоскость H' может оказаться ближе к линзе, чем плоскость H .

§ 16. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ С ПЛОСКИМИ ПРЕЛОМЛЯЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

*Плоскопараллельная пластинка**. Рассматривая плоскость как частный случай сферической поверхности ($r = \infty$), из уравнения нулевого инварианта Аббе (3.10) для луча, преломленного одной плоскостью (рис. 33), имеем

$$1/s = n/s', \quad (3.89)$$

откуда расстояние до изображения получится

$$s' = sn \quad (3.89')$$

* Плоскопараллельная пластинка — оптическая деталь, ограниченная параллельными плоскостями.

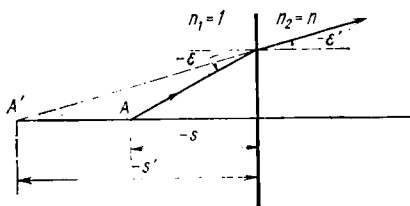


Рис. 33. Преломление луча плоско-стью

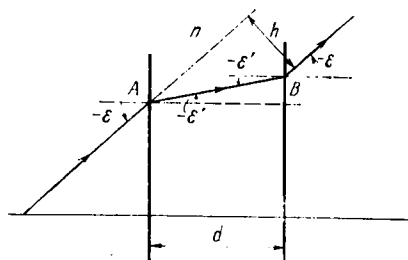


Рис. 34. Смещение луча плоскопараллельной пластинкой

или отношение расстояний до изображения и до предмета равно постоянной величине для данных двух сред

$$s'/s = n. \quad (3.89'')$$

Изображение A' точки A будет мнимое.

В геодезических приборах распространенным является случай преломления луча двумя плоскими поверхностями в виде плоскопараллельной пластинки.

Преломляясь в плоскопараллельной пластинке, луч смещается на величину h параллельно самому себе. Величина h определяется из чертежа (рис. 34)

$$h = AB \cdot \sin(\epsilon - \epsilon'), \quad (3.90)$$

где

$$AB = d / \cos \epsilon', \quad (3.91)$$

d — толщина плоскопараллельной пластинки.

С учетом (3.91) из уравнения (3.90) имеем

$$h = d \frac{\sin(\epsilon - \epsilon')}{\cos \epsilon'}. \quad (3.92)$$

Так как угол ϵ' неизвестен, то в выражении (3.92) освободимся от ϵ' , при этом учтем

$$\sin(\epsilon - \epsilon') = \sin \epsilon \cos \epsilon' - \cos \epsilon \sin \epsilon' \quad (3.93)$$

и

$$n \sin \epsilon' = \sin \epsilon \quad (3.94)$$

или

$$\sin \epsilon' = \sin \epsilon / n,$$

тогда

$$\cos \epsilon' = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \epsilon}{n^2}}. \quad (3.95)$$

Перепишем уравнение (3.92) с учетом (3.93), (3.94') и (3.95), получим строгую формулу смещения луча плоскопарал-

лельной пластинкой

$$h = d \operatorname{tge} \left(\cos \varepsilon - \frac{\cos^2 \varepsilon}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{n^2}}} \right). \quad (3.96)$$

Разложив в ряды $\sin \varepsilon$ и $\cos \varepsilon$ в формуле (3.96) с удержанием членов второго порядка малости, будем иметь

$$h = d \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\varepsilon}{\rho} \left\{ 1 + \frac{3(n+1) - n^2}{6n^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\rho^2} \right\}. \quad (3.97)$$

В большинстве случаев при расчетах можно воспользоваться приближенными формулами

$$h = d \frac{n-1}{n} \operatorname{tge} \varepsilon, \quad (3.98)$$

или

$$h = d \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\varepsilon}{\rho}. \quad (3.99)$$

Для сравнения результатов вычислений по строгим и приближенным формулам приведена табл. 1 смещений h , при $d=20$ мм и $n=1,5$ для разных углов падения.

Т а б л и ц а 1

ε	Смещение луча (мм) по формулам			ε	Смещение луча (мм) по формулам		
	(3.99)	(3.98)	(3.97) и (3.96)		(3.99)	(3.98)	(3.97) и (3.96)
5°	0,58	0,58	0,58	25°		3,12	3,13
10	1,16	1,17	1,17	30		3,85	3,88
15	1,74	1,78	1,79	35		4,66	4,69
20	2,33	2,42	2,43	40		5,55	5,59

При толщине пластинки из стекла, равной 20 мм, величину смещения можно вычислять до 0,01 мм по любой формуле, если угол падения не превышает 10°. При углах больше 25° h можно вычислять с указанной точностью только по точным формулам.

Смещение луча h , вычисленное по приближенной формуле (3.99), прямо пропорционально толщине пластинки и углу падения ε . Это свойство плоскопараллельных пластинок используется в оптических микрометрах при точных измерениях долей делений шкал. Толщины пластинок обычно составляют $1/6 \div 1/8$ от их диаметров.

В геодезических приборах плоскопараллельные пластинки применяются также в качестве шкал, лимбов, сеток, защитных стекол и светофильтров.

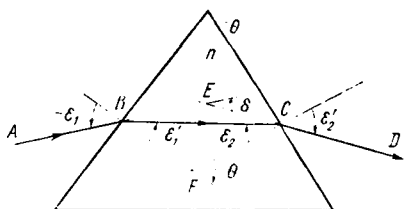


Рис. 35. Преломление луча призмой

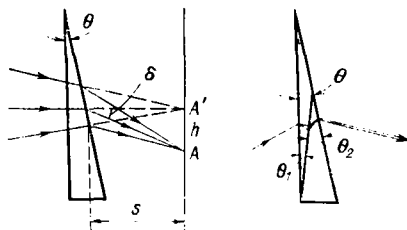


Рис. 36. Отклонение и смещение луча оптическим клином

Оптическая сила плоскопараллельных пластинок равна нулю ($\Phi=0$), значит они являются телескопическими системами, обладающими всеми свойствами телескопических систем.

Пучок параллельных лучей, падающий на плоскопараллельную пластинку, выйдет параллельным пучком. Увеличение плоскопараллельных пластинок постоянно и равно единице.

*Преломляющая призма**. *Оптический клин*. Луч $ABCD$ (рис. 35) проходит через призму с преломляющим углом θ и показателем преломления n под углом падения ($-\epsilon_1$). Требуется определить угол отклонения луча призмой δ . Углы δ и θ определяются как внешние углы треугольников BCE и BCF :

$$\delta = (\epsilon_1 - \epsilon_1') + (\epsilon_2' - \epsilon_2), \quad (3.100)$$

$$\theta = \epsilon_1' + \epsilon_2. \quad (3.101)$$

По закону преломления луча в точках B и C имеем

$$1 \sin \epsilon_1 = n \sin \epsilon_1', \quad (3.102)$$

$$1 \cdot \sin \epsilon_2 = n \sin \epsilon_2'. \quad (3.103)$$

Из решения четырех уравнений с неизвестными δ , ϵ_1' , ϵ_2 и ϵ_2' , учитывая величины второго порядка малости, получим

$$\delta = \theta(n-1) \left(1 + \frac{n-1}{2n} \frac{\epsilon_1'^2}{\rho^2} \right). \quad (3.104)$$

В геодезических приборах находят применение призмы с малыми преломляющими углами ($\theta < 6^\circ$), называемые оптическими клиньями [6] (рис. 36).

Как правило, в оптических системах с клиньями $\epsilon \leq 10^\circ$, поэтому уравнения (3.102) и (3.103) запишутся в виде

$$\epsilon_1 = n\epsilon_1',$$

$$\epsilon_2' = n\epsilon_2.$$

* Преломляющая призма — оптическая деталь с плоскими преломляющими поверхностями, расположенными под некоторыми углами друг к другу.

Сложим левые и правые части этих равенств, получим

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2' = n(\varepsilon_1' + \varepsilon_2). \quad (3.105)$$

Учитывая уравнение (3.101), перепишем равенство (3.105)

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2' = n\theta. \quad (3.106)$$

Подставим в уравнение (3.100) значения из уравнений (3.101) и (3.106), получим формулу отклонения луча оптическим клином

$$\delta = \theta(n-1). \quad (3.107)$$

Формулу оптического клина легко получить из формулы преломляющей призмы (3.104), если не учитывать величины второго порядка малости.

Оптическому клину присущи свойства гомоцентричности пучка и стигматичности изображения. Изображение точки A , рассматриваемой через оптический клин (см. рис. 3б), получится в точке A' , т. е. смещенным на величину

$$h = \frac{\delta}{\rho} s. \quad (3.108)$$

Оптические клинья применяются в оптических микрометрах геодезических приборов (при $s = \text{const}$) и в дальномерях двойного изображения (при $\delta = \text{const}$).

Дисперсия клина (например, для линий спектра F и C) равна

$$\Delta\delta = \delta_F - \delta_C = (n_F - 1)\theta - (n_C - 1)\theta$$

или

$$\Delta\delta = (n_F - n_C)\theta. \quad (3.109)$$

Пример: пусть $\theta = 6^\circ$, клин изготовлен из крона (К8), $n_D = 1,5163$. Средняя дисперсия $n_F - n_C = 0,00806$, $\delta = 3^\circ 06' 20''$. Дисперсия клина $\Delta\delta = 0^\circ 02' 14''$ является значительной величиной, которую нельзя не учитывать в геодезии.

Дисперсия клина устраняется изготовлением ахроматического клина, состоящего из двух стекол (флинт и крон), имеющих разные показатели преломления.

Пучок лучей, выходящий из склеенного клина, будет снова белым, о чем свидетельствует параллельность лучей на рис. 3б, вышедших из клина. Клинья склеиваются так, чтобы преломляющие углы θ_1 и θ_2 были противоположны, а преломляющие ребра — параллельны.

§ 17. ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Реальные оптические системы, имеющие конечные размеры, не могут дать совершенные изображения предметов, так как не все лучи, исходящие от предметов, участвуют в формировании

изображения. Переходя к реальным системам, необходимо изучить влияние ограничения пучков, от которого к тому же зависят такие свойства оптических систем, как освещенность, создаваемая системой на сетчатке глаза, структура выходящих пучков, т. е. аберрационные свойства, дифракционные свойства и глубина изображаемого пространства.

Различают ограничения пучков полевые и апертурные. При апертурных ограничениях уменьшается пучок лучей, выходящих из осевой точки предмета. Апертурные ограничения вызываются в пространстве предметов оправами линз или призм, блендами, специальными вещественными диафрагмами, центрированными на оси, или их изображениями в пространстве предметов.

Чтобы определить, какая из имеющихся в приборе диафрагм является апертурной, в пространстве предметов находят положение и величину изображений всех диафрагм, создаваемых предшествующими им частями системы.

Изображение (или сама диафрагма), которое видно под наименьшим углом из точки A предмета, лежащей на оптической оси, является входным зрачком, сама материальная диафрагма — апертурной диафрагмой; наименьший угол в точке A , под которым виден входной зрачок, — апертурным углом; изображение входного зрачка всей системой — выходным зрачком.

На рис. 37, *a* наименьший передний апертурный угол (2σ) при точке A ограничен входным зрачком MN , совпадающим с вещественной диафрагмой. Вещественная диафрагма MN действующая или апертурная. Выходной зрачок — тоже MN , а угол $2\sigma'$ — задний апертурный угол.

На рис. 37, *б*: входной зрачок $B'C'$, выходной — BC , 2σ — передний, $2\sigma'$ — задний апертурные углы. Вещественная диафрагма BC — действующая или апертурная диафрагма. Точка K — центр диафрагмы на оптической оси системы.

Таким образом, диафрагма, которая больше других ограничивает угол раствора пучка лучей, идущего из точки объекта на оптической оси, есть апертурная диафрагма.

Диафрагма, которая больше других диафрагм ограничивает поперечные размеры изображаемых объектов, — полевая диафрагма, определяющая угол поля системы. Изображение полевой диафрагмы впереди расположенной частью системы — входное окно, сзади расположенной частью системы — выходное окно. Телесный угол, под которым видна полевая диафрагма из центра входного зрачка, называется углом поля системы. Другими словами, угол поля — это пространство предметов, которое можно видеть в систему при неподвижном ее положении.

В геометрической оптике доказывалось, что в телескопических системах (в зрительных трубах) для получения равномерно освещенного и достаточно яркого изображения предмета полевую диафрагму целесообразно располагать в плоскости изображения объекта, совпадающей при наведении на бесконеч-

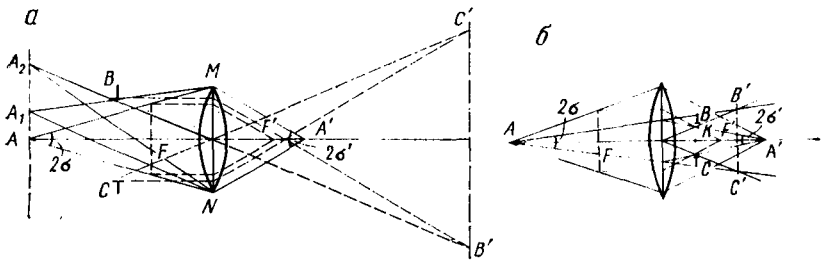


Рис. 37. Диафрагмы в оптических системах

ность с передней фокальной плоскостью окуляра. Такая полевая диафрагма является диафрагмой сетки нитей. Ее размеры определяются потребной величиной и качеством изображения, на которые существенно влияет затемнение пучков лучей — виньетирование.

Под геометрическим виньетированием понимается явление срезания диафрагмой наклонных пучков, исходящих из точек предмета, не лежащих на оптической оси. Если на рис. 37, а перемещать точку A по перпендикуляру к оптической оси, например, в положения точек A_1 и A_2 , то диафрагма BC (входное окно) будет вызывать срезание пучка лучей — геометрическое виньетирование, т. е. затемнение изображения по мере его удаления от оптической оси (от точки A'). В плоскости изображений будет наблюдаться следующая картина (рис. 38): в площади кружка с радиусом от $A'A_1'$ до $A'A_2'$ изображение будет наполовину затемнено, так как половина пучка лучей, входящего в отверстие MN , оказалась срезанной верхним краем виньетирующей диафрагмы BC (см. рис. 37, а).

Глаз человека мало чувствителен к падению освещенности на краях поля зрения прибора, и виньетирование до 50 % глаз практически не ощущает. Поэтому в ряде приборов применяются широкоугольные объективы, допускающие срезание пучков до 70 %.

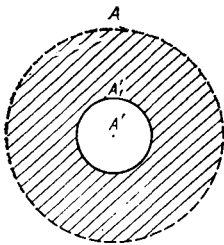


Рис. 38. Геометрическое виньетирование

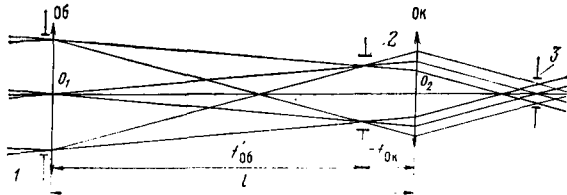


Рис. 39. Ограничение пучков лучей в трубе Кеплера

Если полевая диафрагма установлена в плоскости изображений, то входное окно практически совпадает с плоскостью объектива. В этом случае все точки предмета (в пределах угла поля) изображаются без виньетирования.

На рис. 39 показано ограничение пучков лучей в зрительной трубе Кеплера. Апертурной диафрагмой 1 является оправа объектива, полевая диафрагма 2 расположена в плоскости сетки, выходной зрачок 3 — за окуляром.

§ 18. НЕДОСТАТКИ (АБЕРРАЦИИ) ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотренные основные формулы и свойства оптических систем в полной мере соответствуют лишь узкой (параксиальной) области пучков лучей. При этом считалось, что падающий свет монохроматический, а показатель преломления материала не зависит от длины световой волны.

В реальных системах все эти условия нарушаются. Узкий пучок дает недостаточную освещенность изображения и подвержен явлению дифракции, белый луч, преломляясь, подвержен дисперсии. В реальных оптических приборах применяются системы с относительно большими отверстиями, что приводит к нарушению гомоцентричности пучков лучей в пространстве изображений; изображения получаются с нарушением подобия предмету и недостаточно резкими, т. е. появляются принципиально неустранимые недостатки или аберрации оптических систем.

Теория аберраций достаточно сложна, и ее рассмотрение не входит в программу данного курса. В курсе геодезического инструментоведения изучается физическая сущность аберраций, некоторые соотношения и меры по уменьшению их влияния в визуальных оптических системах.

Для визуальных систем наиболее опасными являются осевые аберрации, искажающие изображение точек на оптической оси. Такими аберрациями являются сферическая и хроматическая аберрации.

Сферическая аберрация. Лучи, идущие из точки A , расположенной на оптической оси, падают широким пучком на сферическую преломляющую поверхность. Удаленные от оптической оси лучи имеют свойство преломляться сильнее, чем лучи, идущие под малыми углами к оси, в результате в пространстве изображений лучи преломленные не соберутся в одной точке. Такое свойство линз нарушать стигматичность изображения называется сферической аберрацией линз. На рис. 40 вместо одной точки A_0' имеет место в пространстве изображений бесконечное множество таких точек (от A_0' до A_i'). На экране, установленном в точке A_0' (перпендикулярно к оптической оси), получается размытое пятно радиусом ρ_c .

Подобное явление будет иметь место, если на линзу будет падать пучок лучей, параллельных оптической оси. Тогда

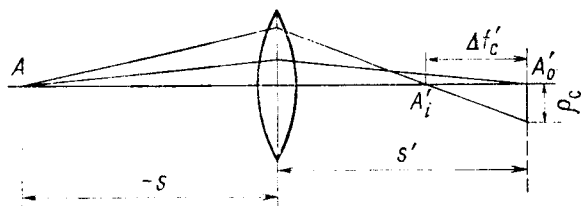


Рис. 40. Сферическая aberrация линзы

параксиальные лучи соберутся в точке F' , в заднем фокусе линзы, а крайние лучи — в точке F'_i , расположенной ближе к линзе на $\Delta f'_c = f'_i - f'$. Величина $\Delta f'_c$ называется продольной сферической aberrацией, а величина ρ_c — поперечной сферической aberrацией.

В первом приближении для линзы сферическая aberrация может быть вычислена по формулам:

продольная

$$\Delta f'_c = Kh^2/f', \quad (3.110)$$

поперечная

$$\rho_c = Kh^3/f'^2, \quad (3.111)$$

где h — радиус свободного отверстия, f' — фокусное расстояние, K — коэффициент, зависящий от показателя преломления стекла и радиусов кривизны сферических поверхностей.

Для собирающих линз продольная сферическая aberrация отрицательная, для рассеивающих — положительная. Формулы (3.110) и (3.111) свидетельствуют о том, что и продольная, и поперечная сферические aberrации возрастают с увеличением входного отверстия и с уменьшением f' или радиусов кривизны поверхностей линз.

Уменьшают влияние сферической aberrации применением диафрагм (уменьшение входного отверстия в 2-раза уменьшает сферическую поперечную aberrацию в 8 раз). Применяются комбинации положительных и отрицательных линз, тем самым добиваются систем, дающих малые сферические aberrации.

В теории aberrаций также доказывается, что наименьшая сферическая aberrация будет у положительной двояковыпуклой линзы с разными радиусами кривизны сферических поверхностей ($|r_1| = 6|r_2|$, причем более выпуклая сторона должна быть обращена к входящему параллельному пучку лучей (подобно хрусталику глаза). Такая линза называется стеклом наилучшего вида (рис. 41).

Более эффективно применение сложного стекла. При равных входных отверстиях сложное стекло дает меньшую сферическую aberrацию, так как составляющие его линзы могут иметь большие фокусные расстояния.

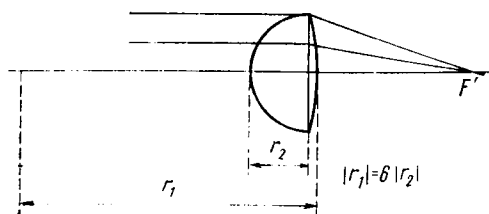
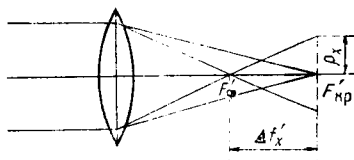


Рис. 41. Системы с ослабленной сферической aberrацией. Стекло наилучшего вида

Рис. 42. Хроматическая aberrация линзы



Хроматическая aberrация. Пока лучи идут в однородной среде, совокупность их производит на глаз впечатление белого цвета. При переходе из одной оптически прозрачной среды в другую, имеющую другой показатель преломления, лучи света не только преломляются, но и дают спектр. Например, обыкновенная линза имеет большую оптическую силу (меньшее фокусное расстояние) для синих лучей, чем для красных, т. е. в силу указанного свойства сложный белый свет дает размытое и окрашенное по краям изображение. Такое явление называется хроматической aberrацией. Различают хроматическую aberrацию положения и увеличения (продольную и поперечную). На рис. 42 лучу, параллельному оси, после преломления соответствует два фокуса $F'_{\text{ф}}$ и $F'_{\text{кр}}$ для фиолетовых и красных лучей. На экране, установленном перпендикулярно к оптической оси, в любой из точек на отрезке $F'_{\text{ф}}F'_{\text{кр}}$ вместо точки увидим размытый цветной кружок. Если экран установлен в точке $F'_{\text{ф}}$, то в центре будет фиолетовое пятно, окаймленное красной цветной полосой; в точке $F'_{\text{кр}}$ — красное пятно с лиловой каймой.

Наличие хроматической aberrации сопровождается не только окрашиванием изображения, но и снижением его контрастности. Как правило, хроматическая aberrация линз больше, чем сферическая.

Хроматическую aberrацию положения можно выразить следующей зависимостью:

$$f'_{\text{ф}} - f'_{\text{кр}} = - \frac{n_{\text{ф}} - n_{\text{кр}}}{n_{\text{ж}} - 1} f' = \Delta f'_{\text{x}}, \quad (3.112)$$

где

$$\frac{n_{\text{ф}} - n_{\text{кр}}}{n_{\text{ж}} - 1} = \frac{1}{\nu} = \frac{n_{\text{F}} - n_{\text{C}}}{n_{\text{e}} - 1}, \quad 1/\nu = N, \quad (3.113)$$

N — мера разложения света на цвета или показатель относительной дисперсии света, ν — коэффициент дисперсии света,

f' — фокусное расстояние лучей (e), можно приближенно принять $f'_e = \sqrt{f'_F \cdot f'_C}$.

С учетом (3.113) хроматическая aberrация положения запишется приближенно, так,

$$\Delta f'_x = -Nf'. \quad (3.114)$$

Значит, в длиннофокусных линзах больше хроматизм положения.

Величины изображений, полученные лучами разных цветов, также не будут одинаковы: для красных лучей (C), имеющих большую длину световой волны, чем фиолетовые (F), величина изображения будет преувеличена, для фиолетовых — преуменьшена. Следовательно, линейное поперечное увеличение не будет одинаковым:

$$\beta_C > \beta > \beta_F, \quad (3.115)$$

так как

$$y'_C > y' > y'_F. \quad (3.116)$$

Такое искажение возникает как следствие хроматической поперечной aberrации или хроматической aberrации увеличения.

Хроматическая aberrация увеличения может приближенно характеризоваться выражением

$$\rho_x = Nh, \quad (3.117)$$

где h — радиус свободного отверстия линзы.

Отметим, что хроматическая aberrация увеличения (3.117) не зависит от f и r , т. е. от положения предмета на оптической оси.

Приведенные уравнения (3.114) и (3.117) свидетельствуют о том, что $\Delta f'_x$ и ρ_x уменьшаются, соответственно, при малых f и h и обе уменьшаются при уменьшении N , т. е. при правильном подборе сортов и марок стекла. Это достигается применением сложных линз — стекол из крона и флинта, составляющие компоненты которых имеют различные N и f , связанные условием ахроматизма

$$-f_1/f_2 = N_1/N_2. \quad (3.118)$$

Из уравнения (3.118) следует, что фокусные расстояния линз-компонентов должны быть прямо пропорциональны показателям относительных дисперсий этих линз. Знак (—) указывает на то, что линзы должны быть противоположны (одна собирающая, другая рассеивающая). Например, если линза из крона ($N_K=0,04$) и линза из флинта ($N_{фл}=0,06$), то фокусные расстояния (кривизна) линз должны быть также подобраны в отношении $f_{фл}/f_K=1,5$. Такая система линз называется ахрома-

тической (ахромат). На рис. 43 показан пример графически, когда две линзы (1 — крон, 2 — флинт) подобраны в соответствии с уравнением (3.118). В результате луч, выходящий из этой сложной системы, снова будет белым*.

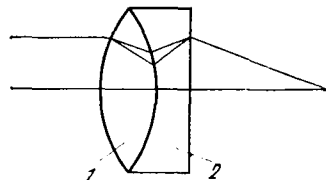


Рис. 43. Система с ослабленной хроматической аберрацией

Системы, позволяющие более полно устранить хроматическую аберрацию (устранить так называемый вторичный спектр), называют апохроматами (зрительные трубы в теодолите Т2, кипрегеле КН и др.), а далее могут быть сверхапохроматами. Но следует иметь в виду, что такие сложные оптические системы трудоемки по технологии их изготовления, сборки и особенно юстировки, а следовательно, имеют высокую стоимость.

Существенной особенностью хроматической аберрации является ее наличие даже для параксиального пучка лучей, поэтому узкий пучок лучей, направленный вдоль оптической оси, при прохождении через линзу дает целую совокупность фокусов на отрезке $F'_ф - F'_кр$ (см. рис. 42).

Другие аберрации вносят искажения изображений по всему полю зрения оптической системы.

Меридиональная кома. Оптическая система, хорошо исправленная в отношении сферической аберрации, будет давать достаточно четкие изображения точек, расположенных на оптической оси.

Если лучи направлены широким пучком в меридиональной плоскости из точки, не лежащей на оптической оси, под углом $(-\sigma)$ (например, из бесконечности), то даже при малом угле $(-\sigma)$ в этом пучке произойдут нарушения симметрии преломления в отношении центрального луча. Изображением на экране будет пятно неправильной формы, в виде запятой. Такая аберрация называется меридиональной комой. Для ослабления искажений за меридиональную кому в оптической системе при ее расчете должно быть соблюдено условие синусов

$$n \sin \sigma / n' \sin \sigma' = y' / y = \beta. \quad (3.119)$$

Оптические системы, исправленные от сферической аберрации и комы, называются апланатическими.

Астигматизм и кривизна поля. Узкие пучки лучей, идущие от точек, расположенных вне оптической оси, как правило, после преломления дают астигматические изображения, так как лучи проходят в разных условиях в отношении преломляющей сферической поверхности оптической системы. Астигматизм

* Впервые на возможность построения ахроматической системы указал и сделал расчеты Эйлер в середине XVIII в.

вызывает овальные пятна рассеяния изображения точки. Например, если светящаяся точка лежит выше оптической оси в меридиональной плоскости, то верхние лучи, которые ближе к оптической системе, преломляются сильнее, чем боковые лучи, и т. п.

Астигматизм исправляется подбором радиусов кривизны преломляющих поверхностей, их фокусных расстояний и толщин. Устранение астигматизма оказывается недостаточным, чтобы получить четкое изображение. Возникают так называемые искривления изображений — кривизна поля. Кривизна поля будет тем больше, чем дальше отстоит изображение от оптической оси. Такая нерезкость изображения при расчетах корректируется вместе с астигматизмом подбором элементов линз.

Оптические системы, свободные от астигматизма и кривизны поля, называются анастигматами.

Дисторсия. Нарушение геометрического подобия между изображением и предметом, расположенными в сопряженных плоскостях, перпендикулярных к оптической оси, называется дисторсией. Причиной появления дисторсии является непостоянство поперечного увеличения β по полю зрения, зависящее от углов σ пучков. Изображение квадрата, например, оказывается или в виде подушечки, или в виде бочкообразного четырехугольника.

Дисторсия определяется в процентах по формуле

$$\Delta y' = \frac{y' - y_0'}{y'} 100, \quad (3.120)$$

где y' и y_0' — величины изображений предмета, соответственно, на краю и в центре поля зрения системы. Например, для аэрофотообъективов требуется $\Delta y' \leq 0,01\%$, при фактических величинах $0,025\%$. Уменьшения дисторсии добиваются установкой диафрагм между составляющими компонентами объективов, а также применением асферических поверхностей.

Асферические поверхности являются трудоемкими в изготовлении и дорогостоящими, поэтому применяются лишь в особо точных и нужных приборах.

Системы, свободные от дисторсии, называются ортоскопическими.

Исключить все аберрации в оптической системе означало бы выполнить сложнейшие и громоздкие расчеты и еще более сложные технологические работы, чтобы изготовить, собрать и отъюстировать такую уникальную дорогостоящую систему.

Советскими учеными Н. М. Кисловым, А. И. Тудоровским, М. М. Русиновым, Г. Г. Слюсаревым, Д. С. Волосовым, Д. Ю. Гальперном, Д. Д. Максutowым, Т. В. Фефиловым, И. А. Турыгиным, В. Н. Чуриловским, Л. С. Урмахером и другими разработаны теория, методы расчета сложнейших оптических систем и достигнуты результаты, в ряде случаев превосходящие результаты старейших зарубежных фирм.

«Полного исправления всех aberrаций достигнуть невозможно даже в сколь угодно сложной оптической системе» [6, стр. 351].

В реальных оптических системах допускаются aberrации, если они не противоречат назначению системы и условиям ее применения, т. е. удовлетворяется разрешающая сила, согласованная с приемником (в геодезических, визуальных приборах чаще всего с глазом).

Для визуальных оптических систем желательно прежде всего уменьшить сферическую и хроматическую aberrации, искажающие изображение на главной оптической оси. На выходе (за окуляром), например, зрительных труб названные aberrации не должны превышать $1-2'$, как и aberrации глаза.

Искажения изображений к краям поля зрения в визуальных приборах всегда больше, чем искажения на оптической оси, так как вносят их и все другие aberrации (кома, астигматизм, дисторсия и кривизна поля). Известно, например, что точность отсчитывания по рейке по дальномерным нитям ниже, чем точность отсчитывания по средней нити в центре поля зрения. Поэтому в современных геодезических приборах штрихи сеток нитей к краям поля зрения не наносятся, чтобы оградить наблюдателя от грубых ошибок.

Значительная дисторсия окуляров визуальных приборов, достигающая до 10 %, не опасна, так как наблюдаемые через окуляр изображения, построенные объективом, и сетка нитей искажаются в одинаковой степени.

Таким образом, стремление улучшить оптическую визуальную систему целесообразно до тех пор, пока ошибки aberrаций превышают соответствующие ошибки глаза и ошибки внешней среды для нормальных условий атмосферы.

§ 19. ПОТЕРИ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

При прохождении через оптическую систему имеют место потери света за счет отражения света при преломлении и поглощения энергии массой стекла.

Коэффициент отражения света при преломлении определяется при угле падения $\epsilon=0$ по формуле

$$\rho = (n' - n)^2 / (n' + n)^2. \quad (3.121)$$

Для оптического стекла он изменяется от 0,058 (ЛК-3) до 0,083 (ТФ-10). Например, при $n=1$ и $n'=1,6290$ (Ф-104) $\rho=0,057$ или 5,7 %. Для лучей, падающих не ортогонально к поверхности прозрачной оптической системы, коэффициент отражения увеличивается с увеличением угла ϵ [31, с. 38]:

$\epsilon, ^\circ$	0	30	45	60	70	80	85	90
$\rho, \%$	5,7	5,9	6,8	10,9	19,2	40,8	62,3	100

Если в системе имеется k — число поверхностей кроны и ϕ — число поверхностей флинта, то, зная средние коэффициенты

отражения этих поверхностей, можно вычислить потери света по формуле

$$\Pi = \rho_{\text{фл}}^{\Phi} \cdot \rho_{\text{кр}}^{\text{к}} \quad (3.122)$$

или определить коэффициенты светопропускания системы с учетом потерь на отражение

$$\tau_{\rho} = (1 - \rho_{\text{фл}})^{\Phi} \cdot (1 - \rho_{\text{кр}})^{\text{к}} = F_{\rho} / F. \quad (3.123)$$

Коэффициентом светопропускания оптической системы с учетом потерь на отражение при преломлении считается отношение светового потока, выходящего из системы (F_{ρ}), к потоку, входящему в нее (F).

В более общем виде формулу (3.123) можно записать так:

$$\tau_{\rho} = (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) \dots (1 - \rho_w), \quad (3.123')$$

где $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_w$ — коэффициенты отражения при преломлении на каждой поверхности.

Уменьшение коэффициента отражения в 3—5 раз достигается просветлением оптики* при соблюдении двух условий:

$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3} \quad (3.124)$$

и

$$d = K\lambda/4, \quad (3.125)$$

где n_1, n_2, n_3 — показатели преломления, соответственно, среды, пленки и материала, из которого изготовлена деталь, d — толщина пленки, K — целое нечетное число, λ — длина световой волны.

Для зеркальных поверхностей коэффициент отражения определяется опытным путем; в зависимости от материала покрытия и длины световой волны он может быть равен величинам, указанным в табл. 2.

Таблица 2

Материал покрытия	Коэффициент отражения ρ , % при λ , мкм					
	0,42	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
Серебро	89	93	96	96	97	97
Алюминий	85	88	93	93	97	98
Золото	29,3	33,1	47	74	84,4	88,9
Платина	51,8	54,7	58,4	61,1	64,2	66,5
Хром	41	44	45	46	47	48

* Метод нанесения интерференционных пленок на поверхность оптических деталей разработан впервые в СССР под руководством академика И. В. Гребенщикова.

Увеличение коэффициента отражения зеркальных поверхностей достигается нанесением многослойных покрытий, каждый толщиной $\lambda/4$ и со своим показателем преломления. Десятислойными покрытиями из особых материалов можно добиться $\rho = 0,997$.

Потери света за счет поглощения энергии толщиной стекла в оптической системе характеризуются коэффициентом поглощения, равным

$$\alpha = 1 - \theta^l, \quad (3.126)$$

где θ — коэффициент прозрачности, l — длина пути светового потока в стекле, выраженная в см.

В современных сортах оптического стекла непрозрачные частицы вызывают потерю света 1 % на 1 см хода луча, следовательно, $\theta = 0,99$, откуда

$$\alpha = 1 - 0,99^l. \quad (3.126')$$

Формула общего коэффициента светопропускания оптической системы, характеризующего потери света при отражении и поглощении с учетом зеркал и светоделительных покрытий, запишется в виде

$$\tau = (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) \dots (1 - \rho_w)(1 - \alpha_1)^l \dots (1 - \alpha_m)^{lm} \times \\ \times R_1 \dots R_s T_1 \dots T_t, \quad (3.127)$$

где ρ — коэффициент отражения; α — коэффициент поглощения; w — число поверхностей, граничащих с воздухом, кроме зеркал; l — длина хода осевого луча в оптических деталях (см); m — число деталей в системе, кроме зеркал; R — коэффициент отражения зеркал; s — число отражательных зеркальных поверхностей; T — коэффициент пропускания светоделительных покрытий, дается в нормативной и справочной литературе; t — число поверхностей со светоделительными покрытиями.

Кроме общего коэффициента светопропускания, оптические системы характеризуются коэффициентом светорассеяния — отношением освещенности изображения черного предмета на ярком фоне к освещенности изображения яркого фона.

Светорасеяние есть вредное воздействие отраженных при преломлении или рассеянных толщей стекла пучков лучей на изображение. Рассеяние света вызывает блики и снижает контрастность изображения.

В современных геодезических приборах коэффициент светорассеяния допускается от 5 до 10 %. Коэффициент светопропускания, как правило, не должен быть менее 60 %. Исключением являются зрительные трубы нивелиров с компенсаторами, трубы номограммных приборов и трубы с прямым изображением, где светопропускание допускается до 45—40 %.

§ 20. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В основе оценки качества изображения оптической системы лежит критерий качества изображения точки. В идеальных системах геометрической оптики точка изображается однозначно — точкой. В реальных системах точка никогда не изображается точкой, этому препятствуют аберрации и волновая природа света. Из-за дифракции изображение светящейся точки через идеальную систему получается в виде светлого пятна, окруженного чередованием светлых и темных концентрических колец. Энергия в дифракционном изображении точки распределяется следующим образом: центральное пятно — 83,8 %, первое светлое кольцо — 7,2 %, второе — 2,8 %, третье — 1,4 %, четвертое — 0,9 %, все остальные — 3,9 %. При наблюдении дифракционного изображения точки через идеальную систему хорошо видны, кроме светлого пятна, еще два-три светлых кольца. Радиус первого темного кольца, которое ограничивает светлое пятно, называемое кружком Эри, определяется из волновой теории света [13] по формуле

$$r = \frac{1,22\lambda}{D} f', \quad (3.128)$$

где D — диаметр входного зрачка, f' — фокусное расстояние системы (объектива), λ — длина световой волны.

Например, для объектива $D=40$ мм, $f'=250$ мм и $\lambda=0,56$ мкм точка изобразится в фокальной плоскости кружком радиуса $r=4,3 \cdot 10^{-3}$ мм = 4,3 мкм — это пятно, а не точка.

Таким образом, из-за волновой природы света даже идеальная оптическая система не даст точного воспроизведения предмета в его деталях.

Известно также, что раздельное наблюдение двух близлежащих точек глазом или другой системой возможно только под углом не менее критерия Рэлея

$$\sin \varphi = \sin \psi = 1,22\lambda/D, \quad (3.129)$$

где $\sin \varphi$ — угловой радиус, $\sin \psi$ — угловое расстояние.

Так как точки расположены близко, то

$$\psi'' = \rho'' 1,22\lambda/D = 140''/D. \quad (3.130)$$

Угол ψ определяет разрешающую способность идеальной системы. В качестве разрешающей силы оптической системы (линзы, объектива) принимается значение, обратное ψ :

$$1/\psi'' = A = D/1,22\lambda\rho''. \quad (3.131)$$

Выражение (3.131) показывает, что разрешающая сила объектива (системы) прямо пропорциональна диаметру объектива и обратно пропорциональна длине световой волны. Вот почему

визуальные оптические приборы изготавливаются со значительными диаметрами объектива.

Разрешающая способность зрительных труб геодезических приборов называется пределом разрешения и определяется по формуле

$$\Pi_p = K120/D_{вх}, \quad (3.132)$$

где $D_{вх}$ — диаметр входного отверстия системы, K — коэффициент, равный 1,2 — для труб, не имеющих дополнительных обочивающих систем, и 1,4 — для зрительных труб прямого изображения.

Принимая в формуле (3.132) $K=1,2$, $D_{вх}=D$, получим формулу (3.130).

Таким образом, предел разрешения объектива определяет предел разрешения или разрешающую способность всей системы.

Практически разрешающая способность реальных оптических систем геодезических приборов определяется в соответствии с ГОСТ 15114—78.

Определение производится по штриховой mire абсолютного контраста. Mира состоит из 25 элементов. Каждый элемент содержит четыре группы параллельных штрихов, равных по ширине и длине и расположенных друг к другу под углом 45° (рис. 44). Промежутки между штрихами равны ширине штрихов.

Ширина штрихов P мires должна убывать от элемента к элементу по закону геометрической прогрессии со знаменателем

$$1/\sqrt[12]{2} = 0,94.$$

Число штрихов на 1 мм для любого номера элемента равно

$$N_i = 1000/2P,$$

где i — номер элемента (от 1 до 25), P — ширина штриха, мкм.

В соответствии с ГОСТ 15114—78 изготавливаются 6 номеров мires. У мires № 1 ширина штриха P первого элемента равна 10 мкм, а двадцать пятого — 2,5 мкм. У мires № 2 ширина штрихов первого и последнего элементов в два раза больше, т. е. 20 и 5 мкм, мires № 3 — 40 и 10 мкм, № 4 — 80 и 20 мкм, № 5 — 160 и 40 мкм и № 6 — 320 и 80 мкм.

Угловое расстояние φ между серединами соседних темных (или светлых) штрихов каждого элемента мires в угловых секундах следует вычислять по формуле, определяющей разрешающую способность испытываемой системы,

$$\varphi'' = \rho'' 2P/f'_k, \quad (3.133)$$

где P — ширина штриха, мм, f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора, мм.

Определение предела разрешения производится в центре поля зрения.

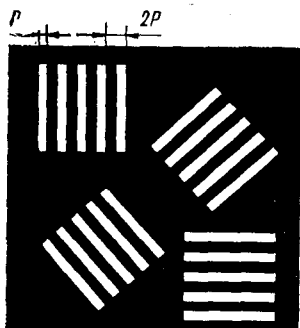


Рис. 44. Мира

Рассматривая последовательно изображения отдельных элементов мира с различной частотой штрихов, находят элемент, в котором еще можно различать направления штрихов всех четырех групп. По номеру (от 1 до 25) этого элемента мира в таблице или по формуле находят ширину P штриха и угол φ , определяющий предел разрешения системы.

Прежде чем определять предел разрешения, необходимо убедиться в том, что $f_k \geq 5f'$, $D_k > D$, отсутствует прямая засветка поля зрения системы, вибрации, изменение температуры, загрязнения оптических систем, отчетливо установлена

сетка нитей испытуемой системы и мира находится в фокальной плоскости объектива коллиматора, испытуемая система сфокусирована на изображение мира и установлена соосно с коллиматором.

Недостатки изложенного метода определения разрешающей способности оптических систем заключаются в субъективности отыскания разрешаемого элемента мира и в отсутствии возможности для оценки дифракционного изображения, даваемого реальной системой.

В настоящее время разработан, но еще не получил должного распространения объективный метод оценки качества изображений оптических систем по частотно-контрастным характеристикам (ЧКХ).

Качество дифракционной картины, качество сборки и центрирования оптических систем и степень уменьшения аберраций в системе устанавливаются по светящейся точке. По виду, характеру и степени искажения дифракционного изображения светящейся точки опытный наблюдатель может сделать необходимое заключение о качестве изображения, даваемого системой в целом. Такого рода оценка также не содержит достаточной информации и не свободна от субъективности.

Известен интерференционный метод оценки волновых аберраций оптических систем, но он весьма трудоемок и практически невыполним в производственных условиях.

В целом вопрос качества изображений оптических систем и критериев его оценки является одним из самых сложных вопросов оптики, который еще не имеет однозначного решения.

В настоящее время принято термин «качество изображения» делить на два понятия:

1) способность оптической системы отдельно передавать одно изображение от другого — разрешающая способность или предел разрешения системы;

2) способность оптической системы правильно изображать

контраст предмета и правильно строить дифракционное изображение.

Оптическая система, обладающая такими способностями, обеспечивает высокое качество изображения.

§ 21. ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Изучение аберраций оптических визуальных систем показывает, что даже сложное стекло, дающее казалось бы вполне правильное изображение, не может удовлетворить практическим требованиям. Можно утверждать, что в обозримом будущем достижения в оптике не позволят иметь идеальное изображение, так как световые лучи еще до вступления в оптическую систему проходят неоднородные и турбулентные слои атмосферы и самый глаз человека не совершенен. Поэтому стремиться создать идеальную оптическую визуальную систему полезно до тех пор, пока недостатки стекол при спокойном состоянии атмосферы не станут меньше несовершенств человеческого глаза.

Классическая работа по изучению глаза принадлежит Гельмгольцу (XIX в.).

На рис. 45 показано устройство глаза (роговица 1, склеротина 4, радужная оболочка 2, сетчатка 5, сосудистая оболочка 6, желтое пятно 7, зрительный нерв 8, передняя камера 10, задняя камера 9 и хрусталик 3).

Как оптический прибор глаз включает оптическую систему, изображающую наблюдаемые предметы на сетчатке, и приемное устройство — сетчатку, перерабатывающую световые сигналы в электрические импульсы, передающиеся с помощью нервной системы в мозг, где происходят самые загадочные преобразования электрических импульсов в зрительные ощущения.

Оптическая система глаза является сложной системой, обладающей способностью изменять свои оптические свойства. Она состоит из передней камеры с водянистой влагой ($n \approx n_{\text{воды}} = 1,33$), входного зрачка, образованного радужной оболочкой, зрачок является действующей диафрагмой переменного диаметра (от 2 мм при ярком свете до 8—9 мм в сумерках*) хрусталика (студенистое упругое тельце, удерживаемое мышцами). Толщина хрусталика — 3,8 мм, показатель преломления — 1,4. За хрусталиком находится задняя камера со стекловидной влагой, имеющей показатель преломления $\sim 1,33$. Последней составляющей оптической системы является его приемник света — сетчатка (сложная многослойная оболочка) с ямкой глубиной 0,4 мм на желтом пятне $\varnothing 1,02$ мм. Желтое пятно с ямкой является участком наилучшей видимости, оно заполнено в основном колбочками длиной 0,035 мм с внутренними

* Глаз обладает свойством адаптации — приспособления к силе света. У орла зрачок может обращаться в точку, поэтому орел видит солнце, кошка видит в темноте, настолько расширяется ее зрачок.

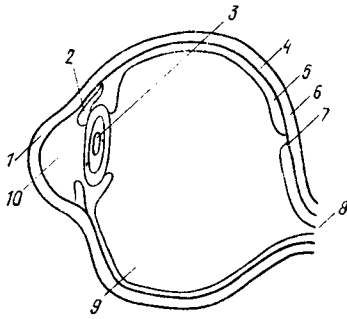


Рис. 45. Глаз

члениками по 0,0065 мм. Боковые части сосудистой оболочки (ретины) состоят из палочек длиной 0,06 мм с члениками 0,002 мм. Считается, что колбочки более светочувствительны, а палочки — более светочувствительны.

Оптическая ось глаза соединяет центр хрусталика с точкой сетчатки — ретины, расположенной в 1,5—2 мм выше желтого пятна, т. е. оптическая ось образуется со зрительной осью угол $\sim 5^\circ$.

Угол наилучшего зрения, опирающийся на желтое пятно, составляет около 3° (диаметр глаза ~ 23 мм). Общий угол зрения глаза определяется пространством, наблюдаемым неподвижным глазом. Он равен: книзу 70° , кверху 55° , к носу 60° , к виску 90° , т. е. 125° по вертикали и 150° по горизонтали. Движение глаз позволяет увеличить угловую величину просматриваемого пространства еще на $45\text{—}50^\circ$ во все стороны. Чем дальше от желтого пятна, тем реже располагаются колбочки и палочки на сетчатке, поэтому боковые предметы глаз видит неясно, а в том месте, где находится глазной нерв (2,5 мм к переносице), светочувствительных элементов вообще нет. Слепое пятно имеет диаметр 1,52 мм, что составляет угол около $4,5^\circ$.

Лучи, попадая в глаз, преломляются на границах названных прозрачных сред и дают на сетчатке действительное обратное (обычно уменьшенное) изображение.

Глаз обладает удивительным свойством аккомодации (приспособления к расстояниям). Это достигается изменением кривизны поверхности хрусталика с помощью особой мышцы. Для нормального глаза взрослого человека глубина аккомодации достигает от 2 до 7 диоптрий.

Наиболее отчетливое изображение на сетчатке глаза получается в том случае, когда рассматриваемый предмет отстоит от глаза на расстоянии, при котором хрусталик имеет свой естественный вид. Это расстояние называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза оно равно 25 см.

Точка, видимая при наибольшем напряжении хрусталика, называется ближней точкой. Наиболее удаленная точка, видимая при свободном от напряжения хрусталике, называется дальней точкой. Если дальняя точка находится в бесконечности, то глаз называется нормальным. Если она находится на конечном расстоянии, глаз называется близоруким. Когда в глаз поступает расходящийся пучок лучей, то глаз называется дальнезорким.

Недостаток близорукого глаза исправляется установкой пе-

ред глазом отрицательной линзы, а дальнозоркого — положительной.

Хрусталик по своему слоистому строению напоминает линзу, что позволяет ему преломлять лучи сильнее, чем это делает однородная линза с большим показателем преломления. По той же причине параксиальные лучи преломляются глазом сильнее, чем линзой, тем самым уменьшается сферическая aberrация. Хроматическая aberrация глаза устраняется совокупностью действующих жидкостей глазного яблока и вещества хрусталика, имеющих разные коэффициенты относительной дисперсии N .

Глаз реагирует только на видимый свет. При хорошем дневном освещении его максимальная чувствительность проявляется к желтому излучению с длиной волны $\lambda = 0,564$ мкм, при слабом сумеречном освещении — к излучению с $\lambda = 0,500$ мкм.

Разрешающая способность глаза как оптической системы может быть определена по формуле $\psi'' = 140/D$. Считая предельной величину входного зрачка $D = 2,0$ мм, получим $\psi''_{\text{гл}} = 70''$.

С другой стороны, зная наименьшее расстояние между двумя соседними колбочками и палочками, равное 0,006 мм, и расстояние от центра хрусталика до сетчатки, равное 22,8 мм, имеем

$$\psi''_{\text{гл}} = 0,006 \text{ р}'' / 22,8 = 54''. \quad (3.134)$$

Расхождение в остроте зрения, вычисленное разными путями, можно считать незначительным, так как острота зрения глаза $\psi''_{\text{гл}}$ не остается постоянной.

Острота зрения глаза зависит от освещенности и контрастности. Например, в сумерках $\psi''_{\text{гл}}$ достигает 10—17'. Наилучшая острота зрения (разрешающая способность) глаза наблюдается при диаметре зрачка 3—4 мм и освещенности рассматриваемого предмета 50 лк. Причем острота становится максимальной при наблюдениях черных предметов на белом фоне при освещенности от 30 до 200 лк, а при наблюдениях белых предметов на черном фоне глаз лучше видит при освещенности 5—10 лк.

Из практики наблюдений установлено, что черную линию на белом фоне можно видеть невооруженным глазом под углом до 2,5', что при расстоянии наилучшего видения 25 см составляет всего лишь 3 мкм, т. е. на расстоянии 250 м можно видеть телеграфные провода толщиной 3 мм.

Из других свойств глаза отметим, что пара глаз обладает бинокулярным и стереоскопическим зрением.

Наряду с замечательными свойствами глазу, как и всякой оптической системе, присущи недостатки (aberrации).

Хроматизм положения для лучей $F-C$ составляет 2—3', $D-G$ — 3—4'; хроматизм увеличения для $F-C$ — 0,5 %, сферическая aberrация 1—2', кома $\sim 1'$, астигматизм — 0,2—0,3 диоптрии, дисторсия $\sim 0,5$ %. Кривизна поля компенсируется кривизной сетчатки и accommodation глаз.

§ 22. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ: ЛУПА, МИКРОСКОП

В геодезических приборах применяются отсчетные приспособления, основанные на способности глаза с высокой точностью: 1) оценивать десятые доли малого промежутка между штрихами; 2) фиксировать совпадения штрихов; 3) отмечать симметричность расположения штрихов одной шкалы относительно другой.

Опытами установлено, что невооруженный глаз надежно оценивает десятые доли промежутка, если видимая его величина равна около 1,0—1,5 мм, а толщина штрихов и индекса 0,1—0,15 мм, т. е. 0,1 деления ширины интервала. При соблюдении указанных условий и достаточной освещенности (до 500 лк) предельная погрешность отсчета составляет около 0,1 деления шкалы.

Разрешающая способность глаза в угловой мере равна 40—60". При наблюдении более мелких близко расположенных делений шкал геодезических приборов применяются лупы и микроскопы.

Лупа — короткофокусная собирательная линза, служащая для рассматривания близко расположенных предметов (рис. 46). Наблюдатель устанавливает глаз вблизи заднего фокуса F' , а предмет — между передней фокальной плоскостью и самой лупой так, чтобы расстояние до изображения s' было около 250 мм, т. е. равным расстоянию наилучшего зрения. Под видимым (угловым) увеличением лупы понимают отношение тангенса угла u' , под которым видно изображение через лупу, к тангенсу угла u , под которым виден предмет на расстоянии лучшего зрения $s' = 250$ мм

$$\Gamma^{\times} = \operatorname{tg} u' / \operatorname{tg} u. \quad (3.135)$$

Подставив в (3.135) значения $\operatorname{tg} u = l/s'$ и $\operatorname{tg} u' = l/f'$, получим

$$\Gamma^{\times} = s'/f' = 250/f',$$

где f' — заднее фокусное расстояние лупы в мм; $s' = 250$ — расстояние наилучшего зрения (мм).

Чем меньше f' , тем больше Γ^{\times} , поэтому при изготовлении лупы используются короткофокусные линзы. Однако беспрельдно нельзя повышать увеличение лупы, так как уже при увеличении 20^{\times} фокусное расстояние будет равно 12,5 мм. Для улучшения изображения при больших увеличениях применяют сложные лупы, изготовленные из нескольких линз с различными показателями преломления и радиусами кривизны сферических поверхностей, что дает возможность значительно исправить хроматическую и сферическую абберации, а также дисторсию: а) симметричная лупа, состоит из двух одинаковых плосковыпуклых линз, обращенных плоской стороной к предмету. Лупа не исправлена на хроматическую абберацию, но в ней

значительно ослаблены сферическая aberrация и дисторсия. Увеличение лупы не превышает $10\times$; б) несимметричная лупа, сферическая aberrация и дисторсия достаточно ослаблены, хроматизм не исправлен. Увеличение может быть доведено до $20\times$; в) апланатическая лупа, состоит из трех линз, средняя из которых изготовлена из крона, а крайние (симметричные) — из флинта. В лупе хорошо исправлены хроматическая и сферическая aberrации, а также дисторсия и астигматизм.

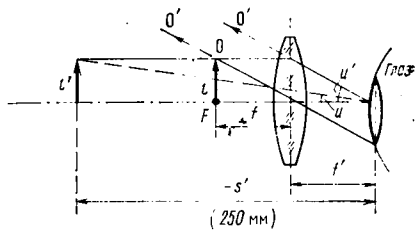


Рис. 46. Лупа

Имея оптическую систему, например лупу, можно написать следующее выражение для разрешающей способности глаза совместно с системой:

$$\gamma = P_{\text{гл}}/\Gamma^x, \quad (3.136)$$

где Γ^x — увеличение оптической системы.

Так, например, если интервал между соседними штрихами шкалы составляет 0,1 мм, то, учитывая условия наилучшего рассматривания при оценке десятых долей деления, получим увеличение лупы

$$\Gamma^x = (1,0 \div 1,5) \text{ мм}/0,1 \text{ мм} = (10 \div 15)\times.$$

Фокусное расстояние лупы из (3.135) составит

$$f' = 250/\Gamma^x, \text{ т. е. } 25 \div 17 \text{ мм.} \quad (3.137)$$

Разрешающая способность лупы в угловой мере при рассматривании делений шкалы составит

$$\gamma'' = \frac{60''}{15} \div \frac{40''}{10} = 4''.$$

Такой принцип расчета увеличения может быть использован и для других оптических систем.

При дальнейшем повышении увеличения фокусное расстояние будет настолько мало, что поместить предмет между главным фокусом и лупой затруднительно, тем более что в сложных лупах главные плоскости, от которых рассчитывают фокусные расстояния, могут быть удалены внутрь линзы. Кроме того, поле зрения при большом увеличении становится очень малым. В современных оптических теодолитах интервал между соседними штрихами лимба составляет $20 \div 30$ мкм, толщина штрихов 1—3 мкм. Оптимальное увеличение оптических систем для отсчитывания может составить

$$\Gamma^x = 1,5 \text{ мм}/(0,03 \div 0,02) \text{ мм} = 50 \div 75\times.$$

В этих случаях используют более сложные оптические системы — микроскопы.

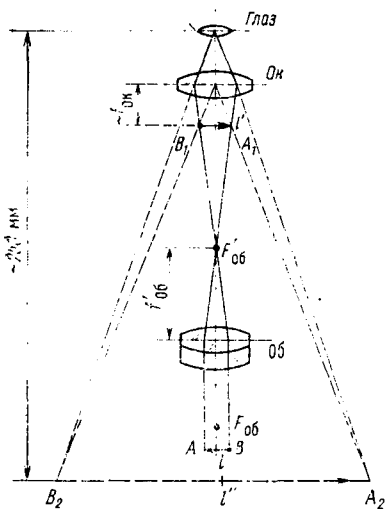


Рис. 47. Микроскоп

Микроскоп представляет собой сложную оптическую систему, предназначенную для рассматривания мелких предметов, в частности, делений шкал геодезических приборов. Оптическая схема микроскопа и ход лучей в нем показаны на рис. 47.

Микроскоп состоит из двух собирательных систем (объектива и окуляра), каждая из которых в свою очередь представляет собой также сложную оптическую систему.

Предмет AB расположен между главным фокусом $F_{об}$ и двойным фокусным расстоянием $2f_1$ объектива, который дает действительное, обратное и увеличенное изображение A_1B_1 предмета. Это изображение располо-

жено за двойным фокусным расстоянием $2f'_{об}$ вблизи переднего фокуса окуляра $F_{ок}$. При использовании микроскопа в качестве отсчетного устройства в этой же плоскости помещают измерительную шкалу, которую затем рассматривают совместно с изображением объектов (делений основной шкалы геодезического прибора).

Окуляр микроскопа работает как лупа, давая прямое, увеличенное и мнимое изображение A_2B_2 , которое будет обратным по отношению к предмету AB . Изображение A_2B_2 может быть удалено от глаза на расстояние наилучшего зрения (250 мм) или располагаться в бесконечности. В последнем случае изображение A_1B_1 должно находиться в переднем фокусе $F_{ок}$ окуляра. Таким образом, микроскоп дает обратное, увеличенное и мнимое изображение. Общее линейное увеличение микроскопа

$$\beta = \beta_{ок} \cdot \beta_{об}, \quad (3.138)$$

где $\beta_{об}$ — линейное увеличение объектива; $\beta_{ок}$ — линейное увеличение окуляра.

В микроскопах геодезических приборов в плоскости формирования действительного изображения A_1B_1 помещается индекс, шкала или какое-либо иное приспособление для точного отсчитывания.

§ 23. ЗРИТЕЛЬНЫЕ ТРУБЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В геодезических приборах зрительная труба служит для визирования (в теодолитах, нивелирах, дальномерах и т. п.) и отсчитывания по шкалам реек, марок и других визирных целей.

Современные зрительные трубы являются сложными оптико-механическими устройствами и как минимум включают объектив, окуляр, сетку нитей. Отечественные зрительные трубы, как правило, дают увеличенное, обратное изображение. Однако изготавливают и так называемые прямые трубы, в которых между окуляром и объективом располагается дополнительная линзовая или призмная оборачивающая система, формирующая совместно с окуляром прямое изображение.

В геодезических приборах преимущественно используется астрономическая зрительная труба Кеплера, состоящая в общем случае из положительного объектива с большим фокусным расстоянием и положительного короткофокусного окуляра (рис. 48).

Объектив формирует действительное перевернутое уменьшенное изображение l' . Поскольку визирная цель располагается от объектива на расстоянии, значительно превышающем двойное фокусное, то изображение l' строится вблизи его заднего фокуса F_1' и рассматривается через окуляр, как через лупу.

Окуляр — оптическая система, расположенная непосредственно перед глазом и предназначенная для рассматривания изображения, построенного объективом. При небольших расстояниях визирования фокусы F_1' и F_2 не совпадают. При визировании на бесконечность изображение удаленной цели строится в общей фокальной плоскости объектива и окуляра — задний фокус F_1' объектива будет совпадать с передним фокусом окуляра. Такая оптическая система называется телескопической.

Для зрительных труб геодезических приборов важным понятием является «визирная ось» — мнимая прямая, проходящая через заднюю главную точку объектива и перекрестие сетки нитей. Перекрестие сетки должно быть отчетливо видно на фоне изображения без параллакса. Для этого оно должно находиться в плоскости формирования изображения объективом. Поэтому плоскость сетки нитей должна располагаться в передней фокальной плоскости окуляра.

Поскольку с изменением расстояния до предмета меняется и положение изображения, в конструкции зрительной трубы должна быть предусмотрена возможность изменять расстояние между объективом и окуляром — длину трубы. Это достигается перемещением окулярного колена, включающего оптическую систему окуляра и устройство, содержащее сетку нитей, — зрительные трубы с внешней фокусировкой.

В настоящее время этот способ практически полностью вытеснен фокусировкой при помощи подвижной линзы (или системы линз), помещенной внутри зрительной трубы, — зрительная труба с внутренней фокусировкой (рис. 49). В качестве фокусирующей линзы используют преимущественно рассеивающую (отрицательную) линзу. Отрицательная фокусирующая

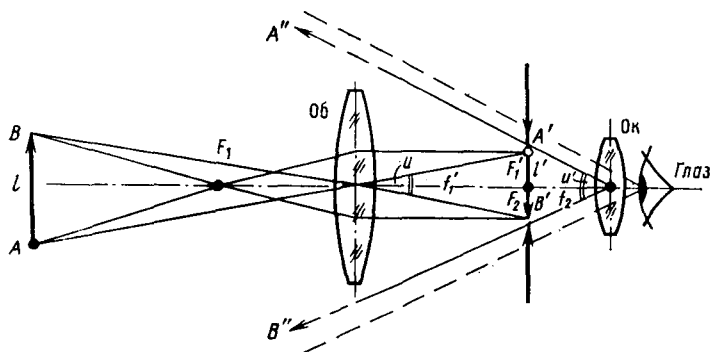


Рис. 48. Построение изображения в зрительной трубе

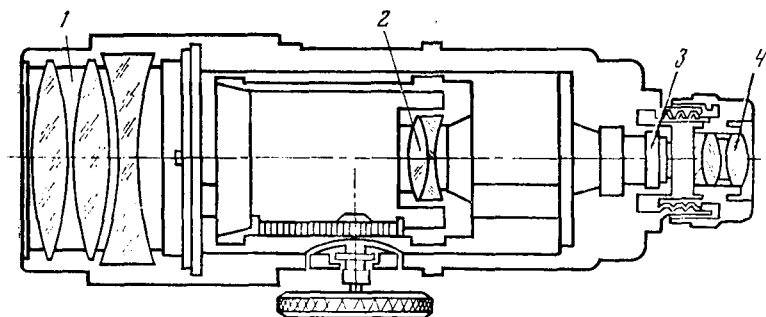


Рис. 49. Зрительная труба с внутренней фокусировкой

линза изменяет эквивалентное фокусное расстояние системы «объектив 1 + фокусирующая линза 2» так, чтобы действительное изображение предмета получилось в передней фокальной плоскости окуляра, т. е. в плоскости нанесения перекрестия сетки нитей. Такая оптическая система носит название телеобъектива, соответствующего схеме: передний оптический компонент объектива 1 + задний фокусирующий компонент 2. На рис. 49 позиции 3 и 4 — соответственно плоскопараллельная стеклянная пластина с сеткой нитей и окуляр.

В отдельных случаях вместо отрицательной линзы в качестве фокусирующего компонента используют подвижную положительную линзу, которая не удлиняет, а укорачивает фокусное расстояние переднего компонента. В некоторых типах нивелиров с компенсаторами между передним компонентом телеобъектива и сеткой нитей помещают одну неподвижную отрицательную линзу и одну подвижную собирающую. В этом случае перед сеткой нитей получается свободное пространство, в котором можно разместить компенсатор.

Только весьма тщательная юстировка позволяет совместить оптическую ось фокусирующего компонента с оптической осью

переднего оптического компонента телеобъектива. Поскольку эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива изменяется, визирная линия не только не совпадает с оптической осью, но даже не является прямой; она представляет собой гиперболу с малой кривизной, которую можно выявить при небольших расстояниях визирования.

Колебания фокусирующей линзы при ее перемещении по направляющим в зрительных трубах сказываются в значительно меньшей степени, чем сдвиги окулярного колена в трубах с внешней фокусировкой.

На рис. 50 показано перемещение изображения визирной цели при перемещении фокусирующей линзы L_1 из положения

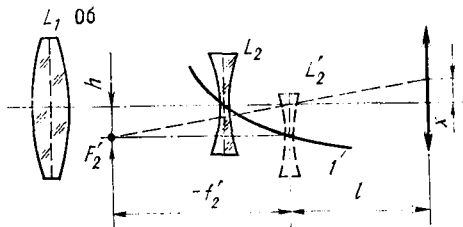


Рис. 50. Влияние перемещения фокусирующей линзы

L_2 (наведение на ∞) в положение L_2' (наведение на близко расположенную цель). При смещении центра линзы на величину h изображение сместится на величину

$$x = \frac{h}{f_2'} l. \quad (3.139)$$

Это обстоятельство необходимо учитывать при визировании внутри нескольких десятков метров, когда фокусирующая линза перемещается на значительную величину.

Таким образом, оптическая система зрительной трубы должна быть хорошо центрированной, т. е. иметь одну общую оптическую ось — прямую, проходящую через центры всех преломляющих сферических поверхностей оптической системы. Другой основной осью является визирная ось зрительной трубы. Кроме того, существует геометрическая ось, совпадающая с осью симметрии оправ зрительной трубы. Зрительную трубу на специальных оптико-механических устройствах (оптических скамьях) собирают так, чтобы все три оси совпадали.

Телеобъектив зрительной трубы с внутренней фокусировкой представляет собой эквивалентную систему, фокусное расстояние которой рассчитывается по формуле (3.58).

Преимущества зрительных труб с внутренней фокусировкой:

1. Герметичность (труба защищена от попадания пыли и грязи).

2. При одинаковом увеличении она значительно короче, что обеспечивается телеобъективом с большим $f_{\text{экр.}}$.

3. Имеет высокую стабильность положения визирной оси (т. е. меньшую ошибку за перефокусирование), так как колебания положения фокусирующей линзы гораздо меньше скажутся на положении визирной оси, чем колебания окулярного колена в трубах с внешней фокусировкой.

4. Имеет постоянную длину.

5. Фокусирующий механизм и направляющие защищены от повреждений.

Основные части зрительных труб

Корпус изготавливается целиком из латуни или сплавов алюминия, внутренние поверхности окрашиваются в черный матовый цвет (чернение) для устранения бликов. Иногда для этого внутри устанавливают диафрагмы. Корпус внутри имеет резьбу для установки объектива с оправой, окуляра и других частей, а также тщательно отшлифованные направляющие для перемещения тубуса с фокусирующей линзой.

Объективы. Объектив является наиболее важным оптическим узлом зрительной трубы, строящим изображение в фокальной плоскости трубы и определяющим в первую очередь качество этого изображения. Его основными характеристиками являются фокусное расстояние f' ; относительное отверстие D/f' , где D — диаметр входного зрачка; угол поля зрения и разрешающая способность. Фокусное расстояние может быть до 500 мм; относительное отверстие находится в пределах 0,2—0,1, т. е. объективы пропускают широкие пучки, идущие под малым углом или параллельно к оптической оси. Поэтому в зрительных трубах в первую очередь исправляется сферическая аберрация, кома, хроматизм положения и, по возможности, вторичный спектр. Поле зрения объективов в геодезических трубах составляет 1—2°.

В качестве объективов используются обычно системы линз, распространенными являются двухлинзовые склеенные (рис. 51, а) (при диаметре до 50 мм) и несклеенные с воздушным зазором (при диаметре более 60—80 мм) (рис. 51, б) объективы.

Двухлинзовый склеенный объектив состоит из положительной (стекло типа «крон») и отрицательной (стекло типа «флинт») линз. Существуют объективы двух видов: «крон — впереди» и «флинт — впереди». Если заданы марки стекол, в объективе можно исправить сферическую аберрацию, кому и хроматизм положения.

Двухлинзовый несклеенный объектив (см. рис. 51, б) имеет один дополнительный параметр (радиус поверхности), позволяющий устранить кому, не прибегая к затруднительному подбору разных сортов оптического стекла, и повысить относительное отверстие при хорошем качестве изображения.

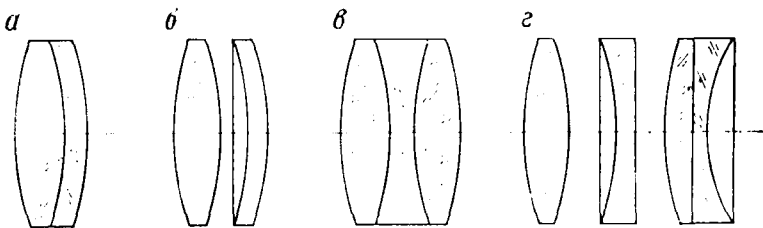


Рис. 51. Объективы зрительной трубы

Трехлинзовый объектив (рис. 51, в) состоит из двух положительных компонентов и одной отрицательной линзы, позволяет подбором марок стекол существенно устранить вторичный спектр, не уменьшая относительного отверстия, что важно при создании труб большого увеличения.

В настоящее время начинают применять и более сложные четырех- и пятилинзовые объективы, а также объективы с толстыми менисками, с помощью которых исправляется кривизна поля. На рис. 51, г показан четырехлинзовый объектив зрительной трубы теодолита 2Т2.

Телеобъективы. Преимущественное применение в современных зрительных трубах находят двухкомпонентные телеобъективы с переменным фокусным расстоянием, состоящие из переднего неподвижного компонента и фокусирующего компонента (см. рис. 50). Сокращение длины трубы в таких системах достигает 0,80—0,60 от эквивалентного фокусного расстояния телеобъектива $f_{\text{экв}}$. В качестве переднего компонента используются двух-, трех- и многолинзовые объективы. Фокусирующий компонент — обычно отрицательная линза или склейка из двух линз, реже в качестве фокусирующего компонента используются положительные линзы.

Зеркально-линзовые телеобъективы позволяют получить высокое качество изображения, так как состоят из преломляющих и отражающих поверхностей. При этом существенно сокращается длина трубы. На рис. 52 приведена схема зрительной трубы с зеркально-линзовым объективом со сферической оптикой, предложенным Д. Д. Максуповым. Передний компонент телеобъектива состоит из ахроматического мениска 1 с отражающим слоем 2 в приосевой зоне и вогнутого зеркала 4 с отверстием в центре; далее отрицательная фокусирующая линза 3, сетка нитей 5 и окуляр 6 образуют оптическую систему зрительной трубы.

В теодолите ДКМ фирмы «Вильд» (рис. 53) длина зрительной трубы еще более уменьшена применением не прямого, а «ломаного» хода лучей. Такая труба состоит из собирательной системы, состоящей из положительной L_1 и отрицательной L_2 линз и двух зеркальных линз Z_1 и Z_2 , отражающие поверхности которых действуют как сферические вогнутые зеркала.

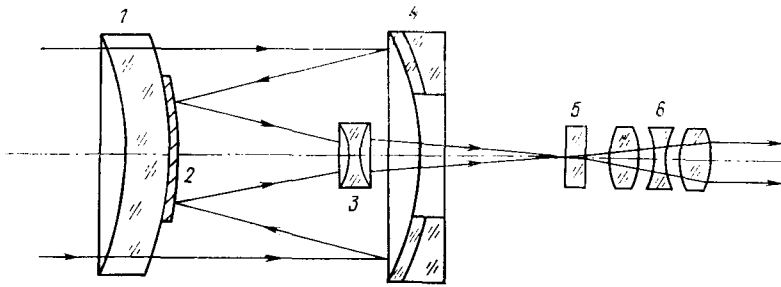


Рис. 52. Зрительная труба с зеркально-линзовым объективом

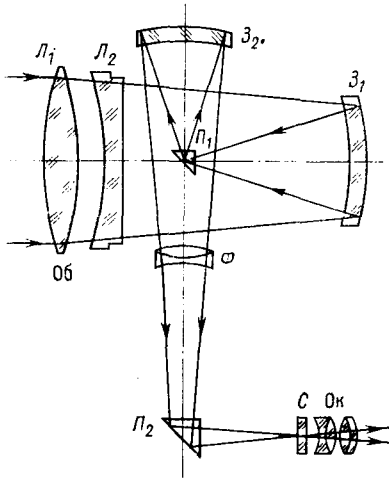


Рис. 53. Ломаная зеркально-линзовая зрительная труба

Фокусирующая линза Φ и призмы Π_1 и Π_2 позволяют получить в плоскости сетки нитей действительное, увеличенное изображение, рассматриваемое через окуляр.

Основные характеристики окуляра: фокусное расстояние $f_{ок}$; относительное отверстие $D'/f_{ок}$, где D' — размер выходного зрачка; поле зрения, удаление выходного зрачка от последней поверхности t' (или заднее вершинное расстояние s_F'), переднее вершинное фокусное расстояние s_F и качество изображения.

Для $f_{ок}'$ установлен нормальный ряд значений от 10 до 40 мм (через 5 мм) и 50 мм. Наиболее распространены окуляры с $f_{ок}' = 20 \div 30$ мм.

Для телескопических систем $f_{об}'/f_{ок}' = \Gamma^\times$, поэтому величина $f_{ок}'$ определяет величину $f_{об}'$ и в значительной мере длину трубы.

При исправлении недостатков изображения окуляров основное внимание обращают на полевые aberrации: кому, астигматизм, кривизну поля и дисторсию, а также на хроматическую aberrацию увеличения; стремятся также исправить сфериче-

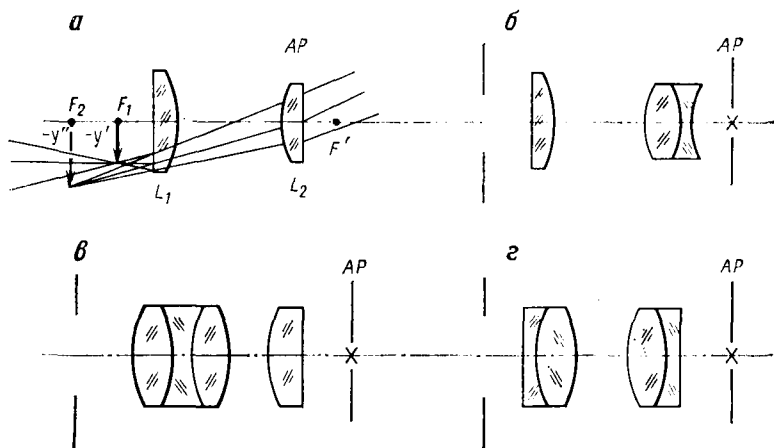


Рис. 54. Окуляры

скую aberrацию в выходном зрачке, т. е. добиваются того, чтобы главные лучи пересекались в центре этого зрачка.

Степень исправления aberrаций зависит от сложности окуляра, поэтому большое значение имеет выбор типа окуляра.

Большинство окуляров состоит из двух частей: коллектив (полевая линза) и глазная линза. Полевая линза служит для сужения лучей, идущих от объектива. Она располагается вблизи сетки нитей и практически не влияет на увеличение окуляра.

Окуляр Рамсдена (рис. 54, а) состоит из двух плоско-выпуклых линз, обращенных одна к другой выпуклыми поверхностями. Исправлен хроматизм увеличения и кома или астигматизм. Качество изображения невысокое. Применяют в простейших зрительных трубах и микроскопах.

Окуляр Кельнера (рис. 54, б) является усовершенствованным окуляром Рамсдена. Склеенная глазная линза позволяет лучше исправить хроматизм. Применяют в зрительных трубах малого и среднего увеличения.

Симметричный окуляр (рис. 54, в) состоит из двух склеенных и взаимообращенных компонентов с малым воздушным промежутком между ними. Ввиду простой конструкции, хорошего качества изображения и большого удаления выходного зрачка $t' = (0,9 \div 1,0) f_{\text{ок}'}$ такой окуляр находит очень широкое применение в зрительных трубах геодезических приборов.

Ортоскопический окуляр, свободный от дисторсии (рис. 54, в), имеет простую глазную линзу и тройную склеенную полевую линзу, хорошо исправлен в отношении сферической aberrации, хроматизма и дисторсии. Большой вынос фокусов ($s_F \approx -0,5 f_{\text{ок}'}$) и удаление выходного зрачка $t' \approx \frac{3}{4} f_{\text{ок}'}$ позволяют использовать окуляр для труб большого увеличения.

Рис. 55. Автоколлимационный окуляр

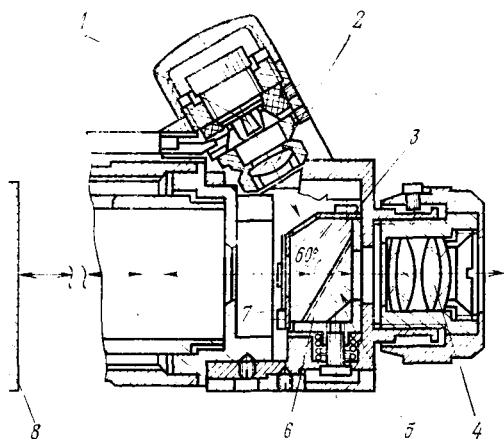
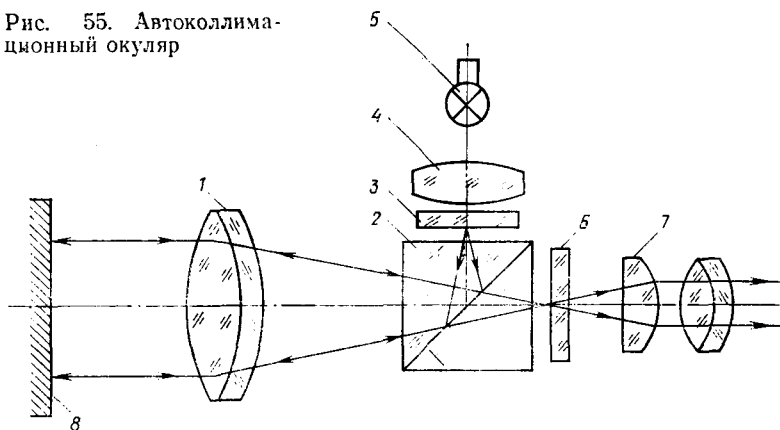


Рис. 56. Автоколлимационный окуляр Монченко

Все линзы окуляров собирают в одной оправе — окулярной трубке, вращая которую можно перемещать вдоль оси на величину до 1 мм для установки резкого изображения сетки нитей.

Автоколлимационные окуляры предназначены для одновременного наблюдения в поле зрения зрительной трубы сетки нитей (или шкалы) и ее изображения (или изображения дополнительной сетки), отраженного от зеркала, установленного вне прибора. Принципиальная схема зрительной трубы с автоколлимационным окуляром представлена на рис. 55. В данной схеме показан автоколлимационный окуляр со светоделительным кубиком 2 и двумя сетками 3, 6 (обычно различными по форме). Одна из сеток подсвечивается лампой

5 через конденсатор 4 и далее объективом 1 проектируется на зеркало 8. Если зеркало 8 перпендикулярно к визирной оси зрительной трубы, то изображение сетки 3 совпадает с основной сеткой нитей 6, рассматриваемой через окуляр 7.

На рис. 56 показана схема автоколлимационного окуляра Монченко. Окуляр состоит из осветителя 1, конденсирующей линзы 2, двух призм 3 и 6 с посеребренными нитями на поверхности 7 и с отражающей поверхностью 5, окуляра 4. Свет от осветителя 1, отражаясь от сетки нитей на поверхности 7, идет к зеркалу 8 (через объектив, который на чертеже не показан) и далее после отражения от зеркала 8 в окуляр 4. Лучи, не отраженные сеткой нитей, идут на отражающую поверхность 5 и далее, отразившись от сетки нитей на поверхности 7, в окуляр 4. Таким образом, наблюдатель видит два изображения одной и той же сетки нитей, образованные лучами, отраженными от зеркала 8 и отражающей поверхности 5 призмы 6.

Сетка нитей наносится на плоскопараллельной пластинке путем гравирования на воске и последующего травления плавиковой кислотой.

Сетка монтируется в зрительной трубе так, чтобы она находилась в передней фокальной плоскости окуляра. Сетка вставляется в кольцевую оправу, играющую роль диафрагмы поля зрения. Оправа сетки в небольших пределах может перемещаться при помощи юстировочных винтов, что позволяет изменять положение визирной оси.

В некоторых геодезических приборах, например теодолитах 2Т2, 2Т5, сетка нитей укрепляется в корпусе зрительной трубы неподвижно (подробнее см. в разделе «Теодолиты») с тем, чтобы с большой степенью точности совместить оптическую и визирную оси зрительной трубы.

§ 24. ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Основными оптическими характеристиками зрительной трубы являются увеличение Γ^* , угол поля зрения, относительная яркость h и разрешающая сила γ при установке трубы на бесконечность.

Угловое (видимое) увеличение зрительной трубы определяется отношением

$$\Gamma^* = \operatorname{tg} u' / \operatorname{tg} u \approx u' / u, \quad (3.140)$$

где u' — угол, под которым наблюдатель видит изображение предмета в зрительной трубе; u — угол, под которым виден этот предмет невооруженным глазом из середины входного зрачка трубы.

Для телескопических систем (при наведении трубы практически «на бесконечность») увеличение определяется по формулам (3.140), (3.141) и (3.142).

Если наблюдаемый предмет расположен на близком расстоянии от прибора, то необходимо учитывать длину трубы — расстояние между входным и выходным зрачком. Отношение

$$\bar{\Gamma}^{\times} = \operatorname{tg} u' / \operatorname{tg} \bar{u} \quad (3.141)$$

называется видимым увеличением зрительной трубы. В (3.141) \bar{u} — угловой размер предмета, рассматриваемого невооруженным глазом у выходного зрачка.

При длине трубы l и расстоянии s от объектива до предмета

$$\bar{\Gamma}^{\times} = \Gamma^{\times} \left(1 + \frac{l}{s} \right).$$

Следовательно, видимое увеличение несколько больше, чем действительное угловое, причем расхождение между ними тем меньше, чем больше расстояние до визирной цели.

В телеобъективах зрительных труб геодезических приборов $f_{\text{эвб}}'$ меняется в небольших пределах при наведении на разноудаленные цели (особенно на короткие расстояния). Поэтому меняется и угловое увеличение Γ^{\times} зрительной трубы.

На практике угловое увеличение определяют по способу Галилея. На рейку с делениями смотрят одним глазом через трубу, а вторым непосредственно и наблюдают, сколько делений N , видимых невооруженным глазом, закрывают n делений рейки, видимых в трубу. Можно показать, что

$$\Gamma^{\times} = \operatorname{tg} u' / \operatorname{tg} u \approx N/n. \quad (3.142)$$

Способом Галилея можно получить частное значение увеличения, так как рейка устанавливается на близком расстоянии от зрительной трубы.

Измерив диаметр входного отверстия объектива $D_{\text{вх}}$ (по стеклу), например, циркулем и диаметр выходного $d_{\text{вых}}$ отверстия с помощью динаметра, получают увеличение Γ^{\times} по формуле $\Gamma^{\times} = D_{\text{вх}} / d_{\text{вых}}$. Практически величину выходного отверстия определяют при наведении трубы на бесконечность путем измерения диаметра изображения входного отверстия (светлый кружок) на расстоянии 3÷5 мм от окуляра. Динаметр представляет собой лупу со шкалой, цена деления которой 0,1 мм.

Угол поля зрения — ограниченная конической поверхностью часть пространства, видимая в неподвижную зрительную трубу, установленную на бесконечность (рис. 57).

Различают два угла поля зрения: истинный (объективный) — угол ε_2 , под которым виден диаметр диафрагмы, расположенной в общей фокальной плоскости объектива и окуляра; видимый (субъективный) — угол ε_1 , под которым виден диаметр диафрагмы поля зрения из центра выходного зрачка трубы,

$$\varepsilon_1 = \frac{d}{f_{\text{ок}}} \rho; \quad \varepsilon_2 = \frac{d}{f_{\text{об}}} \rho, \quad (3.143)$$

где d — диаметр диафрагмы поля зрения; $f_{\text{об}}$ и $f_{\text{ок}}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Из (3.143) находим угловое увеличение

$$\Gamma^\times = \text{tg } \varepsilon_1 / \text{tg } \varepsilon_2 = f_{\text{об}} / f_{\text{ок}}, \quad (3.144)$$

откуда

$$\text{tg } \varepsilon_2 = \text{tg } \varepsilon_1 / \Gamma^\times, \quad (3.145)$$

т. е. истинное поле зрения трубы равно видимому полю зрения, деленному на угловое увеличение.

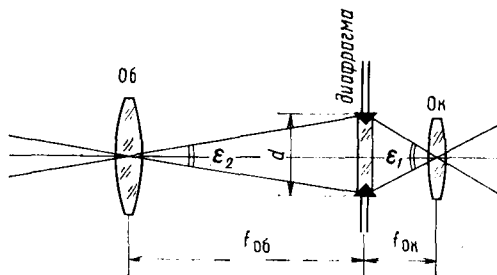


Рис. 57. Схема формирования угла поля зрения зрительной трубы

Для зрительных труб теодолитов истинный (объективный) угол поля зрения можно определить как разность отсчетов по вертикальному или горизонтальному кругу. Для этого выполняют два наведения на визирную цель верхним и нижним (левым и правым) краями поля зрения с соответствующим отсчитыванием по кругам. Для нивелиров ε_2 можно определить по рейке. В этом случае на некотором расстоянии от зрительной трубы (до 50 м) помещают рейку, по которой берут отсчеты, соответствующие краям поля зрения, разность которых составит величину l . Величина угла поля зрения определится из выражения

$$\varepsilon_2 = l\rho/s. \quad (3.146)$$

Для определения угла поля зрения в лабораторных условиях применяют широкоугольный коллиматор — устройство, в фокальной плоскости объектива которого установлена шкала с известной ценой деления в угловой мере. Испытуемую зрительную трубу помещают объективом как можно ближе к объективу коллиматора и, сфокусировав на шкалу коллиматора, отсчитывают по ней число делений, видимых по полю зрения. Истинный угол поля зрения современных зрительных труб геодезических приборов составляет $1-2^\circ$.

Относительная яркость трубы определяется отношением освещенности изображения на сетчатке глаза при рассматривании в трубу к освещенности изображения того же предмета на сетчатке при рассматривании его невооруженным глазом. Она зависит от коэффициента δ_k светопропускания, от диаметра зрачка глаза наблюдателя $d_{г\text{л}}$ и от диаметра выходного зрачка $d_{\text{вых}}$. Площади зрачков пропорциональны квадратам их диаметров, поэтому яркость трубы определяется по формуле

$$h = \delta_k \frac{d_{\text{вых}}^2}{d_{г\text{л}}^2} = \delta_k \frac{D_{\text{вых}}^2}{\Gamma^2 d_{г\text{л}}^2}, \quad (3.147)$$

где $D_{\text{вых}}$ — входной зрачок зрительной трубы, Γ — угловое увеличение.

Наибольшая относительная яркость ($h=1$) получается, если $\delta_k=1$ и $d_{\text{вых}}=d_{г\text{л}}$. Делать диаметр выходного зрачка трубы больше, чем диаметр зрачка глаза, нецелесообразно, так как при этом часть светового потока не попадет в глаз наблюдателя. В дневных условиях диаметр зрачка глаза около 2 мм, поэтому диаметр выходного зрачка зрительных труб геодезических приборов предусматривают в пределах $1 \div 2$ мм.

Разрешающая способность зрительной трубы характеризуется наименьшим углом, под которым видны отдельно две точки, и определяется по формуле (2.24).

Поскольку предел разрешения для человеческого глаза около $60''$, то разрешающая способность трубы будет использоваться полностью, если выполняется соотношение

$$60''/\Gamma^{\times} = 120''/D,$$

откуда

$$\Gamma^{\times} = D/2. \quad (3.148)$$

На практике в целях обеспечения наименьшего утомления глаза увеличение Γ^{\times} трубы подбирают в $1,5 \div 2$ раза больше минимального.

Разрешающая способность тесно связана с контрастностью изображения, под которой понимается отношение разности яркостей рассматриваемого предмета B_1 и фона B_2 к яркости фона:

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_2}. \quad (3.149)$$

При $K < 1,5$ человеческий глаз уже не может отличить объект от фона.

§ 25. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ

При исследованиях оптических деталей, узлов, систем и для различных контрольных измерений применяют специальные оптико-механические системы (оптические скамьи ОСК-2 и

ОСК-3). Оптическая скамья ОСК-2 отличается от ОСК-3 фокусными расстояниями объективов коллиматора, соответственно $f' = 1600$ мм и 1000 мм.

В комплект оптической скамьи входят длиннофокусный коллиматор, автоколлимационная труба с $f' = 500$ мм, отсчетный микроскоп с объективами различных увеличений и апертур, сменные окуляры, как обычные, так и автоколлимационные, штриховые миры, «точка», раздвижная щель, диоптрийная трубка с набором насадочных линз, осветитель, монохроматический источник света, плоскопараллельная пластинка, всевозможные столики и держатели для крепления исследуемых оптических систем, накладной уровень.

Основанием оптической скамьи являются массивные направляющие, снабженные подъемными винтами и миллиметровой отсчетной шкалой. Коллиматор, микроскоп, осветитель, столики и другие приспособления могут перемещаться и крепиться на этих направляющих.

На рис. 58 представлена схема установки, смонтированной на направляющих оптической скамьи и позволяющей определять следующие параметры исследуемой оптической системы: фокусное расстояние, вершинные (передний и задний) отрезки, разрешающую способность по миру и качество изображений по «точке».

Рассмотрим определение фокусного расстояния f' , заднего фокального отрезка s_F' , положения задней главной плоскости объектива s_H' и разрешающей способности оптической системы.

На рис. 59 дана схема двухкомпонентного телеобъектива и его кардинальных элементов f' , s_F' , s_H' , относящихся к пространству изображений. Для определения тех же элементов, но относящихся к пространству объектов исследуемую оптическую систему следует развернуть на 180° .

Предварительно следует выставить коллиматор на бесконечность. Перед объективом коллиматора устанавливают положительную оптическую систему, которая строит изображение шкалы коллиматора в своей задней фокальной плоскости. Это изображение рассматривают в измерительный микроскоп. В поле зрения микроскопа одновременно наблюдают изображение шкалы коллиматора и сетку окулярного микрометра. Измеряемый интервал шкалы должен занимать не менее $\frac{2}{3}$ поля зрения. Биссектор окулярного микрометра (или косой крест) последовательно вращением барабанчика микрометра совмещают со штрихами изображения шкалы коллиматора. По окулярному микрометру берут отсчеты A и B . При этом

$$f' = f'_k \frac{y'}{y}, \quad (3.150)$$

где $y' = (B - A)\tau$; f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора; τ — цена деления барабанчика окулярного микрометра; y — выбранный интервал по шкале коллиматора.

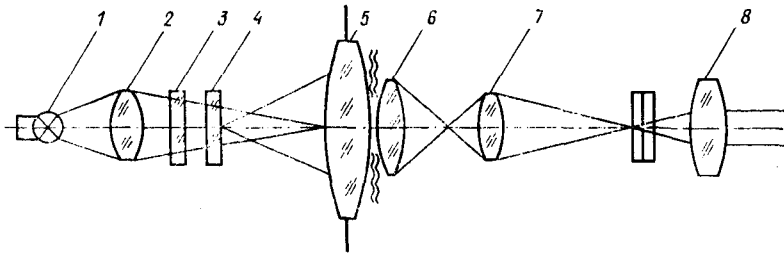


Рис. 58. Схема для определения оптических характеристик зрительной трубы:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — матовое стекло; 4 — шкала (мира); 5 — объектив коллиматора; 6 — испытываемая оптическая система; 7 — объектив микроскопа; 8 — измерительный окуляр

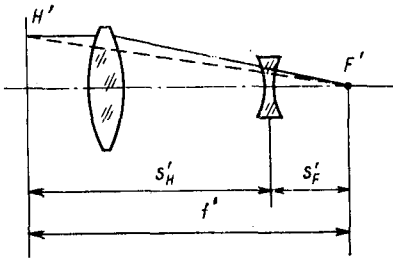


Рис. 59. Схема двухкомпонентного телеобъектива

При определении заднего фокального отрезка s'_F следует воспользоваться миллиметровой шкалой станины, по которой может перемещаться микроскоп (при значительных s'_F), или шкалой, регистрирующей перемещение тубуса микроскопа (при небольших s'_F). Для этой цели берут отсчеты при двух положениях измерительного микроскопа: при наблюдении изображений шкалы коллиматора A и при наблюдении структуры последней поверхности испытуемого объектива B . Разность отсчетов B и A будет равна заднему фокусному расстоянию s'_F .

Положение главной задней плоскости s'_H определяют по формуле (с учетом знаков)

$$s'_H = s'_F - f'$$

Для определения разрешающей способности в задней фокальной плоскости коллиматора устанавливают штриховую миру. Обычно набор мир (от № 1 до № 6) крепят на револьверную головку, что позволяет быстро находить требуемую миру. Наблюдая в поле зрения микроскопа изображение миры, построенное в фокальной плоскости исследуемого объектива, определяют группы штрихов, которые еще различаются. По известному номеру группы штрихов миры и таблице, находящейся в паспорте, определяют разрешающую способность системы в угловой мере.

Мира представляет собой штриховую испытательную таблицу, в которой расстояние между штрихами меняется по определенному закону. Она состоит из 25 элементов, каждый из которых включает 4 квадрата со штрихами в четырех различных направлениях. Ширина светлых промежутков между штри-

хами в пределах одного элемента одинакова. В каждой мире ширина штрихов при переходе от элемента № 1 к элементу № 25 убывает по геометрической прогрессии $1/\sqrt[25]{2} = 0,94$. Кроме этого, каждая мира имеет так называемые базовые штрихи, характеризующие ее масштаб. Угловое расстояние между серединами соседних темных (или светлых) штрихов каждого элемента мира (α'') в секундах вычисляют по формуле $\alpha'' = \frac{2a}{f'} \times 206\,265''$, где a — ширина штрихов в мм, f' — фокусное расстояние коллиматора,

$$\alpha'' = \frac{2a}{f} \rho'' \quad (3.151)$$

Разрешающую способность зрительных труб определяют по общей принципиальной схеме, но вместо микроскопа за окуляром трубы устанавливают наблюдательную трубку с увеличением $2 \div 4^x$, через которую рассматривают миру.

Угловое расстояние биссектора сетки нитей зрительной трубы определяют по линейке с миллиметровыми делениями, которую закрепляют горизонтально на расстоянии $s = 10 - 15$ м. По каждой из нитей биссектора берут отсчеты a_1 и a_2 с точностью до $0,2 \div 0,3$ мм. Угловой размер биссектора Δ вычисляют по формуле

$$\Delta = 200 (a_2 - a_1) s, \quad (3.152)$$

где a_1 и a_2 — в мм, s — в м.

Правильность хода фокусирующей линзы зрительной трубы исследуют следующим образом. На расстоянии около 100 м устанавливают визирную марку примерно на высоте оси вращения трубы теодолита. Тщательно ориентируют трубу по марке. В створе и перпендикулярно к визирной линии на выбранном расстоянии, например 5 м, закрепляют неподвижно горизонтальную линейку с миллиметровыми делениями (также на высоте прибора). Не изменяя положения трубы, фокусируют ее по линейке и по вертикальной нити берут отсчет a_1 с точностью до $0,2 \div 0,5$ мм. Затем переводят трубу через зенит, снова наводят на дальнюю ориентирующую марку и, изменяя фокусировку, берут второй отсчет a_2 по линейке. Погрешность хода фокусирующей линзы для расстояния s_i (например, 5 м) вычисляют по формуле

$$\delta_i = (a_2 - a_1) \rho / 2s. \quad (3.153)$$

Далее последовательно увеличивают расстояния до 10, 15, 20, 25, ... и т. д., повторяют цикл наблюдений (при КП и КЛ), определяя по формуле (3.153) значения δ_i для каждого расстояния. По результатам исследований можно построить график изменения величины δ_i , по которому при необходимости определяют поправки за перефокусирование.

Проверку качества изображения выполняют путем рассматривания в трубу правильных черных фигур (например, квадрата), вычерченных на ватмане. Лист ватмана прикрепляют на таком расстоянии от прибора, чтобы в поле зрения трубы размещалась целиком одна фигура. Хорошая труба дает четкое изображение, геометрически подобное оригиналу, с легкой фиолетовой или синей окраской на краях поля зрения. При наличии дисторсии изображение квадрата имеет бочкообразную форму, при явлениях астигматизма фигура полностью не фокусируется. Цветная окантовка изображения указывает на наличие хроматической аберрации.

В полевых условиях можно также проверить качество изображения по яркой звезде. Хорошая труба дает изображение звезды в виде яркого небольшого кружка с правильными концентрическими светлыми кольцами. При изменении фокусировки изображение звезды расплывается, сохраняя правильную форму. Искажение и двоение изображения указывает на плохое качество центровки или сборки объектива, при хроматической аберрации появляется окрашенность изображения, сферическая аберрация характеризуется изменением яркости концентрических колец при изменении диоптрийной наводки окуляра.

§ 26. ПОНЯТИЕ О ГАБАРИТНОМ И АБЕРРАЦИОННОМ РАСЧЕТАХ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

Зрительные трубы геодезических приборов рассчитывают для того, чтобы они соответствовали техническим требованиям, регламентируемым соответствующими ГОСТами. Расчет подразделяется на определение габаритов и аберраций.

Для габаритного расчета зрительной трубы задаются следующие технические условия: увеличение Γ , угол поля зрения 2ω , разрешающая способность, длина трубы, диаметр и удаление выходного зрачка, коэффициент нитяного дальномера и асимметрия дальномерных штрихов, коэффициент светорассеяния, коэффициент светопропускания и т. п.

Габаритные расчеты производятся по формулам геометрической оптики для идеальной оптической системы. Допустим, что требуется рассчитать габариты зрительной трубы теодолитов типа Т2. Согласно ГОСТ 10529—79 увеличение $\Gamma = 25\times$. При проектировании зрительных труб диаметр D' выходного зрачка выбирают в соответствии с ее увеличением. В нашем случае $D' = 1,5$ мм. Далее, выбрав относительное отверстие объектива $A = D : f_{об}' = 1 : 6,5$, коэффициент K_T укорочения зрительной трубы и отношение N фокусного расстояния первого компонента к фокусному расстоянию всего телеобъектива соответственно равными 0,6 и 0,5, определяем основные габаритные размеры зрительной трубы по следующим расчетным формулам.

Диаметр входного зрачка $D = D' \cdot \Gamma = 1,5 \cdot 25 = 38$ мм.

Эквивалентное фокусное расстояние объектива $f_{об}' = D \cdot A = 250$ мм.

Фокусное расстояние окуляра $f_{ок} = f_{об}' / \Gamma = 250 / 25 = 10$ мм.
Увеличение окуляра

$$\Gamma_{ок} = 250 / f_{ок} = 25 \times.$$

Оптическая длина зрительной трубы

$$L = K_T \cdot f_{об}' = 0,6 \cdot 250 = 150 \text{ мм.} \quad (3.154)$$

Фокусное расстояние первого компонента телеобъектива

$$f_1' = f_{об}' \cdot N = 125 \text{ мм.} \quad (3.155)$$

Фокусное расстояние фокусирующей линзы

$$f_2 = \frac{N(N - K_T)}{(1 - N^2)} f_{об}' = -50 \text{ мм.} \quad (3.156)$$

Расстояние между объективом и фокусирующей линзой при фокусировке на ∞

$$d_{\infty} = f_1' + (1 - N) \cdot f_2 = 100 \text{ мм.}$$

Расстояние между объективом и фокусирующей линзой при визировании на $s = 1,5$

$$d_{1,5} = \frac{1}{2} \left[L + s_1' - \sqrt{(L - s_1')(L - s_1' - 4f_2')} \right] = 116,3 \text{ мм,} \quad (3.157)$$

где

$$s_1' = \frac{f_1' \cdot s}{f_1' + s}.$$

В этих формулах надо соблюдать принятое в оптике правило знаков, т. е. полагать s отрицательной. В нашем примере $s = -1,5$ м, т. е. величина перемещения фокусирующего компонента $\Delta d_{\infty-s}$ составляет 16,3 мм.

Как уже отмечалось, у визирных труб с внутренней фокусировкой смещение сетки при исправлении коллимационной ошибки нарушает центрированность фокусирующей линзы относительно визирной оси. При этом величина коллимационной ошибки меняется. Исходя из допустимого смещения визирной линии, можно определить допустимое перемещение сетки Δ_c при исправлении коллимационной ошибки

$$\Delta_c \leq \frac{0,1 m_p \cdot \Delta_s^2}{\rho'' (f_{об}' - \Delta_s)}, \quad (3.158)$$

где $\Delta_s = L - \frac{d_s}{f_2'} (L - d_s)$; m_p — средняя квадратическая ошибка измерения угла одним полным приемом.

При перефокусировании с ∞ до $s=1,5; 5$ и 15 м для Т2 можно допустить соответственно: $\Delta_c \approx 0,06; 0,3$ и $1,1$ мм.

Подробный абберационный расчет зрительной трубы является сложной задачей и сводится к коррекции компонентов телеобъектива и окуляра. Основная тяжесть коррекции ложится на компоненты объектива вследствие существенной разности в высотах падающих лучей. С целью уменьшения сферической абберации, например, для двухкомпонентного основного элемента телеобъектива второй компонент выбирают с таким расчетом, чтобы в 4 раза уменьшить сферическую абберацию первого компонента. Но при этом он сам вносит абберацию того же порядка, которая к тому же увеличивается фокусирующей линзой. Один из путей решения подобной задачи заключается в том, чтобы выбрать для второго компонента объектива такое устройство, при котором он имел бы минимальную сферическую абберацию. Оптические системы с минимальной сферической абберацией называют апланатами.

Для коррекции хроматизма возможны различные варианты; один из наиболее простых — хроматизм положения каждой склейки исправляется самостоятельно. Остаточный хроматизм положения основного элемента объектива должен компенсироваться хроматизмом положения фокусирующей линзы.

В последние годы при расчете зрительных труб (например, у теодолита Т2) применялся метод исправления вторичного спектра за счет перераспределения хроматизма положения между основным и фокусирующим компонентами телеобъектива. Однако исправление вторичного спектра возможно только при большом перераспределении оптических сил между линзами, что, в свою очередь, осложняет полное исправление монохроматических аббераций в основном компоненте. Вследствие же необходимости опираться на стандартные сорта стекол этот путь не вполне целесообразен.

Глава 4

ЛИНЕЙНЫЕ И КРУГОВЫЕ ШКАЛЫ. ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 27. ЛИНЕЙНЫЕ И КРУГОВЫЕ ШКАЛЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ, ИХ НАЗНАЧЕНИЕ, ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Шкалы являются необходимой частью геодезических приборов. Они служат мерами, с которыми сравнивают измеряемые величины.

Шкала представляет собой систему штрихов, нанесенных на какой-либо поверхности и расположенных нормально к ли-

нии шкалы, называемой осевой. В зависимости от формы этой линии шкалы разделяют на линейные и криволинейные. Частным случаем криволинейных шкал являются круговые. Они широко применяются в геодезических угломерных приборах. Их называют лимбами.

Один из штрихов шкалы принимают за начальный. Он может располагаться по краям шкалы (в линейных шкалах) и в середине (в линейных и круговых — непрерывных шкалах).

Интервал между смежными штрихами шкалы называют делением, а величину τ , равную разности значений двух смежных штрихов x_i и x_{i+1} шкалы, называют ценой деления,

$$\tau = x_{i+1} - x_i. \quad (4.1)$$

Различают шкалы равномерные и неравномерные. В равномерных шкалах штрихи располагаются на равных расстояниях друг от друга. В геодезических приборах чаще применяют равномерные шкалы. Примером неравномерной шкалы могут служить шкалы вольтметров и амперметров.

Для удобства отсчитывания штрихи шкалы подписывают через определенные промежутки. Чаще подписывают штрихи, соответствующие целому числу единиц значений, например, сантиметров, дециметров, минут, градусов и т. д. Еще чаще подписывают лишь штрихи, значения которых кратны 5, 10 и т. д. Например, штрихи на лимбах, рассматриваемых при отсчитывании невооруженным глазом или через лупу, обычно подписывают через 5 или 10°. При этом возрастание отсчетов идет по часовой стрелке. Подписанные штрихи делают обычно длиннее остальных. Иногда для удобства отсчитывания делают несколько удлиненными и некоторые неподписанные штрихи. Например, если удлиняют на лимбе градусные штрихи, то несколько удлиняют и полуградусные.

Если при отсчитывании шкалу рассматривают в микроскоп, то штрихи подписывают таким образом, чтобы в поле зрения микроскопа было видно одновременно не менее двух подписанных штрихов. В некоторых особых случаях допускается, чтобы в поле зрения микроскопа был виден лишь один штрих. Но следует учитывать, что при этом возможны ошибки в отсчете. Обычно на лимбах, рассматриваемых при отсчитывании в микроскоп, подписывают каждый градус.

Шкалы на лимбах могут выполняться в виде одной дорожки штрихов равного периода или нескольких дорожек с различными функционально связанными между собой периодами штрихов. Разновидностью последнего типа лимбов являются кодирующие (кодовые) диски (лимбы), представляющие собой сочетание определенного числа концентрических дорожек. Каждая дорожка представляет собой комбинацию из прозрачных и непрозрачных участков, причем их угловой шаг для дорожки, расположенной к центру диска, в два раза больше шага для следующей от центра дорожки.

Кроме шкал в геодезических приборах применяют щели, растры и маски — специальные оптические детали, представляющие собой плоскопараллельные пластинки с нанесенными на них штрихами, делениями или отверстиями различной конфигурации.

К шкалам геодезических приборов предъявляют следующие основные требования:

1. Все деления основных отсчетных шкал приборов должны быть равны между собой. Неравномерными могут быть преимущественно второстепенные шкалы, например, содержащие поправочные значения к основным измеряемым.

2. Общая длина шкалы должна быть равна номинальной величине или отличаться от нее на пренебрегаемо малую величину. В противном случае надо вводить поправки в отсчеты по шкале. Очевидно, что для лимбов выполнение этого требования не обязательно.

3. Материал шкалы должен обеспечивать возможность нанесения штрихов необходимой толщины.

4. Материал шкалы должен обеспечивать сохранение в течение длительного времени всех первоначальных параметров шкалы.

5. Центр круговых шкал (лимбов), лежащий в точке пересечения направлений всех штрихов, должен совпадать с осью вращения шкалы.

§ 28. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ШТРИХОВ НА ШКАЛАХ. ПОНЯТИЕ ОБ ОШИБКАХ НАНЕСЕНИЯ ШТРИХОВ И СПОСОБАХ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Шкалы геодезических приборов наносят, как правило, на одном куске дерева, металла или стекла. Дерево используют при изготовлении реек. Металлическим основанием для шкал служат серебряно-медный сплав (серебра до 90 %), нейзильбер (Cu — 65 %, Ni — 15 %, Zn — 20 %), латунь или инвар. Стекланные шкалы делают на стекле марки БК-10, позволяющем наносить тонкие штрихи. Очень точные шкалы делают на кварцевом стекле, отличающемся малым коэффициентом линейного расширения (около 0,5 мкм/м×градус).

Штрихи на шкалы наносят делением или копированием. Деление шкал выполняют специальными машинами, которые подразделяют на ручные, полуавтоматические и автоматические. В ручных делительных машинах подачу разделяемой шкалы и приведение в действие механизма, наносящего штрихи, выполняют вручную и раздельно. В полуавтоматических делительных машинах операции подачи и нанесения штрихов выполняют хотя и вручную, но от одной рукоятки.

Высокоточные и точные делительные машины устанавливают на железобетонном основании, заложенном на 2—3 м

ниже земной поверхности и изолированном от вышележащих слоев почвы и пола здания.

Штрихи коротких шкал на стекле наносят на малых полуавтоматических делительных машинах алмазным резцом (при толщине штрихов до 3 мкм) или травлением в парах концентрированной плавиковой фтористоводородной кислоты после нарезания резцом по тонкому восковому слою, предварительно нанесенному на стекле (при толщине штрихов свыше 3—4 мкм). Пчелиный воск, которым покрывают стекло перед делением, подвергают длительной варке (до 120 ч) при температуре 200 °С.

Сразу же после травления деталь тщательно промывают в проточной воде. Воск смывают бензином, а штрихи заполняют черным составом краски и лака. Дополнительно в штрихи лимба втирают мелкий порошок графита. После просушки шкалу тщательно протирают. Краска остается только в штрихах и цифрах.

На поверхность шкал, являющихся одновременно и зеркалом, наносят слой серебра, покрываемый для защиты медью или лаком. Штрихи толщиной до 1 мкм наносят напылением хрома в вакууме после нарезания штрихов резцом по слою специального лака, предварительно нанесенного на поверхность заготовки шкалы. После удаления лака на шкале остаются штрихи, образованные хромовым покрытием. Допускаемая ошибка в нанесении штрихов таких шкал обычно 1—2 мкм, поэтому в помещениях, где производится точное деление шкал, поддерживается постоянная температура. Кроме того, высокоточные продольные делительные машины имеют приспособления, автоматически компенсирующие влияние отклонения температуры, при которой работает машина, от температуры, при которой изготовлен ее ведущий винт.

Штрихи на лимбах нарезают на круговых делительных машинах и обрабатывают аналогичным образом.

На стеклянные шкалы иногда наносят двойные штрихи (лимбы теодолитов Т2), что позволяет повысить точность отсчитывания.

Штрихи шкал металлических контрольных линеек и инварных проволок наносят при помощи высокоточных делительных машин резцом. Толщина штрихов шкал, рассматриваемых в лупу, 0,05 мм, а рассматриваемых невооруженным глазом 0,1—0,15 мм. Допускаемая ошибка делений 5—10 мкм.

Копирование шкал производят механическим, фотомеханическим и фотографическим способами.

Механическим способом штрихи копируют на заготовку шкалы с трафарета (шаблона). Так изготавливают нивелирные рейки. Трафарет делают из металлической ленты или из плотной, но тонкой бумаги, пропитанной вязким льняным маслом. Недостаток бумажного трафарета состоит в том, что он неплотно прилегает к поверхности рейки и деформируется от

влажности. По трафарету можно наносить деления на 3-метровые рейки со средней квадратической ошибкой 0,05 мм на 1 м.

На инварную полосу высокоточных нивелирных реек деления наносят по инварному прорезному трафарету длиной 3 м. При этом применяют специальное устройство, обеспечивающее соответствующее натяжение рабочей инварной полосы и трафарета.

Шкалы на мерных металлических лентах и рулетках наносят также при помощи печати с последующим травлением.

При фотомеханическом способе с трафарета на заготовку, покрытую светочувствительным слоем, проектируют световую щель, заменяющую резец в механическом способе. Затем заготовку обрабатывают химическими реактивами.

Фотографическим способом изготавливают небольшие шкалы, растры, кодирующие диски и т. д. Сначала делают оригинал в большом масштабе. С оригинала получают негатив, с которого копируют фотографическим путем изображение на заготовку шкалы. При этом все ошибки составления оригинала уменьшаются во столько раз, во сколько оригинал больше исходной шкалы.

Нанесение штрихов шкал на делительных машинах сопровождается ошибками, обусловленными:

1) работой машины (деформации ее частей и узлов в процессе работы, ошибки движущего и режущего механизмов, колебания и деформации резца, трение и мертвый ход движущихся частей и т. д.);

2) ошибками установки заготовки для шкалы на столе машины;

3) последствиями сил внутреннего напряжения в материале шкалы;

4) температурными деформациями шкалы и т. д.

Нанесение штрихов шкал при помощи шаблонов сопровождается, кроме того, ошибками самого шаблона, причем их влияние носит систематический характер.

Разделяют ошибки общей длины шкалы и ошибки правильности разделения шкалы на части. Ошибку общей длины шкалы определяют при помощи компарирования, т. е. сравнения с эталоном. Ошибка положения отдельного штриха x шкалы, вызванная ошибкой общей длины шкалы, выразится формулой

$$\Delta x = \frac{\Delta}{l} \cdot l_x, \quad (4.2)$$

где Δ — ошибка длины шкалы; l_x — расстояние от начала шкалы до штриха x ; l — длина всей шкалы.

В ряде случаев общая длина шкалы не имеет значения, например для круговых шкал (лимбов), так как их значение всегда равно 2π .

Ошибками разделения шкал на части являются ошибки штрихов относительно их расчетного положения, причем полная ошибка положения любого штриха складывается из систематической и случайной ошибок. Систематические ошибки круговых шкал носят, как правило, периодический характер.

Исследование положения штрихов шкал производится с целью:

- 1) введения поправок в результаты измерений;
- 2) установления пригодности прибора к выполнению работ данного класса точности;
- 3) контроля работы делительной машины или другого приспособления.

Исследования ошибок положения всех штрихов больших шкал, в том числе и лимбов, являются трудоемкой работой, поэтому исследуют ошибки не всех штрихов, а лишь расположенных через некоторый интервал, полагая, что ошибки промежуточных штрихов между проверенными изменяются по линейному закону.

При контроле шкал наиболее распространен способ сравнения с эталоном, т. е. с более точной шкалой. Если ошибка сравнения допускается до величины 0,02 мм, то поправки в деления находят простым прикладыванием образцовой штриховой меры к исследуемой шкале. Так определяют ошибки делений нивелирных шашечных реек с помощью контрольной линейки.

Для более точных определений служат объект-микрометры (эталонные шкалы на стеклянной пластине), специальные компараторы с визуальными микроскопами (например, ИЗА-2, УИМ-21 и др.).

Исследование круговых шкал (лимбов) производится на устройстве, имеющем образцовый лимб, насаженный на ось. На эту же ось устанавливают исследуемый лимб. Над образцовым и исследуемым лимбами крепят по два микроскопа (рис. 60). Вращая пару лимбов и отсчитывая при этом по микроскопам, можно установить ошибки исследуемого лимба. В таком устройстве особенно важно, чтобы взаимное положение микроскопов в процессе исследований было неизменным.

Целый ряд способов исследований положения штрихов основан на измерении эта-

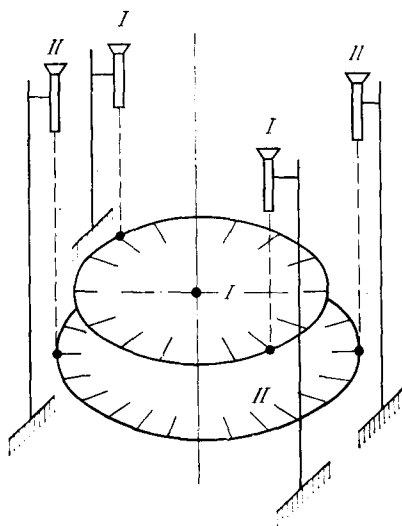


Рис. 60. Устройство для исследования круговых шкал

лонного интервала (угла) на разных частях шкалы (лимба) по различным программам с применением специального математического аппарата для обработки измерений [25].

На основании результатов исследований можно вычислить ошибки положения каждого или интересующего штрихов и, построив графики, найти величины длиннопериодических систематических ошибок. Короткопериодические ошибки, например, лимбов исследуют путем измерения интервалов между штрихами (один за другим) на протяжении 1—3°. По данным измерений строят график, из которого определяют амплитуды колебаний значений ошибок и период.

Существуют автоматические способы определения положения штрихов шкал. Например, в способе сравнения вместо визуальных микроскопов применяют фотоэлектрические, расположенные аналогичным образом. Положение штрихов шкалы отсчитывают на экране электронно-лучевой трубки. Аналогичным образом можно откладывать эталонный интервал (угол).

§ 29. ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА. ВЕРНЬЕР. ШТРИХОВОЙ МИКРОСКОП. ШКАЛОВОЙ МИКРОСКОП. МИКРОСКОП С ВИНТОВЫМ МИКРОМЕТРОМ

Отсчетные устройства геодезических приборов основаны на способности глаза с высокой точностью:

- 1) определять совпадения штрихов;
- 2) отличать симметричность расположения штрихов одной шкалы относительно штрихов другой;
- 3) отсчитывать десятые доли малого промежутка между штрихами.

Отсчетные устройства в геодезических приборах делятся на:

- 1) механические — верньер (пониус);
- 2) оптические — штриховой микроскоп, шкаловой микроскоп, микроскоп-микрометр (винтовой), оптический микрометр;
- 3) не требующие участия глаза наблюдателя в момент отсчитывания, — фотографические, фотоэлектрические, телевизионные, радиотехнические.

Верньер. Принцип работы верньера основан на свойстве глаза с большой точностью оценивать совпадение двух штрихов, являющихся продолжением друг друга. Прямой верньер содержит n делений, общая длина которых равна $n-1$ делениям основной шкалы (рис. 61). Если обозначить цену деления верньера через τ' , а цену деления основной шкалы через τ , то можно записать, что

$$n\tau' = (n-1)\tau, \quad (4.3)$$

$$\tau' = \frac{n-1}{n} \tau,$$

$$t = \tau - \tau' = \tau/n.$$

Величина t обозначает разность цены деления основной шкалы и цены деления верньера и определяет точность последнего. Следовательно, если $n=10$, то

$$t = 0,1\tau. \quad (4.4)$$



Рис. 61. Прямой верньер

Отсчеты по верньеру производят следующим образом. Требуется определить промежуток AO между младшим штрихом шкалы A и нулевым штрихом верньера. Пусть штрих верньера с номером K совпадает со штрихом основной шкалы. Тогда

$$AO = K\tau - K\tau' = Kt = 0,1\tau K,$$

согласно рис. 61 отсчитываем следующую величину — 3,6, так как $A=3$, а $AO=0,1 \times 1 \times 6=0,6$. Если ни один штрих верньера не совпадает ни с одним штрихом основной шкалы, то берут среднее из отсчетов, соответствующих двум соседним штрихам верньера, наиболее близким к совмещению со штрихами основной шкалы. Для более уверенного отсчитывания по верньеру иногда используют лупы.

Применяют также обратные верньеры, содержащие n делений, общая длина которых равна $n+1$ делениям основной шкалы.

Верньеры должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) толщина штрихов шкалы верньера и основной шкалы должна быть одинакова;
- 2) толщина штрихов не должна превышать удвоенной точности верньера;
- 3) зазор между шкалой верньера и основной шкалой не должен превышать 0,5 ширины штриха.

Верньеры можно применять для отсчитывания линейных и угловых мер. Раньше они применялись в теодолитах с металлическими кругами. В настоящее время их применяют в штангенциркулях, простейших угловых измерительных приборах, при отсчитывании по рейке в дальномерях двойного изображения и др.

Штриховой и шкаловой микроскопы. В качестве измерительной части в микроскопах (см. гл. 3) могут быть использованы штрих (индекс) или шкала. В первом случае микроскоп называют штриховым или микроскоп-оценщик, во втором — шкаловым. Коллектив, несущий штрих (индекс) или шкалу, помещают в микроскопе в плоскости изображения шкалы (лимба) какого-либо измерительного прибора, создаваемого объективом микроскопа.

В штриховом микроскопе производят оценку промежутка между индексом и ближайшим штрихом шкалы (лимба). Опытным установлено, что увеличение микроскопа должно быть

таким, чтобы видимая величина интервала была 1,5—2,0 мм, а видимая толщина индекса должна соответствовать 0,1 интервала.

Увеличение шкалового или штрихового микроскопа рассчитывают по формуле

$$\Gamma_m = \beta \Gamma = \frac{\Delta}{\delta} \Gamma,$$

где Γ — увеличение окуляра микроскопа, $\Gamma = 250/f_{ок}$; β — увеличение объектива микроскопа, $\beta = \Delta/\delta$; δ — интервал шкалы (лимба) измерительного прибора; Δ — линейная величина изображения того же интервала.

Рен шкалового микроскопа — несоответствие видимой длины шкалы измерительной части микроскопа с видимой величиной интервала шкалы (лимба) измерительного прибора.

Штриховые микроскопы применяют в теодолитах малой точности Т30, Theo-120. Шкаловые микроскопы применяют в теодолитах Т5, Т15, 2Т5К, Theo-020. Их конструкции в комплекте со всей отсчетной частью теодолитов даны в 9 главе книги.

Для отсчитывания по шкалам инварных проволок и жезлов при высокоточных геодезических измерениях и в лабораторных компараторах применяют отсчетный микроскоп МИР-2, имеющий окулярную шкалу.

Микроскоп состоит из выдвижного тубуса, вставленного в корпус. На тубусе нанесены деления от 130 до 190 мм. В верхнюю часть тубуса вставлен окуляр с отсчетной шкалой. В нижнюю часть корпуса ввинчен ахроматический объектив. Корпус снабжен хомутом для крепления на стойках штативов. Хомут можно передвигать вдоль корпуса и закреплять в любом его месте. Выдвижной тубус позволяет изменять расстояния между объективом и окуляром и тем самым изменять увеличение микроскопа от 19^x при длине тубуса 130 мм до 33^x при длине тубуса 190 мм, а следовательно, и цену деления окулярной шкалы.

Приведем примерные значения цены деления окулярной шкалы в зависимости от длины тубуса:

Длина тубуса, мм	130	140	150	160	170	180	190
Цена деления шкалы, мм	0,058	0,053	0,049	0,045	0,041	0,038	0,036

Точную цену деления можно определить при помощи объект-микрометра, представляющего собой образцовую миллиметровую шкалу, или какой-либо другой точной шкалы. Пределы измерений микроскопом — 0,015—6 мм, габаритные размеры $134 \times 67 \times 34$ мм, масса — 0,29 кг.

Микроскоп предназначен для измерений расстояний между штрихами шкал приборов.

Микроскоп с винтовым микрометром. Винтовой микрометр микроскопа (рис. 62, а) состоит из точного микрометренного винта 7, перемещающего каретку 6, с биссектором. Линейное перемещение каретки определяют по барабану 8 со шкалой, со-

держашей 60 и 100 делений. Для учета числа полных оборотов барабана служил гребенка 4 или специальная шкала, расположенная на диафрагме 3.

Для устранения мертвого хода каретка микрометра прижимается к виткам винта пружинами 5.

Микрометр укрепляют на оправе микроскопа так, чтобы биссектор перемещался в плоскости изображения штрихов шкалы 1, даваемого объективом 2 микроскопа.

При измерениях расстояния от нуля-пункта микрометра до изображения ближайшего штриха шкалы 1 совмещают с этим штрихом биссектор нитей микрометра и отсчитывают по гребенке число полных оборотов винта, а по шкале барабана — доли оборота.

Величину смещения каретки можно подсчитать по формуле

$$\Delta l = \frac{h}{2\pi} \Delta\varphi, \quad (4.5)$$

где h — шаг винта, обычно $h = 0,25$ мм; $\Delta\varphi$ — угол поворота винта.

Колебания шага винта допускают не более 1,5 мкм.

Увеличение объектива $V_{об}$ и окуляра $V_{ок}$ микроскопа подсчитывают по формуле [25]

$$\left. \begin{aligned} V_{об} &= h \cdot n / K \cdot l; \\ V_{ок} &= 1000 \omega K / \rho, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где $n = v/\mu$ (v — цена деления основной шкалы); μ — цена деления барабана микрометра; K — число делений, на которое разделена окружность барабана микрометра; l — линейная величина деления основной шкалы; ω — разрешающая способность глаза, равная $40-60''$.

Общее увеличение микроскопа равно

$$V = 1000hn\omega/l \cdot \rho. \quad (4.7)$$

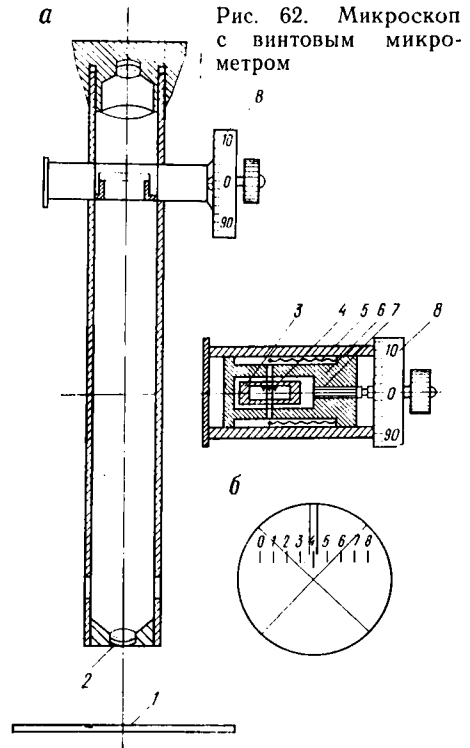


Рис. 62. Микроскоп с винтовым микрометром

При установке микроскопа с винтовым микрометром перемещением окуляра добиваются резкой видимости биссектора, а затем весь корпус устанавливают так, чтобы резко была видна рассматриваемая в микроскоп шкала.

Рен микроскопа должен лежать в допустимых пределах, т. е. отклонение значения фактической цены деления от номинального не должно превышать точности отсчитывания.

Микроскопы с винтовым микрометром применяют в оптико-механических компараторах для выполнения отсчетов по шкалам проволок с ошибкой 0,001 мм, в различных приборах нестандартизованного типа (мерных жезлах и проволоках, оптических центрировочных приборах и др.).

В нашей стране выпускают специальную насадку МОВ-1-15 к микроскопу МИР-2, представляющую собой окулярный винтовой микрометр. Насадка состоит из кожуха, окуляра с увеличением $15\times$, отсчетного приспособления, состоящего из микрометрического винта с отсчетным барабаном. Насадка надевается на тубус микроскопа МИР-2 основанием и закрепляется винтом. При этом окуляр микроскопа МИР-2 вынимается из тубуса.

В фокальной плоскости окуляра насадки расположена неподвижная шкала с делениями от 0 до 8, нанесенная на стеклянной пластинке, и подвижные перекрестие и биссектор, нанесенные на стеклянной пластине, перемещаемой при помощи микрометрического винта путем вращения отсчетного барабана. При повороте барабана на один оборот биссектор и перекрестие в поле зрения окуляра (рис. 62, б) переместятся на одно деление шкалы. Отсчет по барабану складывается из номера младшего штриха из двух, между которыми расположен биссектор, и отсчета по барабану. Так как положение тубуса в микроскопе МИР-2 может быть различным, цену деления барабана насадки необходимо определять при помощи объект-микрометра или другой образцовой шкалы.

Габаритные размеры насадки $60 \times 45 \times 80$ мм, масса 212 г.

Так как у отсчетного барабана может быть мертвый ход, измерения рекомендуется выполнять всегда на ввинчивание или вывинчивание.

Винтовые микрометры применяют в зрительных трубах для измерения небольших углов между направлением на наблюдаемый предмет и визирной осью трубы, а также для определения внецентренности расположения наблюдаемой точки в оптических центрирах. В этих случаях микрометр располагают в окулярном колене трубы в плоскости изображения предмета, даваемого объективом трубы.

§ 30. ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОМЕТРЫ

Оптические микрометры являются точными отсчетными приспособлениями, имеющими по меньшей мере одну подвижную оптическую деталь и связанную с ней шкалу для отсчитывания.

В геодезических приборах находят применение одинарные и двойные оптические микрометры, которые подразделяются на клинсовые, с плоскопараллельной пластинкой и линзовые. По своей конструкции оптические микрометры могут быть:

- а) с одной или двумя плоскопараллельными пластинками, вращаемыми относительно неподвижной оси;
- б) с оптическими клиньями, перемещаемыми поступательно;
- в) с оптическими клиньями, вращаемыми вокруг оси;
- г) с линзами, перемещаемыми перпендикулярно к своей оптической оси.

Простейший оптический микрометр с одной плоскопараллельной пластинкой (ППП) основан на свойстве последней смещать луч света параллельно на величину h пропорционально углу падения его на ППП [6], [13].

На рис. 63 представлена схема оптического микрометра с одной ППП. В микроскопе, имеющем в фокальной плоскости окуляра 4 неподвижную пластинку 3 с индексом J , между объективом 1 и этой пластинкой помещается ППП 2, вращаемая вокруг оси ss (рис. 63, а). При повороте пластинки толщиной d на угол α луч, идущий от штриха A , сместится на величину JA' (рис. 63, б). Подбором d и α можно совместить изображение штриха A с индексом J и определить величину смещения изображения этого штриха. Для определения величины смещения механизм поворота имеет круговую шкалу.

Анализ формулы (3.96) показывает, что условие прямой пропорциональности $h = K \cdot \varepsilon_1$ сохраняется только при малых значениях ε_1 ($\varepsilon_1 \leq 10 - 15^\circ$).

Оптический микрометр с двумя наклоняющимися плоскопараллельными пластинками служит для совмещения изображений штрихов противоположных частей лимба.

При наклоне одной пластинки другая наклоняется в противоположную сторону. С пластинками посредством механизма соединяется круговая шкала для фиксации величины смещений изображений штрихов лимба. Поворот пластинок на наибольший угол вызывает взаимное смещение изображения штрихов на один интервал между ними.

Наиболее сложным при создании такого микрометра является механизм для преобразования наклона пластинок в равномерный поворот отсчетной шкалы. В конструкции микрометров высокоточных теодолитов наклон пластины осуществляется механизмом, обеспечивающим увеличение угловой скорости поворота шкалы в 60 раз. Этот механизм (рис. 64) состоит из двух рычагов, вращающихся вокруг осей c_1 и c_2 , каждый из которых несет плоскопараллельную пластинку. Концы рычагов a_1 и a_2 входят на диске в паз, имеющий форму спирали Архимеда. При вращении диска вокруг оси O концы рычагов смещаются пазом пропорционально углу поворота диска, так как уравнение спирали Архимеда в полярных координатах имеет вид

$$\rho = a\varphi/2\pi.$$

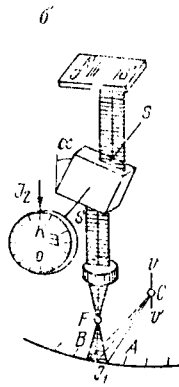
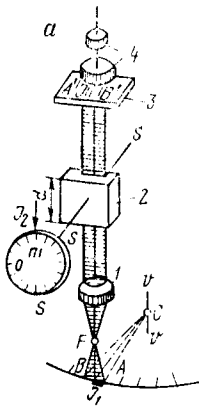


Рис. 63. Схема микрометра с одной плоскопараллельной пластинкой:
 J_1 — индекс микроскопа, J_2 — индекс шкалы микрометра, vv — вертикальная ось вращения теодолита

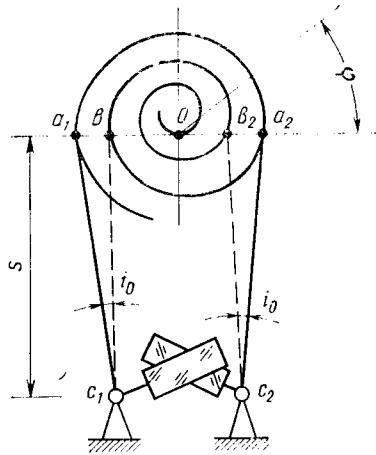


Рис. 64. Механизм вращения двух плоскопараллельных пластинок

Следовательно, длина радиуса-вектора δ изменяется пропорционально изменению полярного угла φ . Оптический микрометр с двумя ППП применяется в высокоточных теодолитах, например, ОТ-02.

Оптический микрометр с поступательно перемещающимися клиньями основан на свойстве оптического клина отклонять луч света к своему основанию.

Из рис. 65 видно, что если отодвинуть клин 2 на некоторую величину l от его начального положения, то нижний клин отклонит луч вправо на угол $\delta = \theta (n-1)$, а верхний 1 — влево на такой же угол, в итоге луч сместится параллельно на величину $\Delta = ltg\delta$. Действие системы двух таких клиньев соответствует плоскопараллельной пластине (воздушной) с изменяющейся толщиной d .

В большинстве точных оптических теодолитов с двусторонней системой отсчитывания используется двойной клиновой микрометр (Т2, 2Т2, Theo-010 и т. п.). На рис. 66 показана схема микрометра теодолитов типа Т2. Микрометр состоит из двух пар оптических клиньев. Одна, нижняя пара, неподвижная, а вторая — верхняя пара — подвижная, вращением маховичка ее можно перемещать поступательно в вертикальном направлении. На рис. 66, а показано положение клиньев перед отсчитыванием, а на рис. 66, б — в момент отсчитывания. Шкала микрометра жестко скреплена с подвижными клиньями. Точность нанесения деления любого штриха относительно начального составляет 2 мкм, что соответствует ошибке отсчета в $0,03''$.

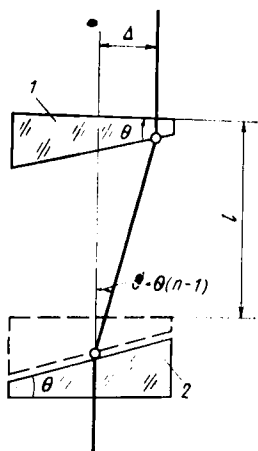


Рис. 65. Схема одностороннего клинового микроскопа

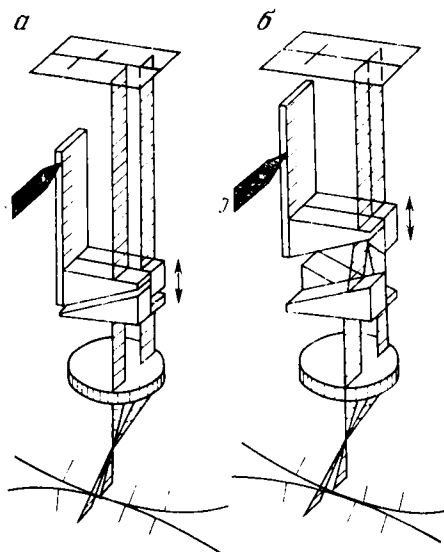


Рис. 66. Принцип действия двустороннего клинового оптического микрметра

Микрметр с вращающимися клиньями основан на вращении преломленного клином луча и выделении вторым вращающимся клином одной составляющей перемещения. Механизм вращения клиньев несложный, так как углы поворота их будут пропорциональны углам поворота диска или барабана с делениями.

В микрметре с подвижными полулинзами, помещенными перед объективом, при смещении одной полулинзы относительно другой меняется направление лучей и изображение предмета раздваивается. Линзовые микрметры применяются в дальномерах двойного изображения с переменным параллактическим углом.

Для изготовления микрметра строят его в виде системы из двух компонентов (в дальномерах двойного изображения каждый компонент называют компенсатором). Один компонент положительный, второй отрицательный. Вместе они образуют афокальную систему. Перемещение каждого компонента вызовет изменение параллактического угла φ ; вершина параллактического угла лежит вблизи подвижного компонента компенсатора. В зависимости от конструкции существует два вида микрметров. Первый вид микрметра принят в дальномерах, построенных по идее В. А. Белицына. Определяется перемещение только одной половины положительного компонента, индекс неподвижен и находится вне компонентов. В конструкции микрметра А. И. Захарова введены две одновременно перемещающиеся по-

лулинзы: отрицательная и положительная, что позволяет в два раза увеличить изменение параллактического угла. Совмещение изображений всегда производится в середине поля зрения.

Ниже представлены некоторые данные оптических микрометров с длиннофокусными полулинзами.

Максимальное перемещение компонента, мм	20	24	30
Максимальный угол, мин	17	40	45
Фокусное расстояние линз, мм	± 4000	± 4125	± 2235

§ 31. ПОНЯТИЕ О РАСЧЕТЕ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОМЕТРОВ

Ошибка отсчитывания в оптических теодолитах типа Т2 определяется точностью совмещения противоположных штрихов лимба, точностью отсчитывания десятых долей деления шкалы микрометра, качеством работы механизмов микрометра, величиной рена.

Ошибка совмещения противоположных штрихов лимба зависит от увеличения микроскопа, формы штрихов круга. Общее увеличение отчетного микроскопа можно определить по формуле [30]

$$\Gamma_m = \frac{P_r \cdot 250}{2m_0 r},$$

где $P_r \approx 10''$ — разрешающая способность невооруженного глаза при совмещении штрихов; 2 — коэффициент, учитывающий особенность совмещенного отсчета; r — радиус кольца делений горизонтального круга; 250 мм — расстояние наилучшего зрения; $m_0 = 0,34m_\beta$ — ошибка отсчитывания (для Т2 $m_\beta = 2''$; $m_0 = 0,68''$).

Учитывая эти параметры, для Т2 получим $\Gamma_m \approx 41^x$.

Общий коэффициент повышения точности $K_{\text{общ}}$ при отсчитывании по шкале микрометра будет

$$K_{\text{общ}} = \frac{P_r \cdot 250}{0,1m_\beta \cdot r},$$

где $P_r \approx 80''$ — разрешающая способность невооруженного глаза при оценке десятых долей интервала; $0,1m_\beta$ — допустимая ошибка отсчитывания по шкале микрометра.

Для Т2 получим $K_{\text{общ}} = \frac{80 \cdot 250}{0,1 \cdot 2'' \cdot 45} \approx 2200$.

Коэффициент K_m , показывающий, во сколько раз шкала микрометра должна быть длиннее максимального интервала измеряемого микрометром, определяется как

$$K_m = K_{\text{общ}} / \Gamma_m,$$

тогда

$$K_m = 2200 / 41 \approx 54.$$

В теодолитах типа Т2 применяется клиновой микрометр с поступательно перемещающимися клиньями, для которого [30]

$$K_m = l/\Delta'_i = l/\frac{\Delta l'}{\rho'} \beta = \frac{l}{2l(n-1)\theta} = \frac{1}{2(n-1)\theta} \approx \frac{1}{\theta},$$

где l — длина шкалы микрометра, жестко связанного с подвижными клиньями; Δ'_i — расстояние между соседними штрихами изображения лимба в плоскости шкалы микрометра; n — показатель преломления стекла клиньев микрометра (для стекла K_8 $n \approx 1,52$); θ — преломляющий угол клина; $\Delta_i = 20''$ — цена делений на лимбе; 2 — коэффициент, учитывающий одновременное противоположное действие двух подвижных клиньев; β — увеличение объектива микроскопа.

Следовательно,

$$\theta = \frac{1}{K_m} \rho' = \frac{1}{54} \rho' \approx 63'.$$

Найдем число делений N шкалы микрометра по формуле

$$N = \frac{\Delta_i}{0,1m_{\beta} \cdot 10} = \frac{20 \cdot 60''}{0,1 \cdot 2'' \cdot 10} = 600,$$

где 10 — коэффициент, учитывающий, какую часть интервала на шкале микрометра можно оценить «на глаз».

Из габаритных соображений принимаем длину l шкалы микрометра равной 40 мм, тогда увеличение $\bar{\Gamma}$ окулярной части микроскопа будет равно

$$\bar{\Gamma} = \frac{N l'}{l} = \frac{600 \cdot 1}{40} = 15\times,$$

где $l' = 1$ мм — минимальная величина интервала между штрихами, допускающая оценку десятых долей.

Увеличение объектива микроскопа составит

$$\beta_{об} = \Gamma_m / \bar{\Gamma} = 41/15 \approx 2,73\times.$$

В высокоточных нивелирах используют микрометр с поворачивающейся плоскопараллельной пластинкой (ППП) перед объективом зрительной трубы.

Расчет микрометра начинают с определения допустимого угла наклона ППП

$$\epsilon_{доп} = 2 \cdot 100^\circ \sqrt{0,1m_h/\Delta_p},$$

где $\Delta_p = 5$ мм — цена деления шкалы рейки; 2 — коэффициент, учитывающий перемещение изображения рейки на одно деление шкалы при наклоне пластины на $\pm \epsilon_{доп}$, т. е. в обе стороны; m_h — средняя квадратическая ошибка определения превышения на станции ($m_h = 0,15$ мм для И-05).

Тогда

$$\epsilon_{доп} = 2 \cdot 100^\circ \sqrt{0,1 \cdot 0,15/5} \approx 11^\circ.$$

Затем определяют толщину пластинки

$$d = \frac{\Delta p n \rho^\circ}{(n - 1) \epsilon_{\text{доп}}},$$

где $n \approx 1,52$ — показатель преломления стекла К8, следовательно,

$$d = \frac{5 \text{ мм} \cdot 1,52 \cdot 57,3^\circ}{(1,52 - 1) \cdot 11^\circ} \approx 76 \text{ мм}.$$

Если использовать для наклона пластинки тангенциальный реечный механизм (рис. 67), можно в три раза увеличить $\epsilon_{\text{доп}}$ и соответственно уменьшить d до $25 \div 30$ мм.

Можно еще в $2,5 \div 3$ раза уменьшить толщину и диаметр пластинки микрометра, если поместить ее между двумя телескопическими системами. Однако чтобы цена деления микрометра с пластинкой внутри трубы не зависела от расстояния до рейки, необходима весьма тщательная коррекция сферической и сферохроматической аберраций и точная ее сборка. Задается допуск и на клиновидность ППП.

Ошибка отсчитывания по шкале микрометра нивелира Н05 должна быть около 0,01 мм, число делений шкалы микрометра равно

$$N = \frac{\Delta p}{10 \cdot 0,01} = \frac{5}{10 \cdot 0,01} = 50,$$

где 10 — коэффициент, учитывающий, какая доля интервала шкалы микрометра может оцениваться «на глаз». Для однозначного отсчитывания необходимо видеть шкалу микрометра примерно с 20 делениями.

Общее необходимое увеличение Γ_m при отсчитывании по шкале микрометра можно определить исходя из оптимального расстояния между штрихами шкалы при оценке десятых долей деления невооруженным глазом

$$\Gamma_m = \frac{1,5N}{l_m} = \frac{1,5 \cdot 50}{20} = 3,75 \times,$$

где l_m — длина шкалы,

$$l_m = 2R \operatorname{tg} \epsilon_{\text{доп}},$$

R — расстояние между тангенциальной рейкой (см. рис. 67) и осью вращения ППП (для нивелиров типа Н-05 $R=32$ мм);

$$l_m = 2 \cdot 32 \cdot \operatorname{tg} 16,5^\circ \approx 20 \text{ мм}.$$

При юстировке нивелира рен микрометра исключается путем изменения расстояния R .

Механизм, обеспечивающий наклон ППП микрометра нивелира, рассчитывается так, чтобы обеспечивалось согласование чувствительности пальцев наблюдателя с точностью визирова-

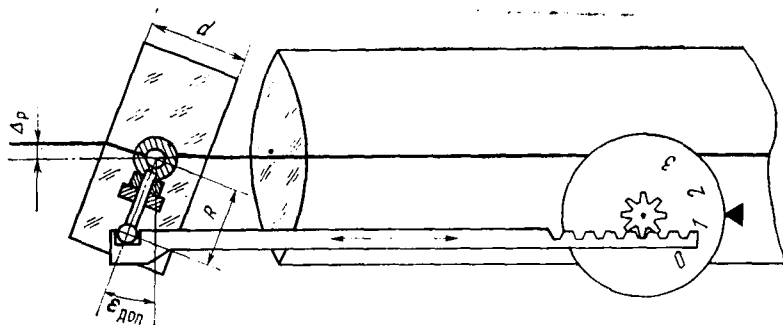


Рис. 67. Тангенциальный реечный механизм

ния на нивелирную рейку. Диаметр рукоятки выбирается таким образом, чтобы при измерении при помощи микрометра во всем диапазоне шкалы наблюдатель не перехватывал пальцы руки. Для обеспечения большего удобства целесообразно рукоятку микрометра и элевационного устройства выполнять соосными.

Глава 5

УРОВНИ И КОМПЕНСАТОРЫ НАКЛОНА

§ 32. УРОВНИ, ИХ ТИПЫ И УСТРОЙСТВО

Уровнями называются устройства для установки линий или плоскостей в горизонтальное или вертикальное положение.

Уровни предназначены для ориентирования вертикальных (горизонтальных) осей геодезических приборов относительно отвесной линии. Уровни могут служить также для измерения малых вертикальных углов.

Основными частями уровня являются: ампула, наполненная жидкостью; оправка для предохранения ампулы и для ее установки на приборе. В зависимости от формы ампулы уровни бывают круглые и цилиндрические. Внутренняя часть ампулы круглого уровня имеет сферическую поверхность. Осью круглого уровня является радиус сферической поверхности, проходящий через нуль-пункт.

Ампулы цилиндрических уровней изготавливают из молибденового стекла, которое относится к группе баросиликатных стекол. Молибденовое стекло имеет большую твердость, меньшую шероховатость шлифованной поверхности, в меньшей степени адсорбирует газы. Все это значительно снижает возможность образования на внутренней поверхности ампулы твердых налетов перекисных соединений.

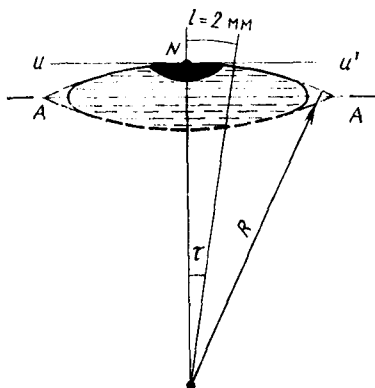


Рис. 68. Цилиндрический уровень

Проведем нормаль к внутренней поверхности цилиндрической ампулы в центре среднего штриха (штрихи наносятся обычно через 2 мм) в точке N . Точка N называется нуль-пунктом уровня. Касательная к внутренней поверхности ампулы в точке N называется осью цилиндрического уровня. При симметричном расположении пузырька уровня относительно нуль-пункта ось цилиндрического уровня занимает горизонтальное положение. Угол, на который надо наклонить ампулу, чтобы пузырек уровня переместился на одно деление, называется ценой деления (τ)'' уровня.

Очевидно,

$$\tau'' = \frac{l}{R} \rho'', \text{ где } l = 2 \text{ мм.}$$

При цене деления уровня, например, $\tau = 20''$ радиус кривизны ампулы должен быть

$$R = \frac{l \cdot \rho''}{\tau''} = \frac{2 \cdot 206265''}{20''} = 20,626 \text{ м.}$$

В уровнях, применяемых в геодезических приборах, используются ампулы: цилиндрические простые (АЦП), компенсированные (АЦК), регулируемые (АЦР).

Ампулы типа АЦП (рис. 69, а) выпускаются с ценой деления от 10 до 90''; диаметр таких ампул колеблется в пределах от 7,5 до 14 мм, а длина — от 23 до 84 мм.

Ампулы типа АЦК (рис. 69, б) выпускаются с ценой деления от 4 до 40''. Диаметр ампул колеблется от 11 до 14 мм, а длина — от 72 до 124 мм. Внутри ампулы помещена стеклянная компенсационная палочка, диаметр которой приблизительно равен половине наружного диаметра ампулы, а длина — незначительно короче ампулы. Назначение компенсационной па-

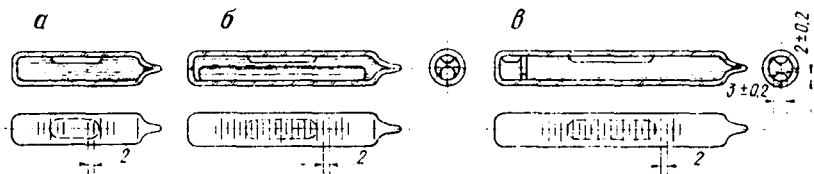


Рис. 69. Ампулы цилиндрических уровней

лочки — уменьшить объем жидкости с целью уменьшения температурных изменений длины пузырька.

Цилиндрические камерные ампулы (АЦР) с регулируемой длиной пузырька имеют (рис. 69, в) в конце ампулы неполную стеклянную перегородку, образующую камеру. В камеру, наклоняя ампулу, перемещают часть пузырька, регулируя таким образом его длину.

В некоторых случаях (например, для подвешенного маркшейдерского теодолита) применяют реверсивные ампулы, имеющие две шкалы на противоположных поверхностях ампулы, причем положение нуля-пункта одной шкалы соответствует нулю-пункту второй.

Ампула уровня должна быть закреплена в своей оправе неподвижно. Конструкция юстировочного устройства должна гарантировать неизменность положения оси уровня во время измерений и при переносе прибора с одной точки на другую.

Наиболее простой способ закрепления ампулы в оправе — заливка гипсом (для уровней с ценой более 30"). Для уровней с ценой деления менее 20" применяют конструкцию «плавающего» соединения ампулы с оправой. На ампулу надевают с двух концов колпачки с тремя сферическими выдавками из тонкой латуни или алюминиевого сплава, закрепленные на ней лаком или глетоглицериновым клеем. Колпачки плотно прижимают ампулу к оправе.

На рис. 70 показано несколько вариантов конструкций соединения оправы уровня с неподвижным корпусом. Один конец оправы соединяется с корпусом шарнирно, а второй — хвостовик связан с корпусом через юстировочные винты или через рычажное устройство. Шарнир может быть сферическим (рис. 70, а, в, д, е), на центрах (рис. 70, б) или полужестким, в котором гибким элементом служит сам корпус уровня (рис. 70, г). В случае применения сферического шарнира вводится элемент, который устраняет зазор в шарнире. В теодолите Т30 таким элементом является регулировочная гайка (см. рис. 70, а).

С целью увеличения точности и удобства установки пузырька уровня в нуль-пункт широко применяются контактные уровни (рис. 71), которые снабжаются специальным оптическим устройством, включающим блок призм-сферондов 2, 3 с системой дополнительных призм 1 и микрообъективов для наблюдения изображения 5 противоположных концов пузырька ампулы 4

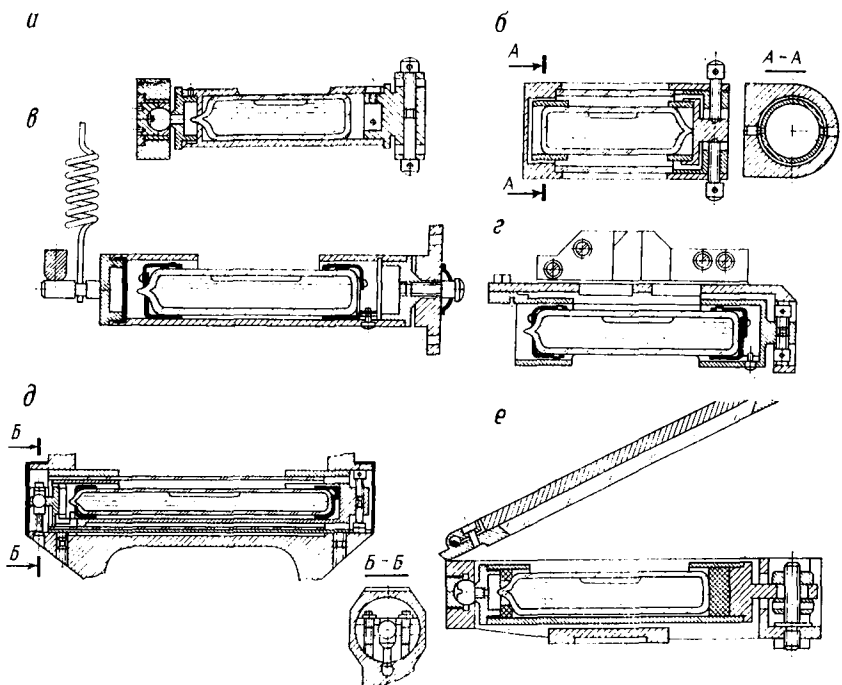


Рис. 70. Конструкции уровней

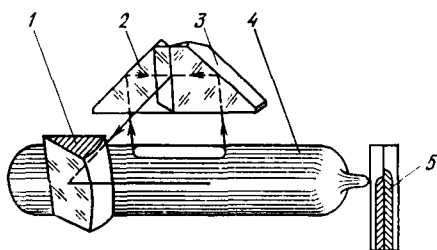


Рис. 71. Контактный уровень

уровня. Контактные уровни при одной и той же цене деления уровня позволяют с большей точностью установить пузырек уровня в нуль-пункт, чем обычные, так как взаимное расхождение двух концов пузырька уровня хорошо заметно.

Ошибка установки визирной оси в горизонтальное положение с помощью контактного уровня, рассматриваемого без увеличения, может быть вычислена по формуле проф. А. С. Чеботарева

$$m_y = 0,14'' + 0,012\tau'' \quad (5.1)$$

В зрительных трубах нивелиров концы пузырька уровня рассматриваются под увеличением, тогда

$$m_y = 0,14'' + \frac{0,012\tau''}{\beta} \quad (5.2)$$

Увеличение β выбирается так, чтобы второй член формулы (5.2) был меньше первого члена не более чем в 3 раза:

$$\frac{0,012\tau''}{\beta} \approx \frac{0,14}{3}; \quad \beta \approx \frac{0,036\tau''}{0,14} \approx 0,025\tau''.$$

При $\tau = 15''$, $\beta = 3,8\times$, при $\tau = 10''$, $\beta = 2,5\times$.

При рассматривании концов пузырька уровня в поле зрения окуляра зрительной трубы

$$\beta = \beta_{к.с} \Gamma_{ок}, \quad (5.3)$$

где $\beta_{к.с}$ — увеличение микрообъектива, входящего в контактную систему; $\Gamma_{ок}$ — увеличение окуляра.

$$\text{При} \quad \Gamma_{ок} = 20\times, \quad \beta \approx 3,8\times \quad \beta_{к.с} \approx 0,19\times.$$

Кроме жидкостных уровней, в настоящее время все более широкое применение находят электронные уровни (рис. 72). Например, принцип их работы (рис. 72, а) может быть основан на изменении индуктивностей L_1 и L_2 катушек K_1 и K_2 , выполненных на ферритовых сердечниках, при изменении их положения относительно маятника, подвешенного в зазоре между катушками индуктивности [21].

Катушки индуктивности включены в мостовую схему (рис. 72, б). При равенстве индуктивностей ток в диагонали моста становится равным нулю. К другой диагонали подводится переменное напряжение. Наклон основания, на котором укреплен уровень, отсчитывают по шкале микроамперметра. Электронные уровни могут быть очень точными ($0,1''$), если их электронные схемы выполнены по принципу мостовых схем. Однако на их точность оказывают влияние изменение влажности, температуры и другие факторы. Отметим, что это относится и к жидкостным уровням.

Исследование уровней производится с целью определения цены деления, чувствительности, качества и правильности шлифовки внутренней поверхности. Наиболее точно можно определять τ'' на специальных приборах — экзаменаторах. Принципиальное устройство экзаменаторов простое (рис. 73): на станине 1, снабженной тремя подъемными винтами 8, и горизонтальной осью 3, установлены уровень 2 и пластина 7, которую можно наклонять с помощью наводящего устройства 5, а величину наклона фиксировать по лимбу 6, каждое деление которого соответствует малому углу наклона, например $1 \div 5''$. В экзаменаторе пластину 7 наклоняют с помощью высоточного винта, а угол наклона фиксируют по показаниям оптиметра.

Исследуемый уровень 4 располагается на пластине 7; определяв величину перемещения n пузырька уровня по делениям на ампуле и измерив угол наклона пластины $\gamma = (a_2 - a_1)$, легко

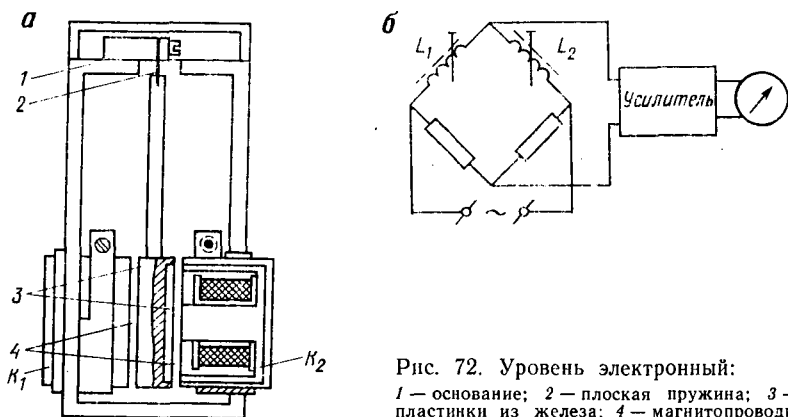


Рис. 72. Уровень электронный:
1 — основание; 2 — плоская пружина; 3 —
пластинки из железа; 4 — магнитопроводы

подсчитать цену деления уровня

$$\tau = \frac{(a_2 - a_1) \mu}{n},$$

где a_2 и a_1 — отсчеты по лимбу экзаменатора; μ — цена одного деления лимба; n — величина перемещения пузырька в делениях уровня.

В полевых условиях цену деления уровня нивелира определяют по рейке. При этом делают два отсчета по уровню при двух положениях пузырька и соответствующие отсчеты (l_1 и l_2) по рейке; зная расстояние s до рейки, величину τ вычисляют по формуле

$$\tau'' = \frac{(l_1 - l_2) \rho''}{s \cdot n}, \quad (5.4)$$

где n — число делений, на которое сместился пузырек уровня при наклоне визирной оси нивелира.

Цена деления уровня при алидаде вертикального круга теодолита может быть определена по отсчетам по вертикальному кругу.

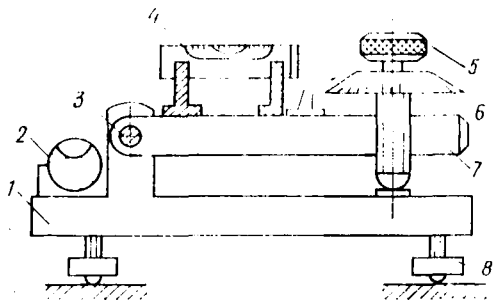


Рис. 73. Экзаменатор

Чувствительность уровней — важная характеристика, которая определяется наименьшим углом, на который надо наклонить уровень, чтобы пузырек получил смещение, заметное на глаз. Она зависит от цены деления уровня, качества обработки внутренней поверхности ампулы, вязкости наполнителя и длины пузырька.

§ 33. КОМПЕНСАТОРЫ НАКЛОНА

В настоящее время широкое применение находят геодезические приборы (нивелиры, теодолиты и др.), в которых уровень заменяется автоматическим устройством — компенсатором наклона визирной оси, или «регулятором» положения визирной оси. Нивелир снабжается только круглым уровнем для грубого приведения визирной оси в горизонтальное положение, горизонтальность линии визирования обеспечивается с необходимой точностью автоматическим компенсатором наклона. Компенсаторы наклона позволяют повысить точность и производительность труда, дают возможность работать на неустойчивых грунтах.

Сущность работы компенсаторов наклона заключается в следующем (рис. 74, а). При горизонтальном положении визирной оси трубы по средней нити сетки производят правильный отсчет A , соответствующий горизонту инструмента. При наклоне зрительной трубы на угол γ горизонтальный луч, соответствующий отсчету A , смещается вверх или вниз относительно средней нити сетки на величину

$$C_0 C_1 = \Delta = f \sin \gamma \approx f \gamma / \rho'' . \quad (5.5)$$

Для того чтобы отсчет A по средней нити сетки не изменялся, нужно либо изменить положение сетки (механический компенсатор) нитей из положения C_0 в C_1 (рис. 74, б), либо изменить направление горизонтального луча, соответствующего отсчету A , так, чтобы этот луч снова попал на среднюю нить сетки (рис. 74, в) (оптико-механический компенсатор).

Смещение сетки нитей или изменение положения визирного луча осуществляется с помощью расположенного в точке B специального устройства — компенсатора наклона зрительной трубы на величину

$$\Delta = s \sin \beta .$$

Отсюда следует основное уравнение компенсации

$$f \sin \gamma = s \sin \beta . \quad (5.6)$$

Существует еще одна группа компенсаторов — жидкостные, основанные на свойстве поверхности жидкости под действием силы тяжести устанавливаться нормально к отвесной линии. В геодезических приборах жидкостные компенсаторы применя-

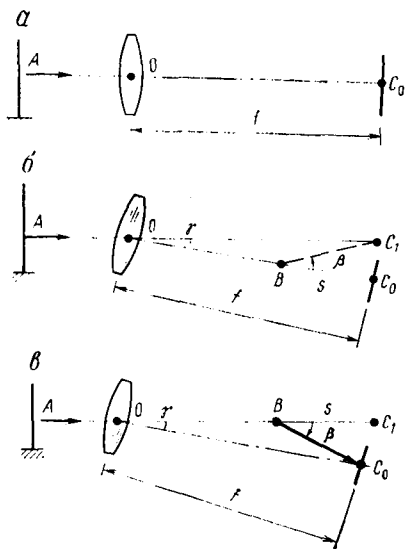


Рис. 74. Принцип действия компенсаторов

ются редко и действуют, как правило, также по схеме оптико-механических компенсаторов.

Угол β отклонения луча и местоположение точки B рассчитываются таким образом, чтобы удовлетворялось основное уравнение компенсации (5.6). Отношение $f/s = \beta/\gamma = n$ называется угловым увеличением компенсатора. Для того чтобы геометрические размеры компенсатора были невелики, точку B стремятся расположить внутри зрительной трубы ($n \geq 1$).

Компенсаторы наклона содержат подвижный элемент, находящийся в определенном положении под действием силы тяжести, неподвижный оптический элемент (например, отклоняющую призму) и

демпфирующее устройство (демпфер) воздушного или магнитного типа. Жидкостные демпферы не используются в нивелирах с компенсатором.

В геодезии наиболее широко применяются оптико-механические компенсаторы маятникового типа, которые, в свою очередь, подразделяются на линзовые, зеркальные, призмённые. В мире выпущено более 70 типов компенсаторов, поэтому вышеприведенное разделение на виды весьма условно.

Все компенсаторы можно сгруппировать в соответствии с их расположением в нивелире:

- с компенсатором перед объективом — НСМ2А (СССР);
- с подвижным объективом или сеткой нитей — Сальмойраги 5172 и 5173 (Италия);
- с компенсатором между основным и фокусирующим компонентами телеобъектива — Ni-002 (ГДР), Ni-A31 (ВНР), Нипон (Япония) и др.;
- с компенсатором между фокусирующей линзой и сеткой нитей — Ni-025, Ni-007 (ГДР), Ni-B3 (ВНР), НСЗ (СССР) и др.;
- с компенсатором, служащим фокусирующим компонентом, — Н10КЛ.

Механическим компенсатором является качающаяся сетка на трех металлических нитях, имеющих длину, равную f ($f=s$, $n=1$). Под действием силы тяжести перекрестие сетки нитей занимает такое положение, что визирная ось системы отвесна (ни-

велир 5190 фирмы «Филотехника Сальмойраги», Италия). В выпускаемом той же фирмой нивелире типа 5173 зрительная труба также перископического типа, как и в модели 5190, но на трех таких же по длине нитях подвешен объектив.

Наиболее часто используются оптико-механические компенсаторы в виде свободно подвешенных зеркал, призм, линз.

Если зеркало подвесить на маятнике так, чтобы оно составляло с горизонтальной плоскостью всегда одинаковый угол, то его можно использовать в качестве компенсатора, у которого $f=2s$, следовательно, $n=2$. На рис. 75 показан принцип действия зеркального компенсатора разработанного в СССР нивелира ИЗК-1. Если наклоним прибор против часовой стрелки на угол γ , перекрестие сетки нитей C сместится в положение C' , зеркало 2 компенсатора, подвешенное на нитях 1, изменит свое положение на угол $\gamma/2$. Поэтому луч AB , соответствующий правильному отсчету A по рейке, отразившись от зеркала 2, повернутого на угол $\gamma/2$, изменит свое направление на угол $90^\circ \pm \gamma$ и, пройдя через объектив 3, отразившись от зеркала 4, попадет вновь на перекрестие сетки нитей C' , рассматриваемое через окуляр 5.

В ряде приборов, например в нивелире завода «Аскания», подвешенное зеркало компенсатора располагается между объективом и сеткой нитей.

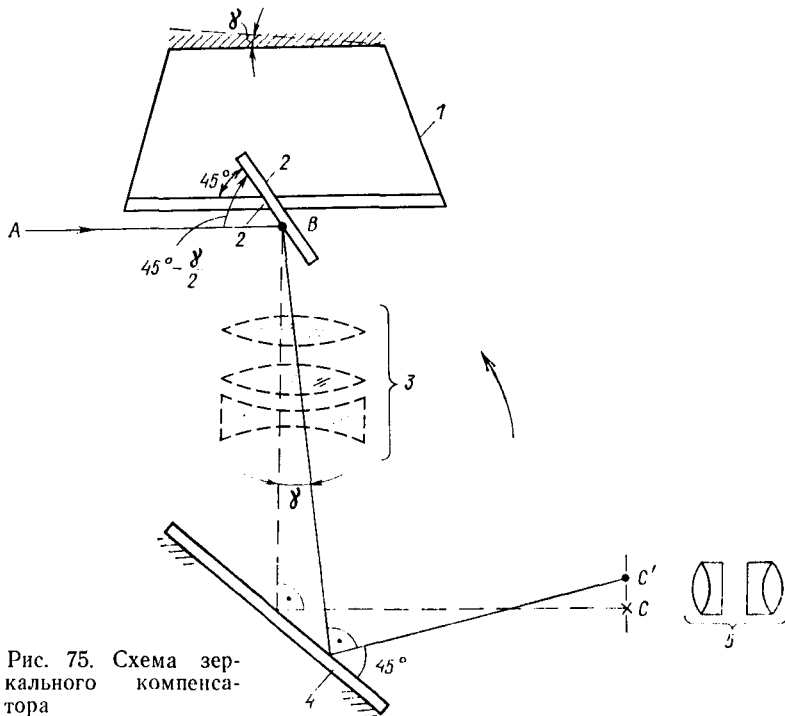


Рис. 75. Схема зеркального компенсатора

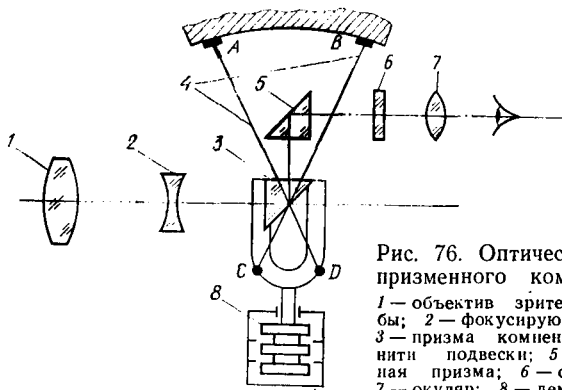


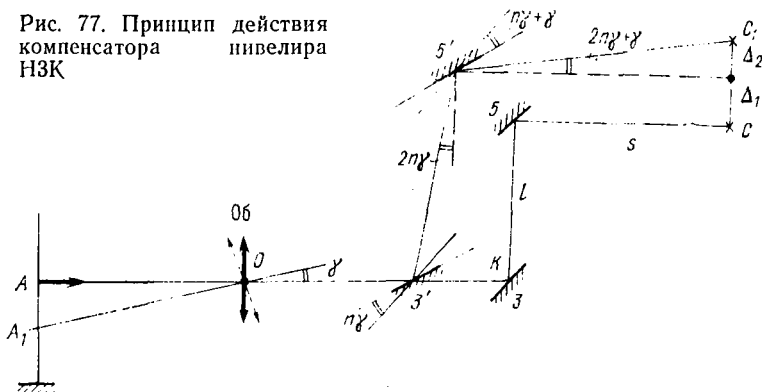
Рис. 76. Оптическая схема призмного компенсатора:
 1 — объектив зрительной трубы; 2 — фокусирующая линза; 3 — призма компенсатора; 4 — нити подвески; 5 — неподвижная призма; 6 — сетка нитей; 7 — окуляр; 8 — демпфер

Наиболее широко в нивелирах применяются призмные компенсаторы. В частности, отечественный нивелир НЗК (НСЗ) снабжен призмным компенсатором оптико-механического типа, обеспечивающего автоматическую компенсацию наклона зрительной трубы в пределах $\pm 15'$. Зрительная труба нивелира ломаная, ее оптическая схема приведена на рис. 76. Подвижная прямоугольная призма подвешена на четырех скрещенных нитях, закрепленных в тт. *A* и *B* корпуса нивелира и в тт. *C* и *D* держателя призмы. Угловое увеличение компенсатора $n=3$.

Пусть отрезок *OK* (рис. 77) — горизонтальный луч, проходящий через центр *O* объектива. Отражающие грани подвижной призмы 3 и неподвижной 5 расположены под углом 45° к этому лучу. Правильный отсчет по сетке нитей *C* будет *m*. При наклоне зрительной трубы на угол γ центр сетки перейдет в положение *C*₁ и отсчет по рейке при отсутствии компенсации будет *m*₁. Центр сетки переместится на величину $CC_1 = f\gamma$, где *f* — эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива.

Возникшая ошибка будет компенсирована, если изображение правильного отсчета *m* переместится на величину CC_1 в новое положение сетки нитей *C*₁.

Рис. 77. Принцип действия компенсатора нивелира НЗК



Наклон трубы на угол γ вызовет наклон отражающей грани призмы 3 на угол $n\gamma$, и она займет положение 3'. Отражающая грань призмы 5 наклонится на угол γ в направлении, противоположном наклону призмы 3, и займет положение 5'. Угол γ мал, а потому будет мало изменение расстояний l и s , поэтому смещение Δ_1 центра сетки нитей по вертикали составит

$$\Delta_1 = 2ln\gamma, \quad (5.7)$$

где l — расстояние по лучу между отражающими гранями призмы 3 и 5; $2n\gamma$ — угол между отвесной линией и лучом на участке между призмами 3 и 5 при наклоне нивелира.

Смещение Δ_2 составит

$$\Delta_2 = 2s(n\gamma + \gamma), \quad (5.8)$$

где s — расстояние по лучу между отражающей гранью призмы 5 и центром C сетки нитей.

Так как для компенсации необходимо выполнение условия

$$CC_1 = \Delta_1 + \Delta_2,$$

то

$$f\gamma = 2ln\gamma + 2s(n\gamma + \gamma), \quad (5.9)$$

или

$$n = \frac{f - 2s}{2(l + s)}.$$

Задаваясь параметрами f , s и l , находят технические параметры подвески компенсатора.

Призменный компенсатор нивелира Ni-025 предприятия «Карл Цейсс», Йена, расположенный между фокусирующей линзой и сеткой нитей, состоит из двух призм, укрепленных на маятнике. Маятник подвешен при помощи шарнира из двух скрещенных плоских пружин. Расположенная между призмами компенсатора крышеобразная призма служит для обращения изображения в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Для того чтобы можно было расположить компенсатор ближе к пластине с сеткой нитей — к плоскости изображения, прибегают к механическому увеличению коэффициента n при помощи шарнирного четырехугольника (рис. 78). Если сторону четырехугольника AB (базис подвески) наклонить на угол γ , то сторона CD (базис отражения) с прикрепленным к ней зеркалом или призмой отклонится на угол $\beta = n\gamma$. Величина n определяется геометрическими размерами шарнирного четырехугольника, а также расстоянием центра тяжести от базиса отражения. Если, например, $AB = 3CD$, то, как следует из рис. 78 [18],

$$AB \sin \gamma + BD \cos \alpha = AC \cos \delta + CD \sin \beta.$$

Так как $AC = BD$, $\alpha \approx \delta$, то $AB \cdot \sin \gamma = CD \sin \beta$ или по малости γ и β ; $AB : CD = \beta : \gamma$.

Если $AB : CD = 3 : 1$, то $\beta = 3\gamma$.

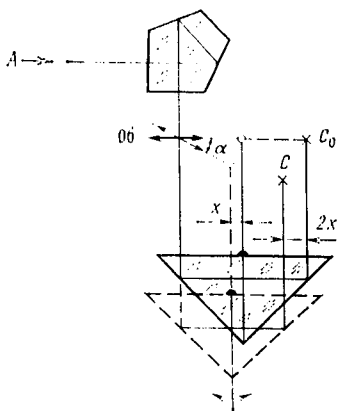
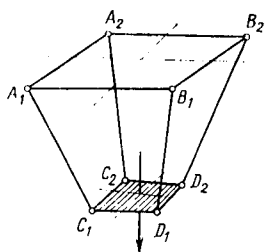
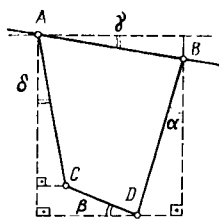


Рис. 78. Шарнирный четырехгольник

Рис. 79. Схема компенсатора Ni-007

В нивелире Ni-007 (ГДР) и некоторых других используется маятниковый компенсатор призмённого типа, работающий на принципе параллельного смещения луча (рис. 79). Если такую призму подвесить на жестком маятнике на расстоянии половины фокусного расстояния ($0,5f$) от объектива, то горизонтальный луч не будет сходиться со средней горизонтальной нити сетки. Действительно, при наклоне нивелира на угол γ призма сместится на величину x , а выходящий из нее луч сместится параллельно на величину $2x$, и расстояние от центра объектива до перекрестия останется неизменным.

В нивелире Ni-007 качающаяся призма помещена между объективом и окуляром. Расположенная перед объективом пентапризма, которая может поворачиваться относительно оси, перпендикулярной к визирной оси, служит также и в качестве оптического микрометра.

В качестве компенсатора может быть использован также астатический маятник, представляющий собой установленную вертикально упругую пластинку (плоскую пружину) (рис. 80). Нижний конец пружины прикреплен к корпусу нивелира, а на верхнем конце укреплена служащая грузиком отклоняющая призма. При наклоне нивелира на угол α верхний конец маятника под тяжестью призмы отклонится на угол $\beta = \alpha + \gamma$, причем величина n в данном случае определяется упругими свойствами пружины. Подбрав параметры маятника, можно удовлетворить основное условие компенсации ($f \sin \alpha = s \sin \beta$).

В отечественном нивелире Н10КЛ использован призмённый компенсатор, одновременно выполняющий роль фокусирующего элемента (рис. 81). Компенсатор у этого нивелира состоит из двух пентапризм 2 и 4, склеенных между собой и укрепленных неподвижно с корпусом прибора, и подвижной прямоугольной равнобедренной призмы 3, заключенной в подвижную прямоугольную рамку, подвешенную на двух шарикоподшипниках. Место подвески выбрано так, чтобы оптическое расстояние от

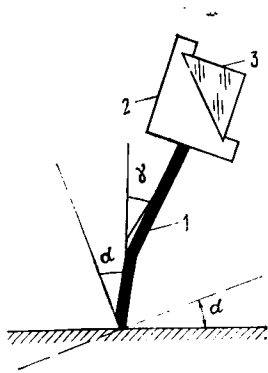


Рис. 80. Астатический маятник:

1 — плоская пружина; 2 — держатель; 3 — призма

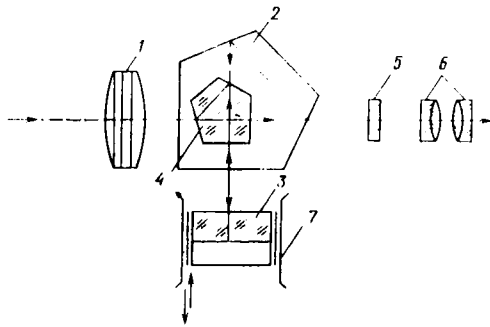


Рис. 81. Схема компенсатора нивелира Н10КЛ

главной задней плоскости объектива 1 до призмы компенсатора 3 было равно оптическому расстоянию от этой призмы до сетки нитей 5 нивелира, рассматриваемого через окуляр 6, т. е. чувствительный элемент располагается на расстоянии $f/2$ от главной плоскости объектива. Коэффициент углового увеличения компенсатора n в данном случае определяется из соотношения

$$n = \frac{f}{f/2} = \frac{\beta}{\gamma} = 2.$$

Рамка с чувствительным элементом — призмой 3 — может перемещаться в вертикальной плоскости сверху вниз (и наоборот) в специальных направляющих 7, изменяя тем самым положение призмы 3 компенсатора. Поскольку при перефокусировании расстояние от объектива до граней подвижной призмы компенсатора и от них до сетки нитей зрительной трубы остается неизменным, то при любом положении фокусирующего элемента основное уравнение компенсации не нарушается. Зрительная труба нивелира Н10КЛ дает прямое изображение.

Компенсацию наклона визирной оси нивелира можно осуществить и с помощью линзы. Подвешенная как маятник качающаяся линза, смещаясь при наклоне прибора, может изменить направление луча от правильного отсчета A в соответствии с изменением положения средней линии сетки нитей. Примером нивелира с линзовым компенсатором служит ранее выпускавшийся маркшейдерский нивелир НСМ-2 (рис. 82). Его компенсатор состоит из двух линз — неподвижной плоско-выпуклой положительной линзы 2, расположенной перед объективом, и плоско-вогнутой отрицательной линзы 1, подвешенной с помощью рычага 3 на четырех нитях 5, закрепленных на корпусе 4 прибора. Противовес 6 служит для уравновешивания системы.

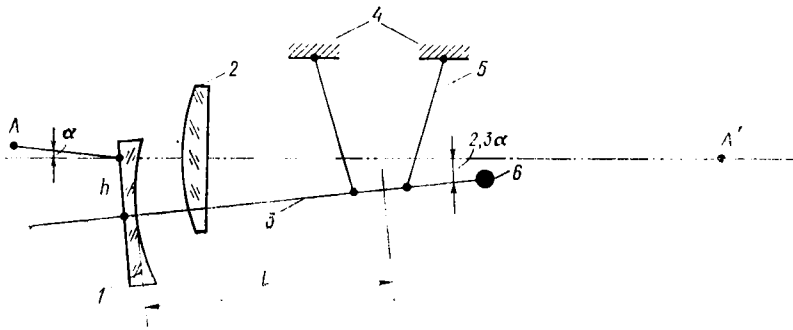


Рис. 82. Схема линзового компенсатора нивелира НСМ-2

Система подвески рассчитана так, что при наклоне зрительной трубы на угол α маятниковая система отклоняется на угол $2,3\alpha$, причем главная точка линзы 1 отклоняется от оптической оси на величину h , зависящую от f и s .

Недостатком такой системы является нарушение центровки оптической системы в целом, что отрицательно сказывается на качестве изображения рейки.

Жидкостные компенсаторы могут быть сконструированы так, что поверхность жидкости используется в качестве искусственного горизонта или эта жидкость образует оптический клин 2 с переменной величиной преломляющего угла γ в зависимости от наклона прибора (рис. 83). Световой луч через прямоугольные призмы 1, 3, пройдя жидкостный клин, попадает в объектив 4 зрительной трубы. В этом случае расчет компенсатора ведется в соответствии с основным уравнением компенсации (5.6).

Жидкостные компенсаторы клинового типа могут быть использованы в лазерных нивелирах и лазерных приборах вертикального проектирования.

В геодезической практике иногда используются нивелиры с самоустанавливающимся высотным штрихом, образующим устройством оптического высотомера. К таким нивелирам относится НЛС (ГОСТ 10529—79), предназначенный для высотного обоснования топографических съемок и инженерно-геодезических изысканий. Труба нивелира НЛС может устанавливаться под углом наклона в пределах 3° , что позволяет определять превышения до 15 м с одной станции и тем самым повысить эффективность работы на всхолмленной местности.

В поле зрения трубы высотный штрих перемещается относительно неподвижных штрихов сетки нитей. Нивелиром НЛС можно определять превышения горизонтальным лучом. Для этого надо совместить высотный штрих со средней нитью сетки и привести пузырек уровня в нуль-пункт.

В уровненом компенсаторе Г. Ю. Стодолкевича середина пузырька цилиндрического уровня используется в качестве регу-

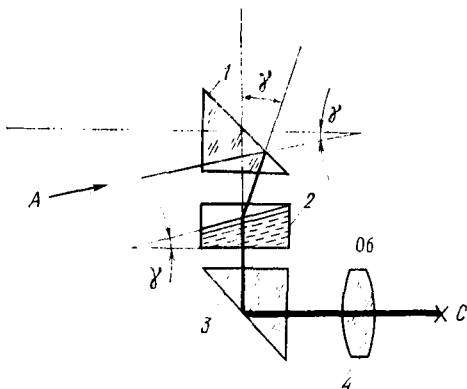


Рис. 83. Схема жидкостного компенсатора

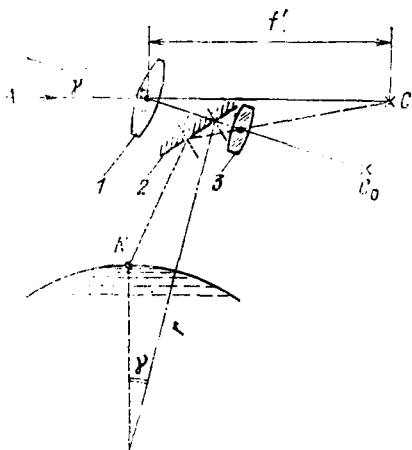


Рис. 84. Уровненный компенсатор Г. Ю. Стодолкевича

лируемой марки-индекса для взятия отсчетов по рейке (рис. 84). Оптическая система, состоящая из зеркала 2 и линзы 3, передает изображение середины пузырька уровня в плоскость штрихов сетки нитей C . Горизонтальный луч A , проходящий через объектив 1 зрительной трубы, и луч, проходящий через линзу 3, перпендикулярны к радиусам ампулы цилиндрического уровня, соответствующим середине пузырька и нуль-пункту уровня N . При наклоне зрительной трубы на угол γ пузырек уровня сходит с нуль-пункта на расстояние, соответствующее этому углу. Таким образом, изображение середины пузырька уровня смещается на величину $n\gamma\Gamma_2' = f'\gamma$, где Γ_2' — увеличение объектива 3, f' — фокусное расстояние объектива 1 зрительной трубы.

Если $f' = n\Gamma_2'$, то угол наклона зрительной трубы будет компенсироваться и изображение середины пузырька уровня будет всегда соответствовать горизонтальной линии визирования. В нивелире НС-2, разработанном в соответствии с этим принципом, изображения обоих концов пузырька контактного уровня образуют линию, используемую в качестве индекса при взятии отсчетов по рейке.

§ 34. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОМПЕНСАТОРОВ НАКЛОНА В НИВЕЛИРАХ

В нивелирах компенсатор заменяет цилиндрический уровень при зрительной трубе, поэтому работа этого ответственного узла подвергается достаточно детальным исследованиям. При исследованиях определяют три главных параметра: диапазон

работы компенсатора; его чувствительность и ошибку компенсации углов наклона; время затухания колебаний компенсатора.

Основные метрологические характеристики компенсаторов нивелиров Н-05К, Н-3К, Н-10К согласно ГОСТ 10528—76 приведены в табл. 3.

Диапазон действия компенсатора определяют, как правило, в двух взаимно перпендикулярных направлениях, при продольных и поперечных (боковых) наклонах нивелира в обе стороны от нуль-пункта установочного (круглого) уровня. Исследование выполняют либо с использованием нивелирной рейки (в полевых условиях), либо с помощью экзаменатора (в лабораторных условиях).

Т а б л и ц а 3

Характеристики компенсаторов	Нормы по типам нивелиров		
	Н-05К	Н-3К	Н-10КЛ
Диапазон работы, угловые минуты, не менее	±8	±15	±20
Ошибка самоустановки линии визирования, угловые секунды, не более	0,2	0,5	1,0
Систематическая ошибка работы компенсатора на 1 мин наклона оси нивелира, угловые секунды, не более	0,05	0,3	0,5
Время затухания колебаний подвесной системы, угловые секунды, не более	2	2	2

В первом случае (по рейке без экзаменатора) перед исследованиями подставку устанавливают так, чтобы один из подъемных винтов находился под объективом или окуляром зрительной трубы, находят угловую величину наклона трубы нивелира при вращении подъемного винта на один полный оборот по формуле

$$\beta = \frac{\Delta l}{L} \rho, \quad (5.10)$$

где Δl — изменение отсчета по рейке (шкале) при одном полном обороте винта; L — расстояние от оси вращения нивелира до рейки.

Затем начинают производить наклоны прибора в продольном и боковом направлениях, фиксируя момент «зависания» маятника компенсатора (сетка нитей начинает перемещаться пропорционально наклону) и величину n поворота подъемного винта в долях длины окружности головки подъемного винта. Угловая величина диапазона действия компенсатора (α_k) определится как

$$\alpha_k = \beta n. \quad (5.11)$$






Более точно величину α определяют в лабораторных условиях при помощи экзаменатора с ценой деления шкалы винта не более $30''$. По этой схеме момент зависания маятника фиксируется по положению освещенной сетки нитей нивелира, наблюдаемой в трубу коллиматора. В этом случае значение экстремального угла наклона определяют непосредственно по шкале экзаменатора по формуле

$$\alpha_k = \gamma N,$$

где N — число делений лимба экзаменатора; γ — цена одного деления лимба экзаменатора.

Ошибки компенсации углов наклона в полевых условиях определяют по превышениям, измеренным на станции при длине визирного луча 5, 25, 50 и 100 м для Н-3К, Н-10КЛ; 5, 25, 50 и 75 м для Н-05К. Наклон нивелира производят в продольном и боковом направлениях на угол α , равный номинальному значению диапазона работы компенсатора. Нивелир во время измерений должен находиться в створе между рейками, на равных расстояниях от них. Программа указана в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

№ п/п	Измерение превышения	Положение пузырька установочного уровня
1	При положении пузырька уровня в нуль-пункте ($\alpha = 0$)	
2	При продольном наклоне оси вращения нивелира на угол $+\alpha$	
3	При продольном наклоне оси вращения нивелира на угол $-\alpha$	
4	При боковом наклоне на угол $+\alpha$	
5	При боковом наклоне на угол $-\alpha$	

Эта программа составляет один прием. Для каждого расстояния должно быть сделано не менее 5 приемов. Между приемами изменяется горизонт нивелира.

Ошибку компенсации dv на одну минуту наклона оси вращения нивелира вычисляют по формуле

$$dv = \frac{(h_\alpha - h_0)}{2L\alpha} = \frac{\Delta h \rho''}{2L\alpha''}, \quad (5.12)$$

где h_α — среднее превышение, полученное при наклоне оси нивелира на угол α ; h_0 — то же, при положении уровня в нуль-пункте; L — длина визирного луча.

Таблица 5

Длина визирного луча, м	Измеренные превышения				Ошибки компенсации								
	Пузырек уровня в нуль-пункте	продольный наклон		боковой наклон		продольный наклон				боковой наклон			
		+ α	- α	+ α	- α	мм	с	мм	с	мм	с	мм	с
5	-16,12	-16,13	-16,02	-16,02	-0,01	-0,01	-0,10	+0,14	+0,24	+0,32	-0,19	-0,25	
25	+13,71	+13,66	+13,76	+13,98	-0,05	-0,01	+0,05	+0,01	-0,27	+0,07	-0,23	-0,06	
50	-103,90	-104,40	-103,35	-101,80	-0,50	-0,07	+0,10	+0,07	-2,10	+0,28	-1,85	-0,25	
100	-100,90	-101,50	-100,30	-96,50	-0,60	-0,04	+0,60	+0,04	+4,40	+0,29	-3,90	-0,26	

Пример записи и обработки результатов наблюдений приведен в табл. 5.

В лабораторных условиях ошибку компенсации определяют при фокусировке трубы на бесконечность, используя экзаменатор и коллиматор с $f_{об} \geq 500$ мм. Коллиматор должен иметь окулярный микрометр с ценой деления шкалы не более 1".

Время затухания колебаний маятника в полевых условиях может быть установлено по секундомеру с ошибкой около 0,5 с. Для этого пускают секундомер, одновременно легким ударом пальца вызывают колебания компенсатора десять раз подряд. После десятого успокоения останавливают и вторично отсчитывают секундомер. Точное определение качества демпфирования и времени затухания колебаний маятника в стационарных условиях может быть осуществлено с помощью фотоспротивления, связанного с осциллографом, имеющим возможность записи на фотопленку с нанесенными метками времени.

§ 35. ПОНЯТИЕ О РАСЧЕТЕ КОМПЕНСАТОРОВ

Компенсаторы нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования согласно ГОСТ 10528—76 должны соответствовать метрологическим характеристикам, приведенным в табл. 3. Для нивелиров технических (типа Н-10КЛ) средняя квадратическая ошибка определения превышения на станции не должна превышать $m_h \leq \leq 3$ мм при длине визирного луча $L \leq 100$ м, диапазон действия компенсатора $\pm 20'$, а время затухания его колебаний — не более 2 с.

Результирующую ошибку однократного использования геодезического прибора можно представить в виде

$$m = \sqrt{m_p^2 + m_{op}^2 + m_o^2 + m_b^2}, \quad (5.13)$$

где m_p , m_{op} , m_o , m_b — соответственно влияние погрешностей рабочей меры, ориентирования, отсчитывания и атмосферных влияний и неучтенных ошибок.

При равномерном влиянии отдельных ошибок

$$m_p \approx m_{op} \approx m_o \approx m_b \approx 0,5m_h \approx 1,5 \text{ мм.}$$

Ошибка ориентирования (в данном случае установки визирной линии в горизонтальное положение) зависит (для нивелира типа Н-10КЛ) в основном от ошибки компенсационного блока, которая в правильно рассчитанном и изготовленном компенсаторе близка к его чувствительности,

$$\delta = \frac{m_{op}}{L} \rho'' = \frac{1,5}{100 \cdot 10^3} \rho'' \approx 3''.$$

Рассмотрим один из простейших компенсаторов — плоское зеркало [30], подвешенное на 4-х гибких нитях перед объективом и снабженное демпфером воздушного типа (см. рис. 75).

Для этой схемы коэффициент n углового увеличения компенсатора должен быть $n=1,5$. Такую величину n можно получить, выполнив подвес в виде двух трапеций, расположенных в параллельных плоскостях (см. рис. 78). В этом случае

$$n = \frac{AB}{CD} K = \frac{a}{c} K, \quad (5.14)$$

где K — коэффициент, учитывающий силы упругости подвесок, массу и положение центра тяжести подвески.

Считая в первом приближении $K=1$, по формуле (5.14) находим, что $a=1,5c$. При $c=30$ мм $a=45$ мм.

Теория подвеса компенсатора упрощается, если считать точки A , B , C и D закрепления нитей шарнирами. Тогда силы упругости нитей, возникающие при изгибе, выгодно по возможности уменьшить, что достигается применением в качестве нитей тонких ленточек из легированной стали прямоугольного сечения (модуль упругости $E=2,15 \cdot 10^5$ Н/мм²) со следующими размерами: длина $l=20$ мм, ширина $b=0,5$ мм, толщина $h=0,03$ мм.

От ленточек подвески зависят порог чувствительности компенсатора, стабильность положения линии визирования (что соответствует постоянству угла i в уровнях нивелирах), стабильность коэффициента углового увеличения n , при отклонении которого от расчетной величины возникают так называемая недокомпенсация или перекомпенсация, и т. д. Остаточные значения упругих деформаций (гистерезис) промышленных упругих материалов составляют $\sim 0,05\%$. Для нашего примера допуск Δ_r на гистерезис и остаточные необратимые деформации

можно считать равным

$$\Delta_r = \frac{\delta}{\sqrt{2} |\alpha_{\max}|} = \frac{3''}{\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 60''} \approx 0,18\%, \quad (5.15)$$

где $\delta = 3,0''$ — ошибка горизонтирования линии визирования; $\alpha_{\max} = \pm 20'$ — диапазон действия компенсатора; $\sqrt{2}$ — коэффициент совместного влияния гистерезиса и остаточных необратимых деформаций.

Это условие выполнимо, так как минимальная величина гистерезиса, как указывалось, составляет 0,05 %.

Ранее мы приняли $K=1$, т. е. не учитывали ряд вышеуказанных параметров, также влияющих на работу компенсатора. Естественно, при строгом подходе ведутся соответствующие расчеты, которые выходят за рамки настоящего курса, рассчитанного для студентов геодезических специальностей.

В геодезических приборах с компенсаторами углов наклона в качестве успокоителей применяют, как правило, воздушные демпферы поршневого типа. Реже используют электромагнитные демпферы, основанные на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита с вихревыми токами, возникающими под его воздействием в движущейся пластинке, скрепленной с колеблющимся маятником.

Выберем для нашего случая воздушный демпфер поршневого типа, который целесообразно расположить с тыльной стороны подвижного зеркала с компенсатором, соединив жестко поршень с оправой зеркала, а цилиндр — с корпусом компенсатора. Действие воздушного демпфера основано на использовании физических свойств воздуха. При колебаниях маятника компенсатора вместе с ним будет перемещаться поршень воздушного демпфера, перемещения поршня можно считать линейными, величина Δ_{Π} которых будет равна

$$\Delta_{\Pi} = \frac{\varphi_{\max}}{\rho'} (e - \Delta - l) = \frac{22,5'}{\rho'} (43 - 6 - 5) \approx 0,21 \text{ мм},$$

где $\varphi_{\max} = 22,5'$ — максимальный наклон маятника; e — мгновенный радиус вращения, равный 43 мм; $l = 5$ мм — расстояние от оси поршня до нижнего основания шарнирного четырехугольника, выбирается из конструктивно-габаритных соображений; $\Delta = 6$ мм — величина смещения центра тяжести от основания трапеции подвески.

Зная необходимое значение коэффициента демпфирования K_d , рассчитываемого согласно заданному времени успокоения (2 с) и конструктивным особенностям подвески, можно определить требуемую величину зазора между поршнем и цилиндром

$$\Delta_{\Pi} = R_{\Pi} \sqrt[3]{\frac{3\pi\eta l_1 L^2}{4K_d}} \approx 0,03 \text{ мм},$$

где R_{Π} — радиус цилиндра; l_1 — длина зазора между поршнем и

цилиндром вдоль потока; $L = e - \Delta - l = 43 - 6 - 5 = 32$ мм — расстояние от оси цилиндра до мгновенного центра вращения; $\eta \approx 1,7 \cdot 10^{-13}$ Н·с/мм² — коэффициент динамической вязкости сухого воздуха при $t = 15$ °С и давлении 101324, 720 Па; K_d — коэффициент демпфирования, равный $6,5 \cdot 10^{-4}$ Н·м·м.

Такую величину зазора можно обеспечить только при прецизионном изготовлении и сборке демпфирующего устройства. Можно увеличить коэффициент демпфирования K_d , если вместо простого цилиндра и поршня применить многоступенчатый поршень, действие которого эквивалентно одновременному действию нескольких поршней.

Точность действия любого нивелира с самоустанавливающейся линией визирования в определяющей степени зависит от качества изготовления, сборки и юстировки компенсационного блока строго в расчетном месте зрительной трубы.

При продольных наклонах нивелира будет, хотя и незначительно, изменяться высота линии визирования, причем тем больше, чем дальше от вертикальной оси вращения прибора расположена передняя узловая точка ее объектива. При повороте трубы на 180° знак этого изменения меняется на обратный, что может служить причиной появления систематической ошибки в нивелирных ходах. Большинство из ошибок работы компенсатора пропорционально углу наклона геодезического прибора (нивелира, теодолита с компенсатором при вертикальном круге центрира). Для уменьшения этого следует возможно тщательнее ориентировать прибор при помощи установочного, как правило, круглого уровня.

Глава 6

ОСЕВЫЕ СИСТЕМЫ И ДРУГИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ЧАСТИ

§ 36. ТИПЫ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОСЕВЫХ СИСТЕМ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАВИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЕВОЙ СИСТЕМЫ

Осевые системы являются основными механическими узлами геодезических приборов. Точность, долговечность и надежность, в особенности угломерных приборов, во многом зависят от этих устройств.

Механические осевые системы определяют взаимное положение оптико-механических узлов геодезического прибора в строгом соответствии с его геометрической конструкцией, поэтому они должны обеспечивать постоянство взаимного распо-

ложения и сохранения своих форм. Оси изготавливают из материала, обеспечивающего их прочность, плавность вращения и бесперебойную работу прибора при значительных изменениях температур: от -40 до 40 °С.

По своей форме осевые системы могут быть конические и цилиндрические, а по назначению и расположению — вертикальные и горизонтальные.

Вертикальные осевые системы. Для обеспечения стабильности системы, необходимой легкости хода оси должны быть длинными. Их длина обычно в 3—4 раза больше диаметра d и выбирается примерно равной $l=2r$, где r — радиус горизонтального круга (лимба).

Вертикальные осевые системы современных угломерных приборов можно классифицировать по виду трения [2], так как осевая система — это всегда один или несколько подшипников. По этому признаку различают три вида осевых систем: 1) с трением скольжения; 2) с трением качения и 3) комбинированные.

В большинстве известных систем имеет место вертикальное разнесение подшипников и основных связей; в некоторых приборах принято горизонтальное разнесение.

Среди осевых систем, основанных на трении скольжения, раньше всего стали применять конические осевые системы (рис. 85). Они просты в изготовлении и подгонке деталей. Основными деталями любой осевой системы является втулка (лагер) и ось (цапфа). Даже при значительной длине l (например, 140 мм) максимальный и минимальный диаметры оси сравнительно невелики ($d_{\max} \leq 40$ мм), а угол между образующими 2α колеблется в пределах от 4 до 15°. Основными недостатками конических осевых систем являются значительная величина нормального давления на коническую поверхность трения и остаточная неопределенность положения оси как детали, плавающей в тонком слое масла. Последнее обстоятельство также от-

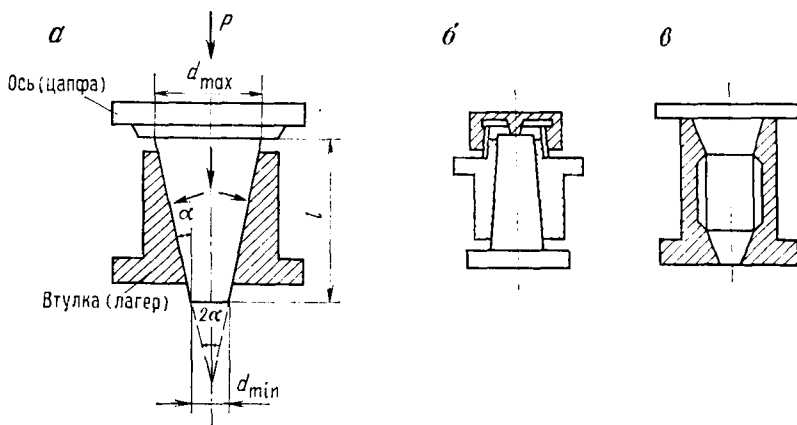


Рис. 85. Конические осевые системы

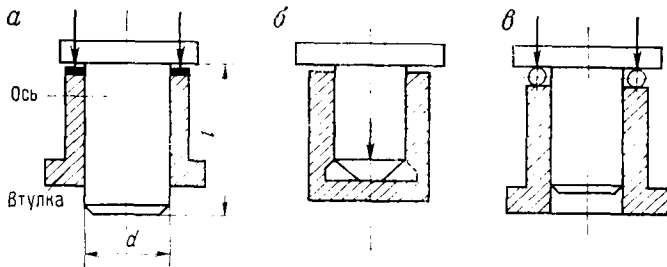


Рис. 86. Цилиндрические осевые системы

носится и к цилиндрическим осевым системам с трением скольжения. Принципиальные схемы конических осевых систем показаны на рис. 85, а, б, в.

С появлением оптических теодолитов обнаружилась непригодность конической оси для точных приборов, вызванная необходимостью перерегулировки положения упора оси из-за состояния смазки и степени износа, приводящей к необходимости перестройки оптической отсчетной системы. Выпуск промышленностью соответствующего шлифовального оборудования позволил перейти к цилиндрическим осевым системам с трением скольжения. На рис. 86 показаны некоторые разновидности цилиндрических осевых систем. В этих системах на нагрузку несут торцевые детали — заплечики оси (рис. 86, а), сферические подпятники (рис. 86, б) или подшипник качения (рис. 86, в). Недостатком таких цилиндрических систем также является неопределенность положения оси как детали, плавающей в слое масла толщиной до 1 мкм, чем обусловлен предел точности (около 2"). Общий допуск на наклоны, вызываемые несовершенством осевой системы, составляет $\Delta = 0,5\tau$, где τ — цена деления уровня при алидадной части угломерного прибора. Отдельные допуски, например, точность изготовления оси (цапфы) алидады определяются как

$$\Delta_r = 0,1\tau'' \cdot 2r/\rho'', \quad (6.1)$$

где r — радиус горизонтального круга.

Так, при $\tau = 20''$, $r = 45$ мм получим $\Delta_r = 0,9$ мкм. Цилиндрические оси обладают тем преимуществом, что для них не требуется трудоемкое регулирование плавности хода и отпадает необходимость в частой смазке, так что они хорошо работают в течение длительного времени без специального ухода; кроме того, легче их серийное изготовление. Отклонения осевой пары от круглоцилиндрической формы, как правило, не превышают 1 мкм. Для обеспечения достаточно легкого хода оси между ней и втулкой вводится слой смазки толщиной около 0,5 мкм, поэтому каждый из концов оси может отклониться на величину около 0,5 мкм, что при длине оси 90 мм (Т2) даст величину

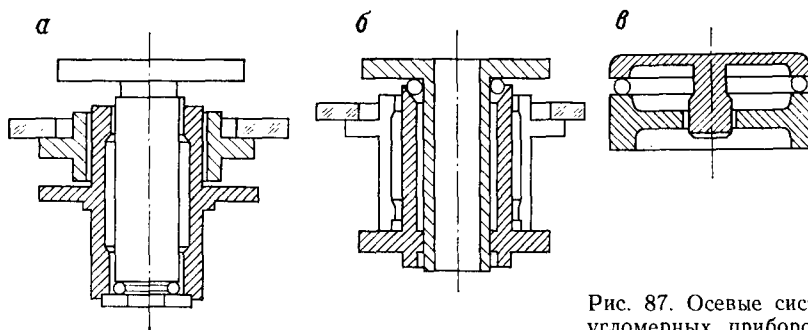


Рис. 87. Осевые системы угломерных приборов

наклона до $1,3''$. Улучшить условия трения можно уменьшением площади поверхности соприкосновения оси и втулки (рис. 87, а) и применением высокоточных шарикоподшипников (Т2, Т5).

Потребность в создании более точных приборов привела к комбинированным осевым системам, в которые включается подшипник качения. В отечественном теодолите ОТ-02, в теодолитах фирмы «Вильд» впервые в верхней конической части цилиндрической втулки установлен радиально-упорный подшипник с тремя точками соприкосновения (рис. 87, б), а в нижней — узкий пояс трения скольжения по цилиндру. Неопределенность такой «самоцентрирующейся» оси может иметь место только за счет пояса трения скольжения в нижней части, вследствие чего предельная точность такой системы по крайней мере в два раза выше обычной цилиндрической, т. е. около $1''$. В настоящее время ряд зарубежных фирм и некоторые отечественные заводы выпускают приборы с так называемой разнесенной осевой системой (рис. 87, в) с горизонтальным разнесением основных связей. Точность такой осевой системы полностью зависит от точности изготовления основного подшипника большого диаметра, опорные поверхности которого изготавливаются с ошибкой до $0,1$ мкм.

В одном из современных астрономических теодолитов Трг фирмы «Аскания» (Швейцария) применена осевая система качения, в которой два радиально-упорных подшипника разнесены по высоте и поставлены навстречу друг другу. Для нижнего применена искусственная стягивающая сила с довольно сложным устройством замыкания. Эта система обладает самой высокой точностью из всех известных систем.

В развитии вертикальных осевых систем четко прослеживается общая тенденция постепенного перехода от трения скольжения к трению качения. В ЦНИИГАиК [2] проводятся разработки по повышению точности осевых систем высокоточных теодолитов, в частности астрономических, на базе так называемых организованных подшипников качения, в которых шарик движется по заданной траектории.

В зависимости от устройства системы вертикальных осей различают теодолиты простые, повторительные и с перестанавливаемым лимбом, которые могут использоваться соответственно для различных методов измерения углов. При простом измерении угол между двумя направлениями получается как разность двух отсчетов по лимбу — для таких теодолитов достаточно лимб неподвижно укрепить на нижней части — втулке осевой системы.

При измерении углов способом повторений измеряемый угол многократно последовательно откладывается на лимбе; для этого используется осевая система, позволяющая вращать верхнюю часть прибора как самостоятельную (при закрепленной средней части с лимбом), так и вместе со средней частью, т. е. вместе с лимбом. Для этого осевая система содержит специальное так называемое повторительное устройство, позволяющее легко скрепить лимб с верхней алидадной частью.

Теодолиты с перестанавливаемым лимбом имеют устройство в виде системы шестерен, позволяющее независимо от остальных частей прибора поворачивать лимб в пределах 360° . Это позволяет вести измерение способом приемов, круговых приемов, а также во всех комбинациях с использованием каждый раз различных участков лимба (теодолиты Т2, 2Т2, Т1 и им подобные).

Примером повторительной системы является схема Рейхенбаха (рис. 88, а). В таких теодолитах ось средней части прибора вставляется во втулку нижней части, а в полую ось средней части, как во втулку, вставляется ось верхней части. При этом обе оси — средней и верхней частей теодолита — покоятся на разгружающих пружинах. В этой системе недостатком является то, что оси средней и верхней частей не разъединены полностью, вследствие чего лимб может увлекаться при вращении верхней алидадной части.

В системе Борда (рис. 88, б) полая ось средней части надевается на полую ось нижней части, в которую, в свою очередь, вставляется ось верхнего алидадного устройства. Таким обра-

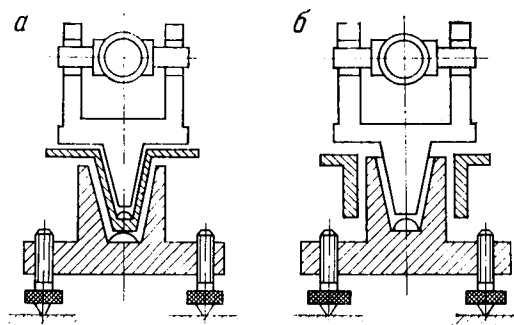


Рис. 88. Повторительные осевые системы

зом, верхняя алидадная часть не соприкасается со средней частью, включающей лимб. Такая конструкция вертикальной осевой системы широко распространена в теодолитах средней точности (Т5) и в точных теодолитах типа Т2 (см. рис. 87, а). Встречаются также другие осложненные конструкции осевых систем, среди которых можно назвать прецизионную осевую систему, разработанную советским конструктором Д. А. Аникстом, регулируемые осевые системы теодолитов ТТ-2/6, ТВО и др.

Горизонтальные осевые системы. При расчете на точность горизонтальных осей исходят из заданной точности сохранения в пространстве положения оси вращения зрительной трубы. Ошибка в измеряемом направлении

$$\Delta_t = i \operatorname{tg} v, \quad (6.2)$$

где v — угол наклона зрительной трубы; i — наклон горизонтальной оси.

При $v > 45^\circ$ $\Delta_i > i$, однако при высокоточных измерениях Δ_i не должно превышать 0,5—1,0". Эти требования приводят к малым допускам на овальность или эллиптичность и на соосность осей — цапф. Кроме вертикальной составляющей Δ_i имеется и горизонтальная составляющая, которая полностью входит в значения направлений при измерении горизонтальных углов. Горизонтальная осевая система (рис. 89, а) состоит из двух, как правило, цилиндрических полуосей — цапф, вращающихся в лагерах, установленных на вертикальных колонках теодолита или другого геодезического прибора. С цапфами жестко скрепляется зрительная труба и вертикальный круг. Современное оборудование позволяет изготавливать цапфы горизонтальной оси с высокой точностью (например, овальность не превышает 0,001—0,002 мм).

В новых теодолитах устойчивость горизонтальной оси достигается, с одной стороны, конструкцией лагера, а с другой — конструкцией наводящего устройства.

Лагеры могут быть круглоцилиндрическими (рис. 89, б) и в-образными с исправительными винтами. Расстояние l между центрами лагера выбирается примерно равным диаметру вертикального круга ($l \approx 2r$).

Конструкция круглоцилиндрического лагера (см. рис. 89, а, б), выполненного по кинематическому принципу, позволяет делать зазор между цапфой и лагером довольно большим (0,01 ÷ 0,03 мм). Для того чтобы ось лежала устойчиво, в нижней части лагера делается выборка глубиной 0,1 ÷ 0,15 мм, ограниченная центральным углом 90°. Ось отверстия лагера смещена относительно наружного диаметра на величину Δ . Это дает возможность поворотом лагера устанавливать ось вращения зрительной трубы перпендикулярно к вертикальной оси прибора.

Наводящее устройство выполняют так, чтобы влияние на ось сил, способных сдвинуть ее по азимуту или высоте, было мини-

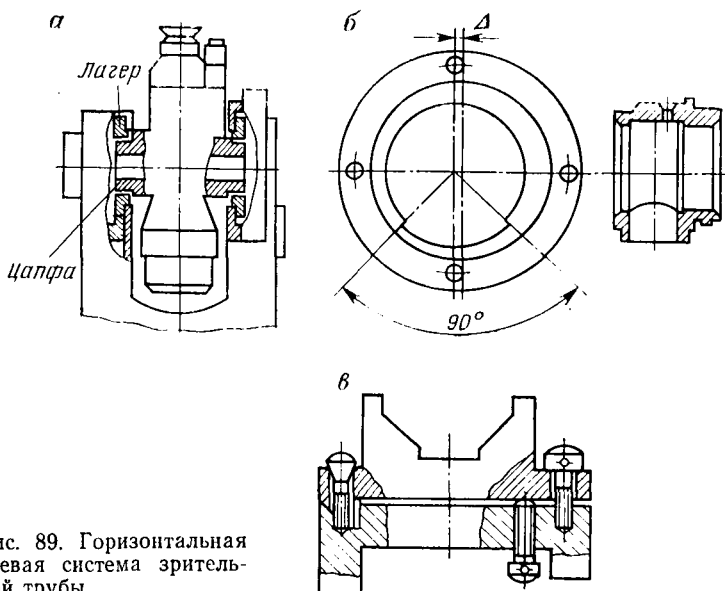


Рис. 89. Горизонтальная осевая система зрительной трубы

мальным. Конструкция v-образного лагера (рис. 89, в) позволяет перемещать опорные плоскости по высоте с помощью исправительных винтов.

Материалом для цапф и лагера служит бронза БрАЖ9-4 и легкие сплавы В95Т1 и АЛ27. В Т2 вся горизонтальная осевая система изготовлена из бронзы, в Т5 из бронзы изготовлены только цапфы, в Т15 и Т30 осевая система изготовлена целиком из легких сплавов, при этом трущиеся части покрыты твердой оксидной пленкой.

Суммарная ошибка соблюдения геометрических параметров горизонтальной осевой системы (отклонения от цилиндрической формы, соблюдение диаметра цапфы, качество шлифовки и т. п.) определяются как $\Delta = 0,1 \tau / \rho$, где τ — цена деления уровня.

Исследование правильности работы вертикальной осевой системы. Исследование вертикальной осевой системы позволяет выявить колебания оси вращения, определить наклон оси и величину зазора между сопрягаемыми элементами осевой системы.

Качество работы осевой системы можно определить с помощью точного уровня ($\tau \leq 10''$), устанавливаемого на верхней (алидадной) части теодолита. Перед исследованием добиваются перпендикулярности оси уровня к оси вращения алидады в пределах 0,5 деления.

Измерения проводятся при перестановке алидады через 30° путем взятия отсчетов $u_{\text{л}}$ и $u_{\text{п}}$ по концам пузырька уровня в пределах двух оборотов при вращении алидады по часовой стрелке и двух оборотов — против часовой стрелки.

Для каждой установки алидады вычисляют изменения наклона оси уровня

$$\Delta v' = [(u_{\text{л}} + u_{\text{п}})_i - (u_{\text{л}} + u_{\text{п}})_0] \tau / 2, \quad (6.3)$$

где τ — цена деления контрольного уровня,

$$(u_{\text{л}} + u_{\text{п}})_0 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (u_{\text{л}} + u_{\text{п}})_i.$$

Строят график (рис. 90), на котором по оси ординат откладывают v' а по оси абсцисс φ . Максимальная разность одноименных ординат характеризует колебания оси, вызванные зазором в осевой паре.

Если вычислить средние значения измерений v' для каждой установки алидады

$$\bar{v} = \frac{1}{4} \sum_1^4 v'_i, \quad (6.4)$$

по ним можно построить синусоиду и определить по ее амплитуде наклон оси при исследовании.

Среднее квадратическое колебание оси будет

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (v' - \bar{v})^2}{4n}},$$

где \bar{v} — ордината синусоиды, n — число установок алидады.

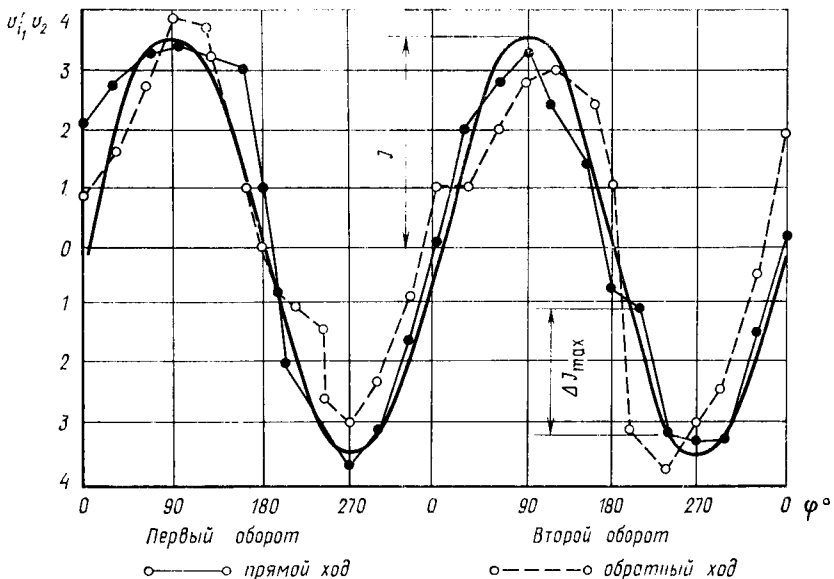


Рис. 90. График результатов исследования вертикальной осевой системы

§ 37. ШТАТИВЫ, ПОДСТАВКИ И ПОДЪЕМНЫЕ ВИНТЫ. ЗАЖИМНЫЕ И НАВОДЯЩИЕ УСТРОЙСТВА

Штатив геодезического прибора должен обеспечивать надежную и устойчивую установку прибора на рабочем месте и удобную работу в процессе измерений. Штатив состоит из трех, как правило, деревянных ножек и металлической головки. На нижних концах ножек делают заостренные металлические наконечники. Штативы изготавливаются с ножками постоянной длины и с раздвижными ножками. В современных штативах прибор прикрепляется через отверстие в столике с помощью натяжного (станового) винта путем ввинчивания последнего во втулку пружинящей пластины подставки геодезического прибора (рис. 91). Нижняя пластина подставки скреплена винтовыми соединениями с пружинящей пластиной, имеющей резьбовую втулку в центре для ввинчивания станového винта. Такое крепление позволяет при центрировании перемещать прибор по столику штатива в любом направлении на 2÷3 см. Становой винт делается полым для визирования оптическим отвесом и снабжается специальным устройством с крючком для подвески нитяного отвеса.

Подставка геодезического прибора (трегер) включает литой корпус со втулкой и закрепительным винтом, пружинную и опорную пластины и подъемные винты.

Шаг резьбы и диаметр головки подъемного винта связаны с ценой деления уровня при алидаде горизонтального круга зависимостью [30]

$$s = \frac{\pi D_v \cdot 1,5R \cdot 0,1\tau''}{\alpha''},$$

где s — шаг резьбы; D_v — диаметр головки винта; R — радиус окружности, на которой расположены подъемные винты; $0,1\tau''$ — точность установки теодолита по уровню; τ — цена деления уровня; α — чувствительность пальцев наблюдателя.

Плавность хода подъемных винтов во многом зависит от качества резьбы и от сочетания материалов трущейся пары. Разрезная гайка может выполняться из пластмассы, стержень подъемного винта изготавливают из латуни, корпус подставки (трегера) отлит из алюминиевого сплава.

Подставка обычно имеет три подъемных винта (американские приборы имеют по 4 винта), выполненных в пыле-защитном варианте. Подъемные винты регулируются так, чтобы их ход был плавным и без больших усилий. Плавность хода регулируется с помощью специальных втулок, для чего сам винт и разрезная втулка имеют соответствующие отверстия под шпильку (тонкий твердый стержень с загнутым концом). Известно много вариантов конструкции подъемных винтов, например, в венгерских приборах используются обращенные подъемные винты; в качестве подъемных винтов могут использоваться

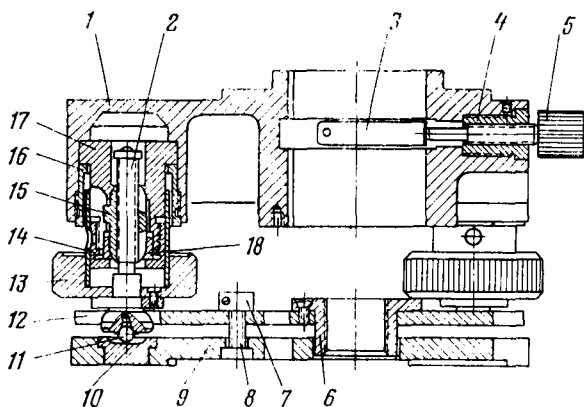


Рис. 91. Подставка геодезического прибора:

1 — корпус; 2 — подъемный винт; 3 — пружина; 4 — втулка; 5 — закрепительный винт; 6 — резьбовая соединительная втулка; 7 — контргайка; 8 — винты; 9 — трегер; 10 — подпятник; 11 — шарик; 12 — пружина трегера; 13 — головка подъемного винта; 14 — регулировочная гайка; 15 — разрезная втулка; 16 — закрепительная гайка; 17 — втулка подъемного винта; 18 — корпусная втулка

специальные эксцентрики, клиновые шарнирно соединенные диски. Приборы низкой точности часто снабжаются вместо подъемных винтов шаровым шарниром.

Зажимные и наводящие устройства. Для наведения прибора на визирную цель или для точной установки горизонтального (вертикального) круга на определенный отсчет необходимо временно закреплять подвижные относительно друг друга части прибора и затем в небольших пределах осуществлять точное перемещение этих частей относительно друг друга, например, в теодолитах временно закрепить верхнюю (алидадную) часть со средней частью, включающей горизонтальный круг, и затем плавно и точно переместить верхнюю часть относительно средней. Для этого и служит комбинация: закрепительное, наводящее устройство.

Закрепительные и наводящие устройства отличаются многообразием конструктивных решений, среди которых можно выделить следующие типы:

1) «центральное» зажимное, наводящее устройство — применяется в приборах технических;

2) с рычажной передачей — применяется в приборах средней и высокой точности (рис. 92);

3) с коаксиальным расположением закрепительного и наводящего устройств (рис. 93) — в теодолитах средней и высокой точности последних выпусков;

4) фрикционные зажимы и бесконечный микрометричный привод.

Современные повторительные теодолиты имеют зажимные и микрометричные устройства только на верхней части, а также

повторительный зажим для временного скрепления верхней (алидадной) части горизонтального круга с возможностью совместного их вращения (вращение без изменения отсчета по горизонтальному кругу). В повторительных теодолитах используется осевая система типа Борда. Для удержания горизонтального круга в заданном положении служит специальный пружи-

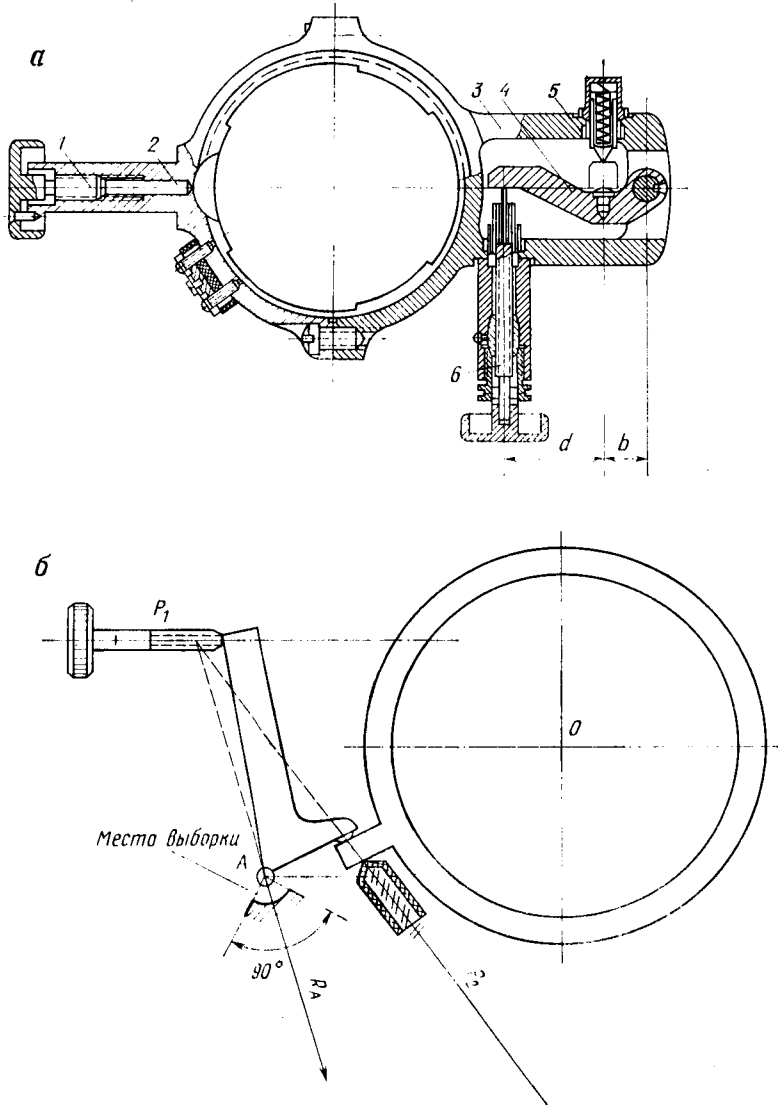


Рис. 92. Наводящее устройство рычажного типа:
a — конструкция наводящего устройства: 1 — закрепительный винт; 2 — упор закрепительного винта; 3 — корпус; 4 — рычаг; 5 — возвратная пружина; 6 — микрометрический винт; *б* — схема действия наводящего винта

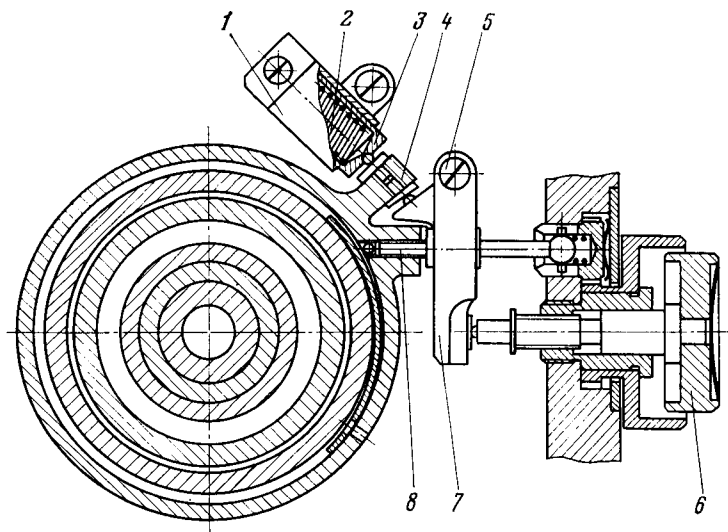


Рис. 93. Закрепительное наводящее устройство «коаксиального» типа:
 1 — оправа; 2 — пружина; 3 — гильза; 4 — хвостовик; 5 — ось; 6 — наводящий винт; 7 —
 рычаг; 8 — винт

ный зажим. С кругом жестко соединена гибкая дисковая мембрана, которая может быть прижата к верхней части теодолита при помощи повторительного зажима. Таким образом, средняя и верхняя части теодолита скрепляются и могут вращаться совместно.

Конструкция наводящего устройства должна быть согласована со способностью руки наблюдателя ощущать малые перемещения и с точностью наведения зрительной трубы.

Для выполнения этого условия задаются диаметром головки наводящего винта и расстоянием от оси вращения до оси наводящего винта, затем определяют шаг резьбы винта [30]

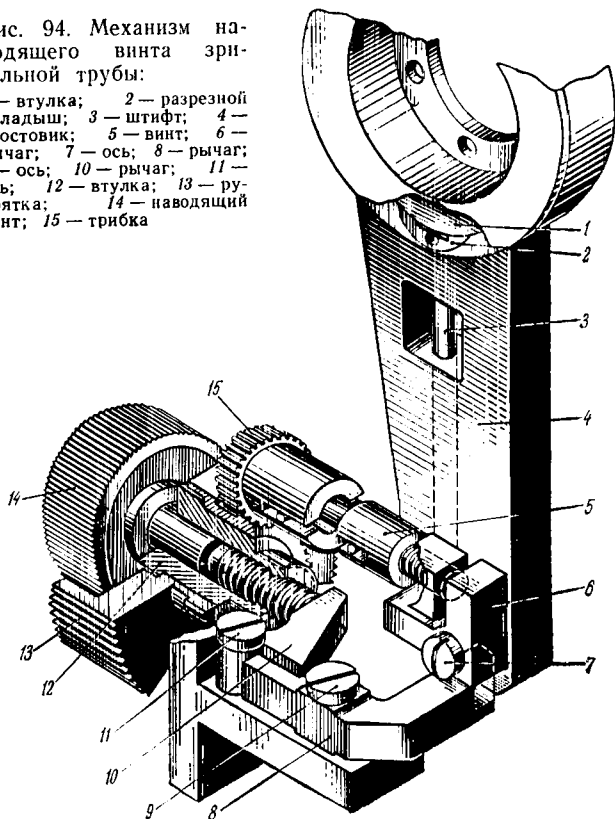
$$s = \frac{\pi P_r'' l D_v}{\rho'' \Gamma \alpha},$$

где s — шаг резьбы винта; P_r'' — разрешающая способность невооруженного глаза при бисектировании; D_v — диаметр головки наводящего винта; l — расстояние от оси наводящего винта; Γ — увеличение зрительной трубы; $\alpha \approx 0,2$ мм — чувствительность пальцев наблюдателя.

Например, при $D_v = 22$ мм, $\Gamma = 25\times$, $l = 100$ мм $s = 0,1$ мм. Однако такой винт из-за быстрого износа изготовлять нецелесообразно, поэтому применяют так называемые «дифференциальные» винты, имеющие две резьбовые нарезки с разным шагом, или рычажно-винтовые системы.

Рис. 94. Механизм наводящего винта зрительной трубы:

1 — втулка; 2 — разрезной вкладыш; 3 — штифт; 4 — хвостовик; 5 — винт; 6 — рычаг; 7 — ось; 8 — рычаг; 9 — ось; 10 — рычаг; 11 — ось; 12 — втулка; 13 — рукоятка; 14 — наводящий винт; 15 — трибка



На рис. 94 показан механизм наводящего винта вертикального круга. При вращении винта 14 рычаг 10, вращаясь вокруг оси 11, поворачивает второй рычаг 8, который вращается вокруг оси 9. Второй конец рычага 8 упирается в хвостовик — штифт хомутика 4 и вращает его вместе со скрепленной с ним горизонтальной осью зрительной трубы. К этому же хвостовику присоединена противодействующая пружина, второй конец которой укреплен на корпусе — колонке теодолита.

В показанном на рис. 93 наводящем устройстве коаксиального типа алидады горизонтального круга конец наводящего винта упирается в рычаг, вращающийся вокруг оси. Хвостовик хомутика располагается между концом рычага и пружинным упором, который состоит из гильзы, пружины и оправы. Винт проходит через прорезь в рычаге и через шарик давит на упругую прижимную пластинку, тем самым обеспечивая необходимое закрепление лимба.

На рис. 95 представлена конструкция наводящего устройства теодолита Т15, которая гораздо проще ранее рассмотрен-

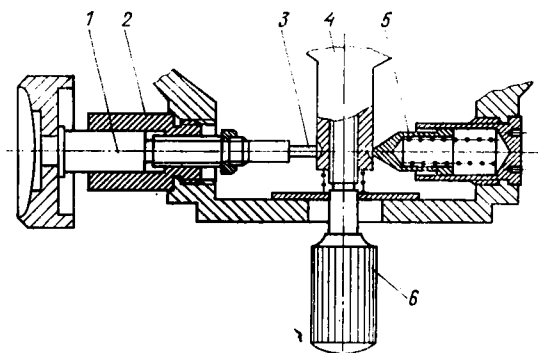


Рис. 95. Наводящее устройство теодолита Т15:
 1 — наводящий винт; 2 — втулка; 3 — шпилька; 4 — хвостовик хомутка; 5 — возвратная пружина; 6 — винт закрепительный

ного, нет шарнирных рычагов, наводящий и закрепительный винты несоосны.

Некоторые современные нивелиры, например отечественный нивелир Н-ЗК, оборудованы фрикционным зажимным устройством и приводом. Соединение верхней и нижней частей нивелира может быть осуществлено посредством зубчатого колеса, вращающегося относительно нижней части и находящегося в зацеплении с прикрепленным к верхней части червячным устройством («червяком»). Расчетная величина силы трения между внутренней поверхностью зубчатого колеса и нижней частью нивелира позволяет поворачивать верхнюю часть от руки (грубое наведение) и в то же время достаточна для точного наведения путем вращения червяка.

§ 38. ЭЛЕВАЦИОННЫЕ ВИНТЫ

Точную установку визирной оси нивелиров с жидкостным уровнем производят с помощью элевационного устройства, позволяющего согласовать чувствительность пальцев наблюдателя с необходимой точностью установки пузырька в нульпункт.

При отсутствии специальных рычажных устройств шаг резьбы элевационного винта будет равен [30]

$$s = \frac{\delta L}{K\rho},$$

где L — плечо элевационного винта по отношению к горизонтальной оси вращения; K — коэффициент, соответствующий минимальному дискретному перемещению рукоятки винта, доступное пальцам наблюдателя (при диаметре рукоятки 40 мм $K \approx \approx 1:600$ оборота); δ — чувствительность уровня (зависит от типа нивелира по точности).

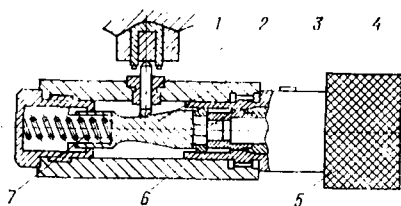
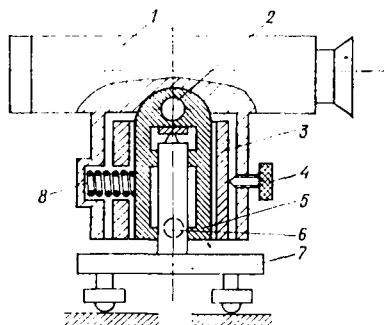


Рис. 96. Эlevationное устройство нивелира НЗ

Рис. 97. Схема elevationного устройства и вертикальной осевой системы нивелира Н1



При $\delta = 0,4''$, $L = 100$ мм, $K = 600$

$$s = \frac{0,4 \cdot 100 \cdot 600}{206 \cdot 265} = 0,12 \text{ мм.}$$

Поскольку такой шаг резьбы исполнить невозможно ($s \geq \geq 0,35$ мм), применяют специальные механизмы (например, рычажные, с конической втулкой и т. п.).

На рис. 96 представлен разрез elevationного винта нивелира типа НЗ. Перемещение конуса 3 наклоняет зрительную трубу вокруг горизонтальной оси вращения. При ввинчивании головки винта 5 соединительный штифт 4 толкает конус 3 в направляющих корпуса 6, при этом пружина 7 сжимается, а подъемный штифт 2 движется вверх, поднимая окулярную часть 1 зрительной трубы. При вывинчивании головки 5 возвратная пружина 7 перемещает конус 3 в сторону винта 5, при этом штифт 2 опускается — опускается и окулярная часть зрительной трубы. На рис. 97 показана схема elevationного устройства рычажного типа высокоточного нивелира Н1. На рис. 97 обозначены: 1 — зрительная труба; 2 — горизонтальная ось; 3 — неравноплечий рычаг цилиндрической формы; 4 — elevationный винт; 5 — втулка вертикальной оси; 6 — полуоси неравноплечего рычага; 7 — подставка с вертикальной осью; 8 — возвратная пружина.

Существуют и другие конструкции elevationных устройств.

§ 39. ИСПРАВИТЕЛЬНЫЕ ВИНТЫ УРОВНЕЙ И СЕТОК НИТЕЙ

Сетка нитей устанавливается в зрительной трубе таким образом, чтобы она находилась в передней фокальной плоскости окуляра. Сетка вставляется в кольцевую оправу (рис. 98), одновременно ограничивающую падающий на нее пучок световых лучей и тем самым определяющую величину поля зрения — диафрагму поля зрения 1. Это кольцо может в небольших пределах перемещаться при помощи четырех юстировочных винтов 2

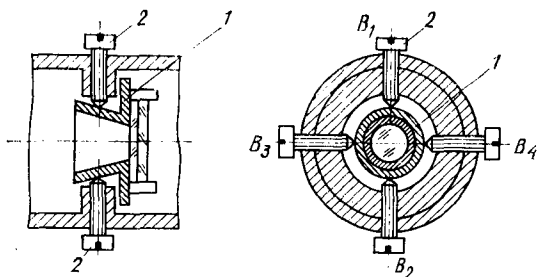


Рис. 38. Устройство сетки нитей

с целью изменения положения оси при исправлении коллимационной ошибки или МО вертикального круга.

Следует отметить, что в некоторых теодолитах последних выпусков (например 2Т2) сетка нитей закрепляется неподвижно, для исправления коллимационной ошибки наклоняется относительно горизонтальной оси зрительная труба.

Важное значение для правильности и стабильности показаний уровня имеет конструкция юстировочного устройства для исправления положения оси уровня. Конструкция юстировочного устройства должна обеспечивать неизменность положения оси уровня во время измерений и переноса прибора с одной точки на другую.

4

Глава 7

РЕДУЦИРУЮЩИЕ И ДРУГИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Чтобы облегчить труд исполнителей, применяют редуцирующие и другие автоматические устройства. Редуцирующие устройства предназначены уменьшать диастиметрические углы или наклонные расстояния, чтобы привести расстояния к горизонту. Первые геодезические приборы с редуцирующими устройствами появились в конце XIX — начале XX вв. [24]. Это были механические, оптико-механические и оптические преобразователи. Значительная часть из них не нашла широкого распространения из-за низкого уровня развития технологии общего машиностроения и приборостроения того времени, другие успешно применяются и в настоящее время.

Все современные редуцирующие устройства или преобразователи делаются по степени автоматизации на полуавтоматические и автоматические, а по конструкции на преобразователи: с тангенциальным принципом устройства, с фрикционными парами, с механическим уменьшением фокусного расстояния,

с механическим регулированием расстояний между нитями и с оптико-механическим регулированием расстояний между нитями (номограммные преобразователи).

§ 40. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕДУЦИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Преобразователи с тангенциальным винтом или шкалой. В зарубежных странах находят применение в геодезических приборах преобразователи с тангенциальным принципом устройства. В основу тангенциального преобразователя положено решение подобных треугольников. На рис. 99 горизонтальное проложение s и превышение h определяются по формулам

$$s = \frac{d}{a} l, \quad (7.1)$$

$$h = \frac{h'}{d} s, \quad (7.2)$$

где a и d — постоянные отрезки в приборе, выбранные так, что $d/a = C$ — постоянный коэффициент, обычно $C = 100$; $h'/d = \operatorname{tg} \nu$, отсчитывается на шкале вертикального круга или на головке винта; l — разность отсчетов по рейке.

Если в уравнениях (7.1) и (7.2) принять, что коэффициент C и $\operatorname{tg} \nu$ определяются надежно и безошибочно по сравнению с отрезком l , тогда точность определения s и h будет соответствовать точности обычного кругового тахеометра с нитяным дальномером. Например, в тахеометре Санге (Франция) $m_h = 6$ см на 100 м, $m_s/s = 1/300$.

В редуционном тахеометре ТАРИ, модель 4180, с вертикальной рейкой принцип тахеометра Санге воспроизведен оптическим путем итальянской фирмой «Филотехника Сальмойраги». На рис. 100 имеем

$$s = \frac{b_2 - b_1}{\operatorname{tg} \nu_2 - \operatorname{tg} \nu_1} \quad (7.3)$$

или

$$s = \frac{l}{\operatorname{tg} \nu_2 - \operatorname{tg} \nu_1}, \quad (7.4)$$

где b_1, b_2 — отсчеты по вертикальной рейке при наведении средней нити на точки L_1 и L_2 ; $\operatorname{tg} \nu_1$ и $\operatorname{tg} \nu_2$ — отсчеты по шкале тангенсов (рис. 101) в момент визирования на L_1 и L_2 . Индексом для отсчитывания по шкале тангенсов является средняя нить сетки.

Превышения между точками J, L_1 и J, L_2 вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= s \operatorname{tg} \nu_1, \\ h_2 &= s \operatorname{tg} \nu_2. \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

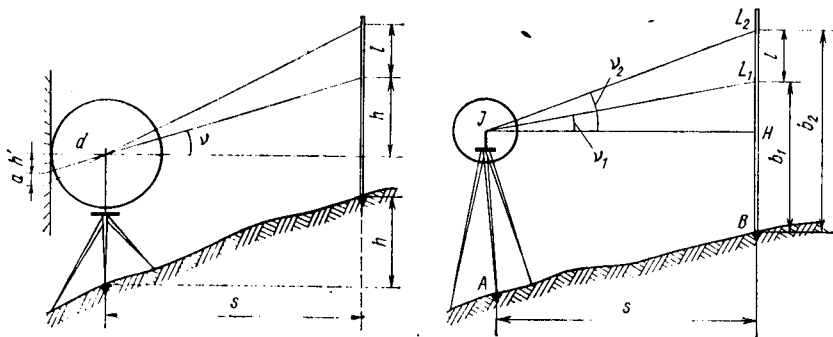


Рис. 99. Принцип действия тангенциального преобразователя

Рис. 100. Принцип измерения горизонтального проложения и превышения тахеометром ТАРИ

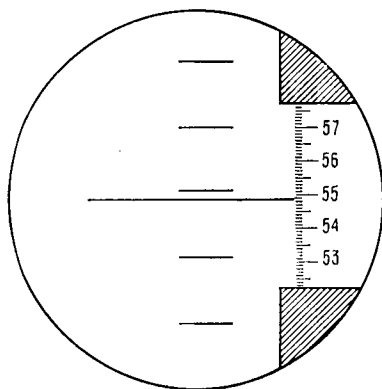


Рис. 101. Поле зрения трубы в тахеометре ТАРИ

Таким образом, чтобы определить горизонтальное проложение s , выполняется два наведения с отсчетами по рейке и шкале тангенсов. Из уравнений (7.3) и (7.4) следует, что s можно определить двумя путями: 1) при $\text{tg } v_2 - \text{tg } v_1 = \text{const}$, когда на круге используется семейство штрихов (на рис. 101 в поле зрения видно 5 штрихов), такой метод называетсяstadиметрическим (дальномерным), коэффициент дальномера между соседними штрихами равен 200, через штрих — 100, между первым и пятым — 50, использование коэффициента 50 даст повышение точности; 2) наклонномерный (клизиметрический) метод, описанный в начале параграфа, основан на том, что изображение оцифрованной тангенциальной шкалы, нанесенной на вертикальном круге, передается в поле зрения трубы.

Передача изображений обеих шкал (stadиметрической и оцифрованной тангенциальной) с вертикального круга в поле зрения трубы достигается применением в тахеометре ТАРИ 4180 ланой трубы с прямым изображением.

Преобразователи с тангенциальными шкалами нельзя считать автоматическими, так как измерение расстояний более точным наклонномерным методом производится при двух визи-

рованиях на рейку, а превышения определяются в результате перемножения. Недостатком тангенциальных устройств, кроме того, является неодновременность отсчетов по вертикальной рейке.

Преобразователи с фрикционными парами. Советский изобретатель Г. Ю. Стодолкевич установил на вертикальном круге кипрегеля фрикционную пару (ролик-диск) и использовал ее передаточное число для определения превышений по формуле

$$h = D \sin \nu, \quad (7.6)$$

где датчиком расстояний D является диск с барабаном, имеющий шкалу, датчиком угла — наклон зрительной трубы, превышение отсчитывается на шкале ролика.

Действие фрикционной передачи, основанное на использовании силы трения, отличается простотой конструкции, мгновенным заданием передающего числа и невысокой стоимостью.

Фрикционный преобразователь Г. Ю. Стодолкевича состоит из диска E (рис. 102), смонтированного на наружном круге, и ролика H — на внутреннем круге. При изменении наклона зрительной трубы ролик смещается по радиусу диска (при уменьшении угла наклона ν к центру диска, к точке A и наоборот). На обратной стороне диска имеется барабан с нанесенной на нем шкалой расстояний. Диск и барабан составляют одно целое.

Наклонное расстояние D , отсчитанное по рейке, задается на шкале вращением барабана диска. Диск, вращаясь, входит в зацепление с роликом и вращает его пропорционально $\sin \nu$. При малых углах наклона зрительной трубы ролик описывает окружности на диске близко к центру диска (вращение ролика замедлено) — превышение получится невелико.

При больших углах ролик вращается быстро (при том же расстоянии D) — превышение получится значительным.

Высотомер Г. Ю. Стодолкевича прост по устройству и обеспечивает достаточную точность определения превышений. Последние модели кипрегелей — ВКС-7 и КА-5ВТС. У кипрегеля КА-5ВТС керамический диск на вертикальном круге. Обе модели успешно применялись на топографических съемках, особенно на фотоплане, когда значительные расстояния можно брать с фотоплана [21].

Принципиальным недостатком фрикционной лобовой передачи (ролик-диск) является заметное проскальзыва-

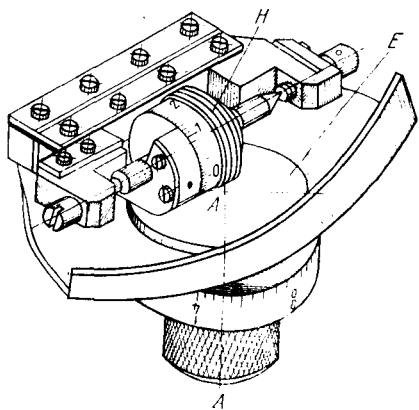


Рис. 102. Фрикционная пара ролик-диск Г. Ю. Стодолкевича

ние. При углах наклона более 15° происходит значительное изменение установленного передаточного отношения. М. М. Губин, Ф. Г. Кочетов, используя опыт Г. Ю. Стодолкевича, применяли фрикционные пары ролик-сфера (цилиндр-сфера) в редуцирующих устройствах.

Для правильной работы фрикционной пары компоненты должны быть прижаты друг к другу со значительной силой, что вызывает давление на оси опор, рабочие части компонентов и повышает требования к их прочности. Непостоянство атмосферного давления, температуры, неоднородность физико-химического состава компонентов, некачественная обработка соприкасающихся поверхностей и неодинаковая скорость вращения составляющих приводят к остаточным деформациям и быстрому износу рабочих частей приборов.

Применение твердых материалов, высокий класс обработки соприкасающихся сферических поверхностей фрикционных пар могут позволить успешно применять эти передачи в геодезических приборах.

Преобразователь Порро с оптико-механическим регулированием фокусного расстояния. Порро предложил в трубе тахеометра устройство, которое механически изменяло фокусное расстояние $f_{об}$ пропорционально $\cos^2 \nu$ так, что в известной тахеометрической формуле

$$s = \frac{f_{об}}{P} l \cos^2 \nu, \quad (7.7)$$

выражение

$$\frac{f_{об}}{P} \cos^2 \nu = \text{const} = K. \quad (7.8)$$

При постоянном слагаемом $C=0$ горизонтальное проложение определялось просто, из уравнения

$$s = Kl. \quad (7.9)$$

Изменение фокусного расстояния в трубе Порро достигалось перемещением добавочной линзы одновременно с наклоном трубы. Практически идея Порро была осуществлена Миссори. Преобразователь не получил распространения, так как не было устройства для определения превышений и точность определения s была недостаточной.

Преобразователь с механическим регулированием расстояния между дальномерными штрихами. Если в формуле (7.8) изменять P пропорционально $\cos^2 \nu$, при неизменном $f_{об}$, то постоянство K сохраняется. Фирма «Керн» использовала предложение Тики и Штарке и продолжительное время выпускала и теперь продолжает выпускать тахеометры с механическим регулированием расстояния между нитями.

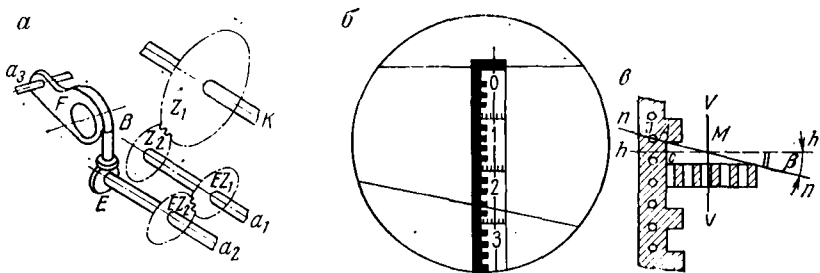


Рис. 103. Преобразователь тахеометра DK-RV

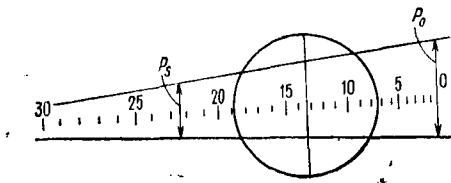
На рис. 103 показаны принцип устройства и действия преобразователя в тахеометре DK-RV и поле зрения трубы. Изменение наклона трубы передается внутрь трубы на эксцентрик F через штифт B кулачка E (рис. 103, а) в отношении $1:2$ через систему зубчатых передач Z_1, Z_2, EZ_1, EZ_2 , причем шестерня Z_1 укреплена на оси трубы, а эксцентрик F — на оси a_3 . В поле зрения трубы (рис. 103, б) имеются горизонтальный и наклонный дальномерные штрихи. Штрихи нанесены на разных пластинках, обращенных гравированными плоскостями друг к другу. Одна из пластин (с наклонным штрихом) укреплена внутри окна эксцентрика F , при изменении наклона зрительной трубы она перемещается, одновременно изменяя наклон штриха пропорционально $\cos^2 \nu$. Так устанавливается расстояние между дальномерными штрихами пропорционально s . Точность отсчета по рейке повышается за счет применения принципа трансверсали (поперечного масштаба) и малого коэффициента дальномера ($C=50$). Отсчет производится по специальной рейке (рис. 103, в) до 1 см. При благоприятных условиях $s=100$ м измеряется с ошибкой 4 см при $\nu=10-25^\circ$.

Превышения определяются по формуле $h=stg \nu$, с отсчетом тангенсов по шкале круга. Преобразователь обеспечивает указанную точность только при высоком классе обработки деталей редуцирующего механизма и тщательной его юстировке. Недостатком конструкции является сложность установки в одной фокальной плоскости подвижного и неподвижного штрихов. Кроме того, принцип трансверсали дает эффект лишь на коротких расстояниях, при спокойных изображениях и неподвижности рейки. Добиться выполнения всех этих требований в полевых условиях трудно.

Преобразователь с оптико-механическим регулированием расстояний между нитями. Итальянские инженеры Ронкагли и Урбани предложили в фокальной плоскости тахеометра поместить подвижную стеклянную пластинку с двумя сходящимися дальномерными штрихами, нанесенными в соответствии с формулой

$$P_s = P_0 \cos^2 \nu. \quad (7.10)$$

Рис. 104. Стекло́нная пласти́нка Ронка́гли и Урба́ни



По оси сходящихся штрихов на пластинке (рис. 104) наносилась шкала градусных делений по типу логарифмической шкалы так, что каждой отметке градусного штриха соответствовало расстояние $P_{s,\nu}$, пропорциональное горизонтальному проложению линии при угле наклона ν .

Горизонтальное проложение определялось в два приема. Сначала измерялся угол ν , затем, посредством кнопочного привода, пластинка перемещалась перпендикулярно к визирной оси до тех пор, пока на вертикальной нити не устанавливался штрих измеренного угла наклона, тогда по рейке отсчитывалось l_ν и вычислялось горизонтальное проложение по формуле (7.9).

Преобразователь-приставка Эвинга — Эсдаля. Австралийский топограф Эвинг предложил оптико-механическое редуцирующее устройство в виде приставки к теодолиту. Главной частью преобразователя является цилиндр-барaban с нанесенными на его поверхности двумя семействами кривых. Семейство черных кривых, построенных по уравнению

$$h = l \cdot 100 \sin \nu \cos \nu, \quad (7.11)$$

служит для определения превышений. Второе семейство красных кривых, построенное по уравнению поправки в расстояния за наклон

$$\Delta s = l \cdot 100 (1 - \cos \nu), \quad (7.12)$$

служит для отыскания поправок в наклонные расстояния. Чтобы определить h и Δs , на барабане предварительно устанавливалось $l100$.

Устройство Эвинга — Эсдаля (приставка) малых габаритов, простое в обращении и его можно приспособить к любому теодолиту и определить s и h в диапазоне расстояний от 20 до 600 м и углов наклона до $9^\circ 30'$ с точностью тахеометрических работ.

Высотомеры Г. Ю. Стодолкевича и Л. А. Кашина. Оригинальный высотомер, предложенный Стодолкевичем в 1947 г., применялся в кипрегеле ВК-1, позднее в теодолите-нивелире ТН-1 и нивелирах с наклонным лучом НЛ-2, НЛ-3 и ВН. В поле зрения трубы прибора передается изображение высотных штрихов с дополнительного устройства, которые, в зависимости от углов наклона трубы, изменяют свое положение относительно неподвижной сетки нитей.

Превышение вычисляется по формуле

$$h = K(a - b), \quad (7.13)$$

где K — коэффициент высотмера (в нивелире НЛ-3 $K=5$), в нивелире ВН системы Л. А. Кашина $K=0; 2; 5; 10$, a и b — отсчеты по задней и передней рейкам по высотному штриху. Формула (7.13) справедлива, когда средняя нить сетки наводится на одну и ту же высоту задней и передней реек.

Высотмер-нивелир Л. А. Кашина (1972 г.) снабжен самоустанавливающимся высотным штрихом и обеспечивает $m_{h_{\text{КМ}}} = 8$ мм ($K=0; K=2$) и $m_{h_{\text{КМ}}} = 30$ мм ($K=5; K=10$). Высотмеры успешно используются в настоящее время при проложении высотных ходов, особенно в пересеченной и горной местности.

§ 41. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕДУЦИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Преобразователь с механическим регулированием расстояний между нитями. На базе преобразователя тахеометра ДК-RV фирма «Керн» изготовила более совершенный преобразователь в тахеометре К1-РА с автоматическим устройством. Здесь s и h определяются в виде отсчетов по рейке.

В авторедуцирующем инженерном тахеометре К1-РА, в отличие от тахеометра ДК-RV, неподвижный штрих в поле зрения трубы представлен слева одной линией (рис. 105), а справа от вертикального штриха двойной линией, причем весь подвижный штрих изображается прямой горизонтальной линией. В зависимости от наклона трубы подвижный штрих, нанесенный на пластинке, перемещается в поле зрения трубы с помощью эксцентрика (рис. 106). Эксцентрик приводится в движение через

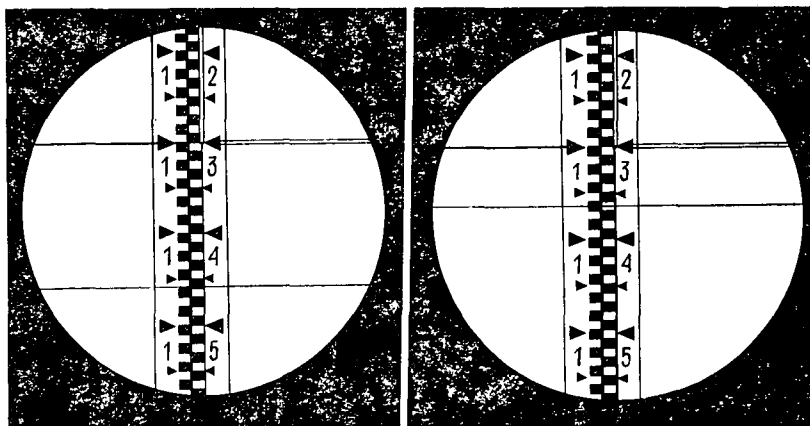


Рис. 105. Поле зрения тахеометра К1-РА

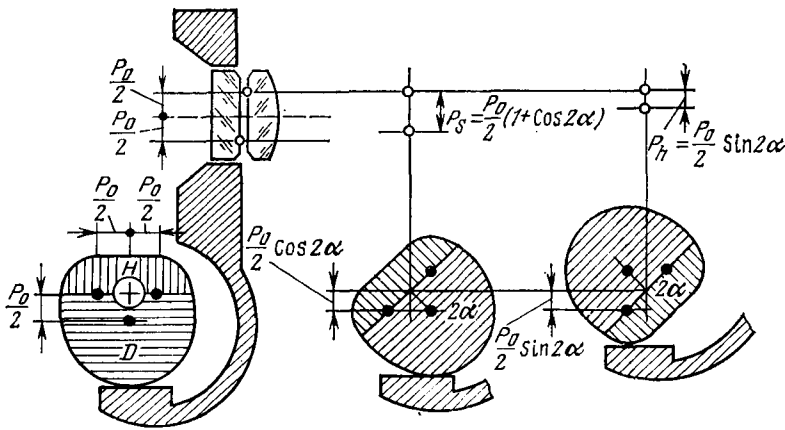


Рис. 106. Преобразователь тахеометра К1-РА

систему зубчатых передач, связанных с горизонтальной осью (осью вращения трубы). Он имеет две рабочие поверхности (показаны разной штриховкой на рис. 106). Одна поверхность рассчитана для горизонтальных проложений по формуле

$$P_s = \frac{P_0}{2} (1 + \cos 2\nu) = P_0 \cos^2 \nu, \quad (7.14)$$

другая — для превышений по формуле

$$P_h = \frac{P_0}{2} \sin 2\nu, \quad (7.15)$$

где P_0 — расстояние между дальномерными штрихами, соответствующее расстоянию на местности при наклоне трубы $\nu=0$, при $K=100$.

Для измерения s или h эксцентрик устанавливается наблюдателем в соответствующее положение поворотом головки переключателя на 180° . При наклоне зрительной трубы на угол ν эксцентрик наклонится на 2ν , изменяя P_s или P_h между дальномерными штрихами в зависимости от положения переключателя.

Измерение s и h производится в два приема, сначала горизонтальное проложение, затем превышение или наоборот.

*Опико-механический преобразователь, автоматически уменьшающий диастиметрический угол**. В тахеометре Редта-002 и других подобных ему приборах угол уменьшается поворотом оптических клиньев.

Во внутрибазных тахеометрах также автоматически уменьшается диастиметрический угол только с помощью или неподвижных клиньев, или полулинз.

* Подробно рассматривается в гл. 12. § 72.

§ 42. НОМОГРАММНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принцип расчета и построения кривых. Широкое распространение в геодезических приборах получили автоматические преобразователи в виде номограмм, изображение которых передается в поле зрения трубы оптико-механическим путем*.

Приведем упрощенное определение расчетных величин:

$$s = (Cl + c) \cos^2 v, \quad (7.16)$$

$$h = 1/2 (Cl + c) \sin 2v, \quad (7.17)$$

вместо C подставим его значение f/P ; постоянное слагаемое c примем равным нулю, как это имеет место в большинстве современных приборов [22], и будем иметь в виду, что в рабочих диапазонах изменения длин линий фокусное расстояние системы практически не изменяется, получим

$$s = \frac{f}{P} l \cos^2 v, \quad (7.18)$$

$$h = \frac{1}{2} \frac{f}{P} l \sin 2v. \quad (7.19)$$

Требуется получить формулы для определения s и h вида

$$s = K_s l_s, \quad (7.20)$$

$$h = K_h l_h. \quad (7.21)$$

Приравнивая правые части формул (7.18) и (7.20), (7.19) и (7.21), получим

$$K_s = \frac{f}{P_s} \cos^2 v, \quad (7.22)$$

$$K_h = \frac{1}{2} \frac{f}{P_h} \sin 2v. \quad (7.23)$$

Откуда получим приближенные значения расчетных величин P_s и P_h — расстояний между нитями:

$$P_s = \frac{f}{K_s} \cos^2 v, \quad (7.22')$$

$$P_h = \frac{1}{2} \frac{f}{K_h} \sin^2 v. \quad (7.23')$$

Для сравнения приведем строгие расчетные формулы:

$$P_s = \frac{f \cos^2 v}{K_s \pm \sin v \cos v}, \quad (7.24)$$

$$P_h = \frac{1/2 f \sin 2v}{K_h \pm \sin^2 v}. \quad (7.25)$$

* Первый прибор с номограммой создан в 1896 г. по предложению Гаммера.

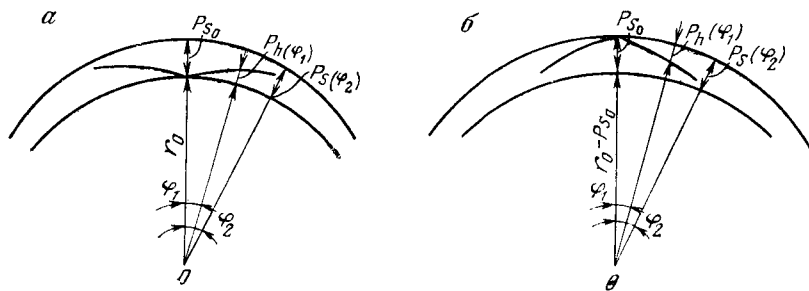


Рис. 107. Номограммные преобразователи

Построение кривых выполняется в системе полярных координат радиуса-вектора r и полярного угла φ .

Начало координат (точку O , рис. 107) совместим с центром основной окружности радиуса r_0 . Величина r_0 выбирается в зависимости от размеров круга, на котором предстоит строить номограмму. Полярная ось совпадает с направлением $\varphi=0$. В общем виде полярный угол

$$\varphi = \lambda\nu, \quad (7.26)$$

где ν — угол наклона визирной линии, λ — переводной коэффициент, характеризующий степень увеличения угла ν в преобразователе. В тахеометре Дальта и в советских приборах $\lambda=1$. В тахеометрах RDS фирмы «Вильд» и DKR фирмы «Керн» $\lambda=4$.

В принятой системе координат формулы (7.24) и (7.25) запишутся так:

$$r_s = r_0 \pm \frac{f \cos^2 \nu}{K_s \pm 1/2 \sin 2\nu}, \quad (7.27)$$

$$r_h = r_0 \pm \frac{1/2 f \sin 2\nu}{K_h \pm \sin^2 \nu}. \quad (7.28)$$

Пользуясь неопределенностью K_s и K_h в формулах (7.22) и (7.23), (7.24) и (7.25), их величины выбирают удобными для счета в уме: $K_s=100$; $K_h=\pm 10$; ± 20 ; ± 50 ; ± 100 .

По заданным углам наклона строятся кривые s и h , т. е. номограммы (рис. 107, а, б). Рис. 107, а соответствует принципу построения кривых в тахеометре Дальта, а рис. 107, б — в советских номограммных приборах.

В современных приборах номограммы наносятся или на вертикальном круге, или на специальном круге, соосном с вертикальным. В том и другом случаях при наклоне зрительной трубы в ее поле зрения атоматически устанавливаются расстояния P_s и P_h , соответствующие углу наклона.

На рейке отсчитываются отрезки l_s и l_h и получаются s и h по формулам (7.20) и (7.21).

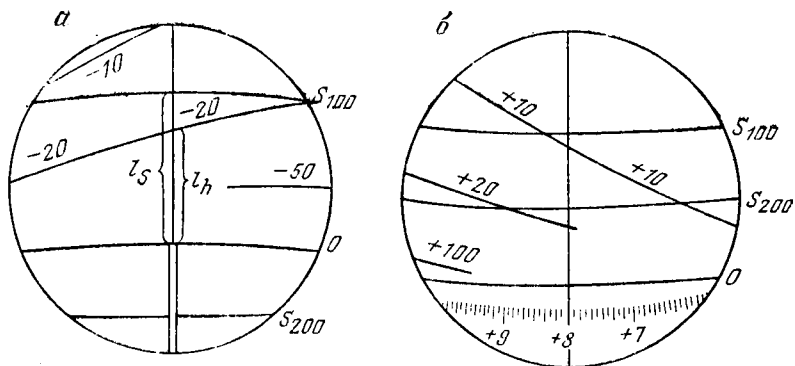


Рис. 108. Поле зрения тахеометра Дальта 010А и кипрегеля КН

На рис. 108 показано поле зрения тахеометра Дальта-010А (рис. 108, а) и поле зрения кипрегеля КН (рис. 108, б).

Нанесение кривых осуществляется двумя способами: гравированием и копированием. При гравировании каждая кривая наносится отдельно гравировальным резцом. При копировании вычерчивается номограмма в увеличенном виде, затем ее уменьшают фотометодом или пантографированием с последующим травлением.

Вопрос технологии точного построения идеально тонких кривых является одним из самых сложных, его решение занимает много времени и сопряжено с большими трудностями.

§ 43. ДРУГИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве отдельных звеньев современных геодезических приборов применяют преобразователи, в которых неэлектрическая величина (линейная, угловая, усилие, момент вращения) преобразуется в электрический сигнал (изменение силы тока, напряжения, частоты, фазы переменного тока или длительности импульса), который может быть непрерывным и дискретным, представленным в виде определенной комбинации импульсов.

Конструктивно эти преобразователи могут быть выполнены и как самостоятельные геодезические устройства.

Принцип действия преобразователей выбирают, исходя из требуемого диапазона измерений, точности воспроизводимости характеристик, минимальности измерительного усилия.

Рассмотрим наиболее распространенные типы преобразователей.

Омические преобразователи. К омическим преобразователям относят, например, реостатные (потенциметрические), тензометрические преобразователи (тензопреобразователи), а также механотроны.

Реостатные преобразователи состоят из сопротивления и передвижного контактного устройства. Входной величиной является механическое перемещение, выходной — напряжение постоянного и переменного тока. Реостатные преобразователи чаще всего выполняют в виде каркаса из изоляционного материала, на котором намотана проволока диаметром $0,03 \div 0,5$ мм из нихрома, манганина, константана или других сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Материалы проволоки и каркаса должны минимально отличаться по температурным коэффициентам линейного расширения. Для каркаса используют оксидированные или покрытые слоем лака металлы, а иногда стекло.

В процессе измерений по каркасу с проволокой скользит контактная щетка. Для уменьшения износа используют роликовые щетки. При движении щетки сопротивление реостатного преобразователя изменяется ступенями, равными сопротивлению одного витка проволоки

$$\Delta R = R/n,$$

где R — сопротивление проволоки преобразователя; n — число витков проволоки.

Наряду с проволочными преобразователями применяют пленочные, в которых рабочим элементом являются полупроводниковые или металлические сплавы, нанесенные на каркасе из изоляционного материала.

Для измерения линейных величин реостатные преобразователи делают с прямолинейным каркасом, для измерения угловых величин — с кольцевым каркасом. В технике геодезических измерений, например в наклономерах, используют реостатные преобразователи с жидкостным контактом.

Достоинствами реостатных преобразователей являются простота конструкции, относительно малые габариты, возможность питания от источника постоянного и переменного тока. Существенным недостатком их является нелинейность характеристики, вызванная неоднородностью диаметра и свойств проволоки, непостоянством сечения каркаса и шага намотки, изменением сопротивления проволоки от натяжения.

Диапазон работы реостатных преобразователей $0,001—1$ м, ошибка измерений $0,5$ мм и более.

Эти преобразователи могут быть применены при изучении смещений конструкций и осадок сооружений.

Работа тензопреобразователей основана на свойствах металлов и полупроводников изменять сопротивление при растяжении и сжатии в пределах упругих деформаций. Известны наклеиваемые и несклеиваемые тензопреобразователи. Наклеиваемые тензопреобразователи, нашедшие наибольшее распространение в технике, представляют собой тонкие эластичные пластины бумаги толщиной $0,03—0,05$ мм или пленки лака, на которые с помощью специальных приспособлений нанесен тензо-

элемент в виде петлевидной решетки из проволоки диаметром 0,015—0,05 мм или фольги толщиной 0,002—0,01 мм. Сверху тензоэлемент покрывают лаком. Концы тензоэлемента припаяны к выводам-проводникам. Тензоэлементы из фольги обладают большей чувствительностью, чем из проволоки. Они могут быть выполнены любой формы. Тензопреобразователи наклеивают на поверхность детали, подверженной растяжению или сжатию. Изготавливают тензопреобразователи с базой 0,5—100 мм и более.

Ненаклеиваемые тензопреобразователи выполняют в виде намотки из тензочувствительной проволоки, связывающей между собой две взаимоперемещающиеся детали или конструкции. Намотку проволоки выполняют с предварительным натягом.

На точность работы тензопреобразователей влияют ошибки, вызванные изменением температуры, текучестью тензоэлементов, поперечными деформациями и др.

Механотроны представляют собой электронные и ионные лампы, в которых электроды могут изменять взаимное расположение под действием внешних усилий. В механотроне стержень 1 взаимодействует с каким-либо перемещающимся элементом, создающим давление X (рис. 109). Вследствие этого мембрана 2 деформируется, положение анода 3 относительно катода 4 изменяется, что вызывает разбаланс моста сопротивлений 5.

Чувствительность механотронов очень высока (до 0,0001 мм), но диапазон измерений невелик (до 1,0—1,5 мм).

Тензопреобразователи и механотроны можно использовать в качестве чувствительных элементов в геодезических приборах, а в автономном исполнении — при высокоточных геодезических наблюдениях за небольшими по величине осадками и деформациями строительных и технологических конструкций.

Индуктивные преобразователи. Индуктивные преобразователи в геодезической практике применяют для преобразования линейных и угловых механических перемещений в электрический сигнал. Индуктивный преобразователь представляет собой дроссель, состоящий из магнитопровода и обмоток. Входная величина, например перемещение, воздействует на магнитопро-

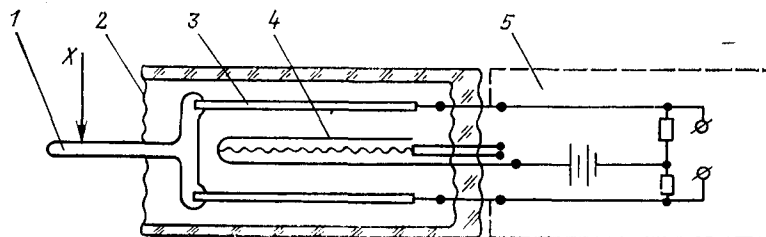


Рис. 109. Схема механотрона с подвижными анодами

вод или параметры зазора и этим изменяет индуктивность системы.

В геодезии при центрировании, створных и наклономерных измерениях часто используют индуктивные преобразователи, содержащие одну или несколько катушек индуктивности, расположенных на магнитопроводящем каркасе, и подвижный якорь в виде струны из ферромагнитного материала.

На точность работы индуктивных преобразователей оказывают влияние изменения температуры, влажности, нелинейность характеристик и др. При учете указанных факторов можно производить измерения величины смещения наблюдаемых объектов с ошибкой от нескольких единиц до нескольких десятков микрометров в диапазоне до 2 мм.

Емкостные преобразователи. Емкостные преобразователи представляют собой конденсаторы переменной емкости. В зависимости от требуемых характеристик используют различные типы емкостных преобразователей: с переменным зазором δ (рис. 110, а), с переменной площадью Q (рис. 110, б), с переменной диэлектрической проницаемостью среды ϵ (рис. 110, в). В преобразователях первых двух типов при механическом перемещении пластин изменяются емкость конденсатора и соответственно электрические параметры схемы преобразователя. Преобразователи с переменным зазором имеют нелинейную характеристику. Преобразователи с переменной площадью имеют более линейную характеристику. Преобразователи с переменной величиной диэлектрической проницаемости ϵ применяют в гидростатических нивелирах. В них при изменении положения уровня жидкости меняется соотношение площадей пластин конденсатора, находящихся в жидкости с диэлектрической проницаемостью ϵ и в воздухе с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 (см. рис. 110, в).

На точность работы емкостных преобразователей оказывают влияние изменения температуры, влажности, емкости подводящих кабелей, а также радиация.

Емкостные преобразователи редко применяют в геодезических приборах, но они при соответствующем конструктивном и схемном исполнении могут быть использованы для осуществления высокоточных измерений угловых и линейных смещений малой величины (до 2—3 мм) элементов конструкций и технологического оборудования.

Пьезоэлектрические преобразователи. Целый ряд кристаллов (кварц, серноокислый литий, сегнетовая соль, винноокислый калий, фосфорноокислый аммоний и др.) обладают свойствами обратимых электромеханических преобразователей. На их гранях при механических деформациях возникают электростатические заряды, а в электрическом поле появляются механические деформации. Тип кристалла, размеры пластины, ориентация ее граней относительно кристаллографических осей являются определяющими для характеристик пьезоэлектрического преобра-

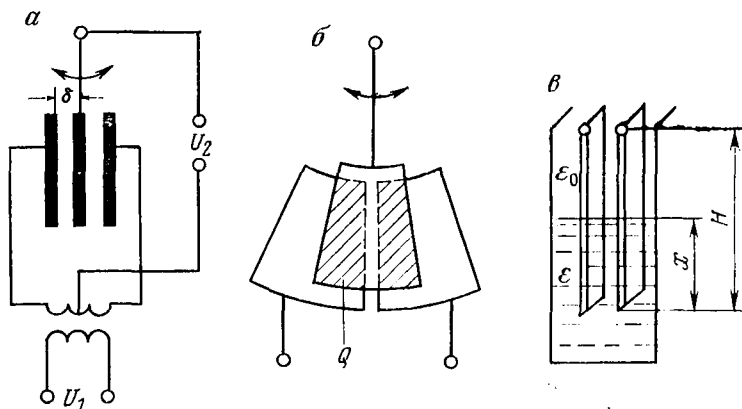


Рис. 110. Схемы емкостных преобразователей

зователя и, в частности, величины коэффициента, связывающей электрические и механические величины.

В некоторых геодезических приборах пьезоэлектрические преобразователи могут быть использованы в качестве генераторов и приемников звуковых колебаний.

Фотоэлектрические преобразователи. Благодаря своей высокой точности, широкому диапазону измерений, разнообразию конструкций, возможности полной автоматизации отдельных процессов измерений фотоэлектрические преобразователи по сравнению с другими нашли наибольшее распространение как в стандартных, так и нестандартизированных геодезических приборах.

Любой фотоэлектрический преобразователь содержит фотоприемник и координатор. Фотоприемник служит для регистрации в пространстве оптической оси светового луча от источника излучения, при помощи которого задано проектное положение какой-либо геодезической разбивочной линии.

В качестве фотоприемников используют германиевые и кремниевые фотодиоды, обладающие малыми габаритами, низкими напряжениями питания, малыми уровнями шумов, высокой чувствительностью, устойчивостью к внешним воздействиям. Реже используют фотосопротивления различных марок. При создании высокоточных фотоэлектрических датчиков применяют фотоэлектрические умножители (ФЭУ). Они обладают широким частотным диапазоном, высокой чувствительностью и малой инерционностью. Принцип действия ФЭУ состоит в преобразовании световой энергии в фотоэлектрическую эмиссию с последующим многократным ее усилением.

В качестве источников излучения применяют лампы накаливания и оптические квантовые генераторы, снабженные оптическими элементами (линзами, призмами, щелями, масками) для формирования светового луча.

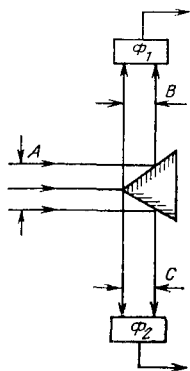


Рис. 111. Однокоординатный фотоэлектрический датчик

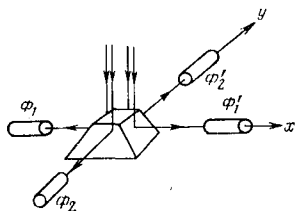


Рис. 112. Двухкоординатный фотоэлектрический датчик

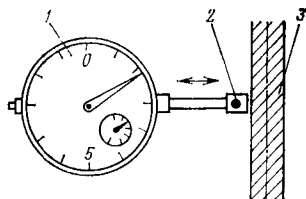


Рис. 113. Фотоэлектрический датчик с координатором в виде индикатора часового типа

Координаторы первичных преобразователей служат для определения положения светового луча, заданного источником излучения, относительно какой-либо базовой точки преобразователя. В качестве простейших координаторов могут служить индикаторы часового типа, микрометры и другие приборы измерительной техники, которые механически соединены с фотоприемником. Более сложные координаторы могут быть выполнены в виде двух или четырех граней светоделительной призмы, сканирующей щели с датчиком ее перемещений, мозаичной структуры различной формы из фотоприемников и т. д.

Сигналы фотоэлектрического преобразователя, обычно усиливаясь усилителем, попадают в преобразователь информации и далее в регистратор.

Фотоэлектрические преобразователи применяют в датчиках для измерения величин линейных смещений и угловых разворотов [23].

Наиболее простым датчиком для измерения величин линейных смещений является однокоординатный датчик с прямоугольной светоделительной призмой (рис. 111). Когда светоделительная призма расположена симметрично относительно оси светового потока A , на фотоприемники Φ_1 и Φ_2 попадает одинаковое количество света, и сигналы в них равны между собой. При линейном смещении положения светового потока A или светоделительной призмы происходит перераспределение световых потоков B и C в плечах датчика. При этом разностный электрический сигнал с фотоприемником Φ_1 и Φ_2 соответствует величине линейного смещения.

В аналогичном двухкоординатном датчике применена четырехгранная призма (рис. 112). В нем фотоприемники Φ_1 и Φ_1' входят в состав одного однокоординатного датчика по оси x , а фотоприемники Φ_2 и Φ_2' — другого — по оси y .

В технике геодезических измерений широко применяют фотоэлектрический датчик, координатором которого является ин-

дикатор часового типа или микрометр. На ножке, например, индикатора часового типа 1 крепится фотоприемник 2 (рис. 113). Фотоприемник в процессе измерений перемещают и по соответствующим сигналам регистрируют края светового потока (тени) 3. При этом берут отсчеты по шкале индикатора. Средний из отсчетов соответствует положению оси светового потока (тени) 3.

Существуют и другие конструкции фотоэлектрических преобразователей, которые будут подробно изучаться в курсе «Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений».

Глава 8

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ, ВЫПУСКА, ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

§ 44. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Основные стадии разработки и выпуска геодезических приборов

Все новые приборы (изделия) создают по определенным стадиям:

I. Техническое задание (ТЗ)

Техническое задание составляет заказчик совместно с подрядчиком или, по крайней мере, согласовывает его с подрядчиком.

Техническое задание составляется не только на сложные приборы (нивелиры, теодолиты, светодальномеры и т. д.); в процессе повседневной работы инженеры-оптики или геодезисты могут выдавать технические задания на разработку несложных приборов, оборудования и приспособлений смежным конструкторским или научно-исследовательским группам и отделам своего предприятия или предприятия-смежника в порядке прямой производственной деятельности, рационализации или изобретательства. Такие изделия затем изготавливают в единичном исполнении или малой серией для текущих нужд производства.

Технические условия и техническое задание должны учитывать состояние науки и техники на данный период и тенденции их развития.

При разработке технического задания необходимо соблюдать определенные правила и порядок изложения технических требований к разрабатываемому изделию. Немаловажное

значение в успехе выполнения подрядчиком разработки изделия имеет инженерная грамотность составленного технического задания, полнота и обоснованность требований, учет реальных условий работы изделия.

Язык задания должен быть техническим, лаконичным. Изложение следует вести в повелительном наклонении (разработать..., следует учесть... и т. д.). Текст задания должен сопровождаться оптическими, электрическими или другими схемами или функциональными схемами, эскизами некоторых принципиальных узлов или прибора в целом.

Техническое задание должно содержать следующие основные пункты:

1. Наименование изделия.

2. Составитель задания.

3. Цель и стадия разработки (чертежи на стадии эскизного или технического проекта, габаритные чертежи, рабочие чертежи, макет, опытный образец, опытно-производственный образец, акты, отчеты, инструкции и т. д.).

4. Назначение изделия, область его применения, общая характеристика изделия.

5. Преимущественные условия эксплуатации (лабораторные, цеховые, полевые): а) диапазон температур; б) влажность во всем диапазоне температур; в) давление; г) вибрационные перегрузки, линейные ускорения; д) условия транспортировки; е) радиационные условия и др.

6. Технические требования:

6.1. Класс измерений, точность измерения угла одним приемом для теодолита, ошибка на 1 км хода для нивелира и т. д.

6.2. Состав изделия — основные узлы, комплектность (целесообразно одновременно с разработкой, например, нивелира разрабатывать рейки, штатив и т. д., можно указать марки примененного вспомогательного оборудования).

6.3. Требования к оптическим системам изделия (длина трубы в миллиметрах, увеличение трубы в кратях, поле зрения трубы в градусах, разрешающая сила трубы в секундах, ближний предел визирования, характеристики оптического отвеса в теодолите — вид сетки нитей, увеличение и т. д.).

6.4. Размеры или диаметр шкал и их цена делений, пределы измерения вертикальных углов.

6.5. Тип отсчетного устройства (верньер, штриховой микроскоп с индексом, шкаловой микроскоп, микроскоп с микрометром, оптический микрометр в теодолите, визуальный микрометр с плоскопараллельной пластиной или пентапризмой в нивелире).

6.6. Цена деления шкалы микрометра в теодолите, барабана плоскопараллельной пластины (пентапризмы) в нивелире или другом приборе.

6.7. Цены деления уровней (круглого или установочного, цилиндрического).

6.8. Пределы работы компенсаторов и точность установки оси с их помощью (для нивелиров с компенсатором, теодолитов и т. д.).

6.9. Требования к входным и выходным сигналам для электронных схем.

6.10. Типы основных осей.

6.11. Желаемый материал (устанавливается в зависимости от условий эксплуатации, для тропических или влажных условий применяются материалы со стойким антикоррозийным покрытием, для условий радиации исключается применение оптических деталей из органических материалов и т. д., для лабораторных условий могут применяться материалы с большим удельным весом: сталь, латунь; для полевых — с малым удельным весом: дюралюминий, пластмассы для кожухов и т. д.).

6.12. Исполнение: обыкновенное, пылезащитное, взрывозащитное, герметичное, водозащитное, противоударное, противовибрационное.

6.13. Источники энергии (напряжение, частота, мощность и др. указываются не только для оптико-электронных приборов, но и для оптико-механических, например, для обеспечения подсветки при работе в ночное время).

6.14. Срок службы.

6.15. Срок и условия хранения.

7. Требования к надежности (время безотказной работы).

8. Периодичность регламентных работ.

9. Требования по унификации и стандартизации.

10. Требования к упаковке, пломбированию, транспортировке до получателя.

После оформления и утверждения технического задания приступают непосредственно к проектным работам.

II. Техническое предложение

Технические предложения разрабатывают с целью выявления дополнительных или уточненных технических и эксплуатационных требований к приборам, которые не были отражены в ТЗ и для обоснования которых целесообразно выполнить предварительную конструкторскую проработку и анализ возможных вариантов решения.

Наиболее распространенными видами работ, проводимых на стадии технического предложения, являются выявление возможных вариантов конструктивного решения прибора, сравнительная оценка этих вариантов по различным показателям, определенным в ТЗ, проверка их на патентную чистоту, соответствие требованию стандартизации, унификации, техники безопасности и др.

Конструкторская документация, выпускаемая на этом этапе проектирования, включает упрощенные чертежи общего вида прибора, обобщенные схемы и пояснительную записку.

III. Стадия эскизного проектирования

На стадии эскизного проектирования полностью осмысливается идея прибора, его варианты, разрабатываются эскизные, габаритные и другие чертежи, как правило, без детализовки. Намечаются пути исследования отдельных узлов прибора, делается макетирование некоторых узлов и проверка их работы. Последняя производится не всегда, хотя и желательна.

IV. Стадия технического проектирования (ТП)

На этой стадии выбирают определенный, наиболее удачный вариант к окончательной разработке. Разрабатываются технические чертежи с детализовкой, по которым можно изготовить макет. Макет изготавливают, как правило, в мастерских подрядчика, а иногда и на заводе-изготовителе. Макет подвергают тщательному исследованию, по результатам которого выявляют узкие места прибора, делают доработку и усовершенствование узлов. Материалы испытаний оформляют отчетом.

V. Стадия рабочего проектирования (рабочие чертежи — РЧ)

На этой стадии разрабатывают окончательные детальные рабочие чертежи. Рабочие чертежи согласовывают с заказчиком и передают на завод-изготовитель. На заводе изготавливают отдельные образцы прибора, которые подвергают государственным испытаниям. Если прибор отвечает всем требованиям Государственной комиссии, современному уровню науки и техники, потребностям народного хозяйства или отрасли, его запускают в серийное производство (большой или малой серий).

Единая система конструкторской документации

В своей практической деятельности инженер-геодезист сталкивается с необходимостью составления или согласования технических чертежей. Такая необходимость возникает в случае разработки, например, какого-либо нового нестандартизированного геодезического прибора или приспособления, в случае ремонта геодезических приборов или их совершенствования и т. д. Разработанные эскизы или рабочие чертежи передают на завод-изготовитель, в производственно-технический отдел или мастерские предприятия.

Согласно общему требованию все чертежи необходимо составлять в Единой системе конструкторской документации (ЕСКД).

ЕСКД — комплекс государственных стандартов, устанавливающих единые правила разработки, оформления и обращения в СССР конструкторской документации. ЕСКД введена для

обеспечения возможности взаимообмена конструкторской документации между предприятиями без переоформления, стабилизации комплектности, унификации и упрощения форм документации, а следовательно, снижения стоимости и трудоемкости разработок изделий и т. д.

При разработке приборов на различных стадиях проектирования инженеру-геодезисту приходится сталкиваться, в основном, со следующими видами графической и текстовой конструкторской документации: чертеж детали, сборочный чертеж, габаритный чертеж, спецификация, пояснительная записка, технические условия.

ЕСКД предусматривает следующие стадии разработки: техническое задание, техническое предложение (по результатам анализа технического задания), эскизный проект, технический проект (ТП), рабочие чертежи (РЧ), изготовление и испытание опытного образца, установочных серий, головной серии [43]. Перечисленную выше графическую и текстовую документацию необходимо оформлять практически на каждой стадии проектирования. Естественно, для простых приборов и приспособлений, особенно нестандартизированного типа, число стадий может быть сокращено.

Согласно требованиям ЕСКД все конструкторские чертежи нужно оформлять (согласно ГОСТ 2.301—68) на листах следующих форматов: 44 (1189×841 мм²), 24 (594×841 мм²), 22 (594×420 мм²), 12 (297×420 мм²), 11 (297×210 мм²), т. е. обозначения форматов состоят из двух цифр—первая указывает кратность одной стороны к величине 297 мм, вторая — кратность другой стороны к величине 210 мм. Размеры рамок чертежей и основные подписи регламентируются ГОСТ 2.104—68. Если невозможно изобразить деталь в натуральную величину (масштаб 1 : 1), применяют уменьшенное или увеличенное изображение (ГОСТ 2.302—68).

Масштабы уменьшения: 1 : 2; 1 : 2,5; 1 : 4; 1 : 5; 1 : 10; 1 : 15; 1 : 20; 1 : 25; 1 : 40; 1 : 50; 1 : 75; 1 : 100; 1 : 200; 1 : 400; 1 : 500; 1 : 800; 1 : 1000.

Масштабы увеличения: 2 : 1; 2,5 : 1; 4 : 1; 5 : 1; 10 : 1; 20 : 1; 40 : 1; 50 : 1; 100 : 1.

Комплект чертежей на прибор содержит следующие документы:

- 1) титульный лист; 2) спецификация (для стадии РЧ); 3) сборочный чертеж (для стадии РЧ); 4) ведомость покупных изделий (для стадии ТП и РЧ); 5) пояснительная записка (для стадии ТП); 6) технические условия (для стадии ТП и РЧ); 7) детализованные чертежи (для стадии РЧ).

1. Титульный лист. Является первым листом документации и выполняется, как правило, на формате И1.

На титульном листе вверху указывается организация-работчик, в середине листа указывается стадия проектирования (например, рабочие чертежи), далее — наименование изделия и номер документа, на который составляется титульный

лист. В нижней части листа указываются исполнители (с подписями) и год издания документа.

2. Спецификация (ГОСТ 2.108—68). Спецификацией называют таблицу, содержащую перечень всех составных частей, входящих в данное изделие, а также примененные конструкторские документы, относящиеся к данному изделию. Спецификация составляется на отдельных листах формата И1 на каждую сборочную единицу (табл. 6). Спецификация состоит из разделов: документация, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы. В графе «Формат» указывают форматы документов. В графе «Зона» указывают обозначение зоны в случае разбивки поля чертежей на зоны. В графе «Поз.» указывают порядковые номера составных частей изделия. В графе «Обозначение» указывают номера документов. В графе «Наименование» указывают наименование документов, например, «Сборочный чертеж», «Технические условия» и т. д., наименования изделий и деталей, например, «Крышка», «Палец» и т. д.

В графе «Кол.» указывают количество конкретных частей или деталей в одном изделии.

3. Сборочный чертеж. Дает представление о расположении и взаимной связи соединяемых составных частей изделия и обеспечивает возможность его сборки. Мелкие элементы деталей: фаски, скругления, накатки и т. п. — на сборочном чертеже не показывают. Примененные, типовые и покупные части изделия можно изображать упрощенно. Крепежные детали показывают, как правило, нерассеченными. Если на чертеже имеется ряд однотипных крепежных соединений, то в одном-двух местах их показывают условно или упрощенно, в остальных — центровыми (+) или осевыми (— · —) линиями. Подшипники в осевых сечениях допускается изображать упрощенно.

На сборочном чертеже (рис. 114) для справок показывают основные размеры. Эти размеры обозначают часто звездочкой. На сборочном чертеже можно показывать размеры, которые учитывают при монтаже изделия.

Разрезы изделия делают в 1—3 видах. При необходимости показывают дополнительные разрезы отдельных узлов.

На сборочном чертеже можно указывать основные характеристики изделия, а также технические требования к его сборке и юстировке. Номера позиций на сборочном чертеже должны соответствовать номерам позиций, указанным в спецификации.

4. Ведомость покупных изделий. Составляют на основании спецификации данного изделия.

Запись покупных изделий производят по разделам: резисторы, изделия полупроводниковые и т. д., изделия соединительные и т. д., приборы измерительные и т. д., уровни, шарико- и роликоподшипники и др.

Таблица 6

Формат	Зона	Пос.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
11				Документация		
12			И 6.104.000ВП	Титульный лист		
22			И 6.104.000СБ	Ведомость покупных изделий		
11			И 6.104.000ТУ	Сборный чертеж		
				Технические условия		
				Детали		
11	2		И 6.104.001	Вновь разработанные		
				Палец	1	
11	3		И 6.104.002	Плита	1	
12	4		И 6.104.003	Стойка	1	
12	5		И 6.104.004	Корпус	1	
11	6		И 6.104.005	Пробка	1	
11	7		И 6.104.006	Винт	1	
11	8		И 6.104.007	Винт	1	
				Стандартные изделия		
11				Винт м 3×12—4801	8	
				ГОСТ 1491—80		
12				Гайка м 3—501	1	
				ГОСТ 5915—70		
13				Шайба пружинная	2	
				3—65 г ГОСТ 6402—70		
14				Шайба 3—401	8	
				ГОСТ 11371—78		
				Прочие изделия		
17				Ампула уровня АЦП10"	1	
				—12×64 ГОСТ 2386—73		
11			И 6008.020	Футляр	1	

Изм. лист	№ докум.	Подп.	Дата	И 6.104.000	лит.	листв.	листов
Разработчик				Вкладыш с уровнем			
Проверил							
Нач. сектора							
Нормо-контролер							
Утверждаю							

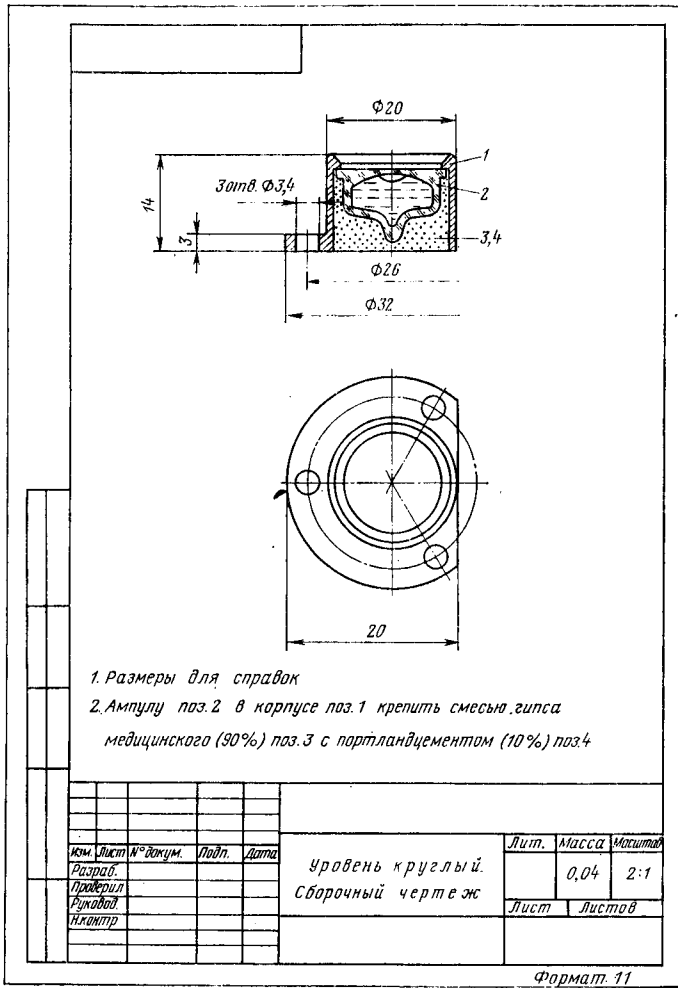


Рис. 114. Сборочный чертеж. Уровень круглый

5. Пояснительная записка. В общем случае должна состоять из следующих разделов: введение; назначение и область применения изделия; техническая характеристика; описание и обоснование выбранной конструкции; расчеты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции; описание работ с применением разрабатываемого изделия. Пояснительную записку выполняют на листах формата 11.

В зависимости от особенностей изделия отдельные разделы допускается объединять или исключать, а также вводить новые разделы.

6. Технические условия (ГОСТ 2.106—68). В техни-

ческих условиях указывают назначение изделия, технические требования, правила приемки готового изделия, упаковки и транспортировки, методы контроля (испытаний, измерений), указания по эксплуатации, гарантии поставщика.

7. Деталировочные чертежи. По ним механики изготавливают детали изделия. Чертежи оформляют согласно ГОСТ 2.303—68; ГОСТ 2.308—79; ГОСТ 2.309—73; ГОСТ 2.310—68 (СТ. СЭВ 367—76); ГОСТ 2.311—68 (СТ. СЭВ 284—76); ГОСТ 2.312—72; ГОСТ 2.313—68—ГОСТ 2.316—68; ГОСТ 2.317—69.

На рис. 115 для примера показан деталировочный чертеж вкладыша.

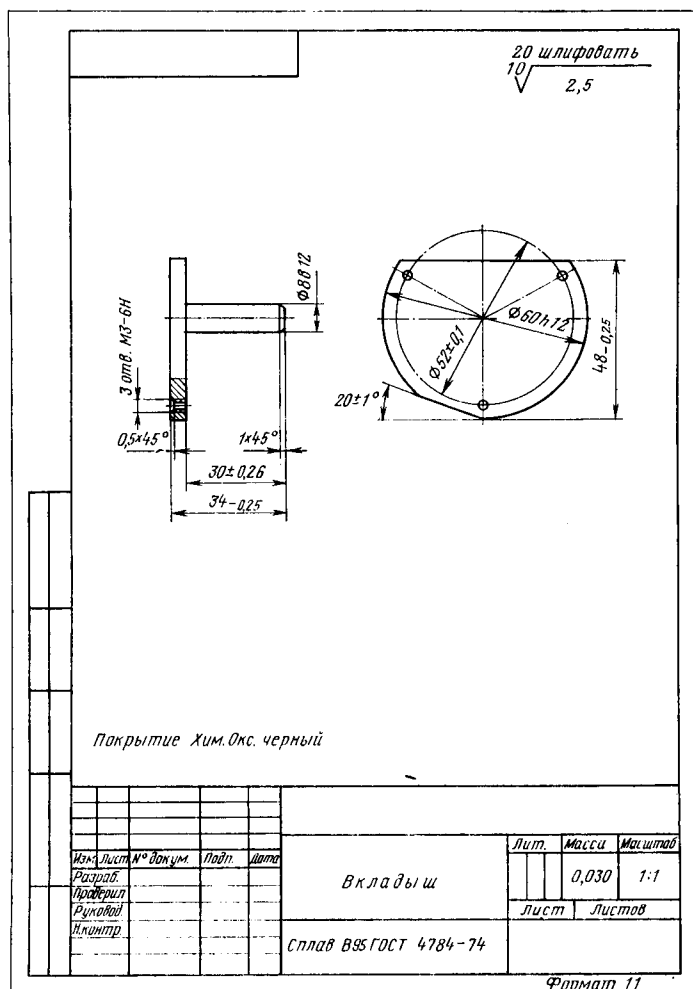


Рис. 115. Деталировочный чертеж. Вкладыш

Чертежи должны нести полную информацию о размерах деталей. Каждую деталь изображают на отдельном формате. Особое внимание следует обратить на обозначение предельных отклонений размеров согласно стандартам на допуски и посадки. Общее количество размеров на чертеже должно быть минимальным, но достаточным для изготовления и контроля детали.

Если какие-либо поверхности должны при изготовлении покрываться гальванически или другим путем, то тип покрытия указывают соответствующей записью (см. рис. 115).

В одной из граф штампа обязательно указывают материал, из которого нужно изготовить деталь (сталь 20Х13, сталь 3).

Каждый детализированный чертеж имеет свой номер согласно спецификации (номер указывают в штампе).

Можно рекомендовать при проектировании различного нестандартизированного геодезического оборудования, шаблонов и приспособлений шире использовать различные профили прокатной стали и цветных металлов. Это позволяет уменьшить трудоемкость при изготовлении многих деталей, особенно за счет фрезерных работ. Вообще при конструировании следует стремиться по возможности уменьшать объем фрезерной обработки за счет преобладания токарной, как наиболее простой. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий в соответствии с ЕСКД установлены в ГОСТ 2.412—68 (СТ. СЭВ 139—74). Оптические детали и сборочные единицы, состоящие из оптических деталей, соединенных между собой склеиванием или оптическим контактом, принято изображать на чертеже по ходу луча, идущего слева направо. Пример оформления чертежей оптических деталей дан на рис. 116. На чертеже дается изображение детали с указанием размеров, вида покрытий, шероховатостей поверхности (по ГОСТ 2.309—73), чистоты полированных поверхностей. В правой верхней части помещают таблицу, состоящую из трех частей:

1) требования к материалу (по ГОСТ 3514—76) (категорию и класс по показателю преломления — Δn_D , по средней дисперсии — $\Delta(n_F - n_C)$, категорию по оптической однородности, светопоглощению, двойному лучепреломлению; категорию и класс бесцветности, пузырности);

2) требования к изготовлению (предельное отклонение стрелки кривизны поверхности пробного стекла или допускаемая сферичность плоской поверхности N , а также предельное отклонение формы поверхности от сферы или плоскости — местные ошибки — ΔN , выраженные числом интерференционных колец или полос; наименьшее допустимое фокусное расстояние пластинок или призм, как результат сферичности их поверхностей f_{\min} выраженное в миллиметрах или метрах; допускаемая общая децентрировка или децентрировка каждой поверхности для линз C , выраженная в миллиметрах; предельная клиновидность пластины θ , выраженная в минутах или секун-

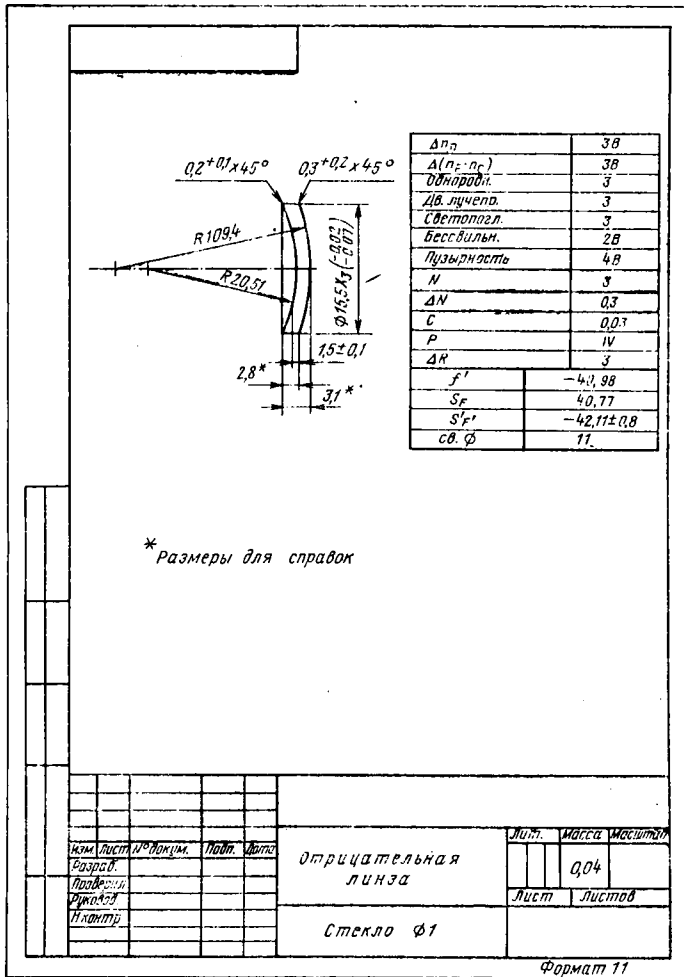


Рис. 116. Деталировочный чертеж. Отрицательная линза

дах, или разнотолщинность Q , выраженная в миллиметрах; предельная пирамидальность λ , выраженная в минутах или секундах; предельная разность равных по номиналу углов призмы δ_α , выраженная в минутах или секундах; класс чистоты полированных поверхностей P ; класс точности пробного стекла или предельные отклонения от значения расчетного радиуса поверхности ΔR , выраженные в %);








3) расчетные данные для каждой детали (для линз — фокусное расстояние f' , световой диаметр св. Φ , выраженные в миллиметрах; для призм — световой диаметр св. Φ по наибольшему сечению, вершинные отрезки S_F и $S_{F'}$, геометрическая

длина хода лучей в призме, выраженные в миллиметрах). Если какие-либо из перечисленных требований не нормируют, то соответствующую графу в таблице прочеркивают или не вводят вообще.

Ниже чертежа детали приводят сведения о характере и составе покрытий, отделке нерабочих поверхностей детали и дополнительных требованиях, не отраженных в основной таблице. Здесь же указывают условные обозначения покрытий и их характеристики.

В табл. 7 даны условные обозначения покрытий.

Таблица 7

№ п/п	Характер покрытия	Обозначение	Область применения
1	Отражающее непрозрачное зеркальное (внешнее)		Зеркала лабораторных приборов, точные отражатели
2	Отражающее непрозрачное зеркальное (внутреннее)		Любые зеркала и отражатели
3	Светоделительное полупрозрачное		Полупрозрачные и др. покрытия
4	Просветляющее		Линзы и призмы систем с высоким коэффициентом пропускания
5	Фильтровое		Покрытия в виде пленок: поляризационных, нейтральных, ослабляющих
6	Защитное прозрачное		Для защиты стекол от внешних условий
7	Токопроводящее (обогревающее)		Обогревные и токопроводящие пленки

Все материалы, применяемые для покрытий оптических деталей, имеют свой порядковый номер. Некоторые из наиболее широко применяемых материалов следующие: 1 — алюминий, 2 — золото, 3 — медь, 4 — никель, 6 — платина, 7 — родий, 8 — серебро, 9 — хром, 12 — кремний, 15 — титан, 26 — олово двуххлористое, 21 — серебро азотнокислое, 43 — эфир кремниевый, 44 — эфир титановый, 63 — кислота уксусная, 72 — лак бакелитовый.

Условные обозначения способов нанесения отдельных слоев покрытий следующие: Р — из раствора; И — испарением; Т — травлением; Е — электролизом; Г — из газовой фазы; К — катодным распылением; Н — нанесением расплава; П — кистью или пульверизатором.

Примеры обозначения покрытий

⊗_{А, Б} — просветл. 44Р.43Р — просветляющее покрытие, нанесенное раствором титанового и кремниевого эфира.

⊖_А — светоделит. 1И.21Е — светоделительное покрытие из алюминия, нанесенное путем испарения в вакууме, с защитой электролизом в фосфорнокислом аммонии.

При выборе покрытий руководствуются техническими данными, условиями эксплуатации, расположением деталей в приборе.

Допуски и посадки на изготовление деталей

Основные понятия о размерах

1. Размер — числовое значение линейной величины в выбранных единицах измерения.

2. Действительный размер — размер, установленный измерением с допустимой точностью.

3. Предельные размеры — два предельно допустимых размера, между которыми должен находиться действительный размер.

4. Допуск — разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами.

5. Посадка — характер соединения деталей, определяемый величиной получающихся в нем зазоров или натягов.

Стандартами установлен следующий ряд типовых посадок:

<i>С натягом</i>	<i>Переходные посадки</i>	<i>С зазором</i>
Горячие Гр	Глухая Г	Скользкая С
Прессовые Пр	Тугая Т	Движения Д
Легкопрессовые ПРЛ	Напряженная Н	Ходовая Х
	Плотная П	Легкоходовая Лх
		Широкоходовая Шх
		Тепловая ходовая ТХ

Посадка с зазором предусматривает разность размеров отверстия и вала (размер отверстия больше размера вала). При посадке с натягом размер вала до сборки больше размера отверстия. При переходных посадках возможно получение как посадки с зазором, так и посадки с натягом.

Вал — термин, применяемый для обозначения наружных (охватываемых) элементов деталей.

Отверстие — термин, применяемый для обозначения внутренних (охватывающих) элементов деталей.

С 1980 г. введена Единая система допусков и посадок СЭВ (ЕСДП СЭВ). ЕСДП СЭВ является необходимым условием:

1) взаимозаменяемости изделий, сборочных единиц и деталей в промышленности стран—членов СЭВ;

2) единого оформления технической документации;

3) унификации и стандартизации инструментов, калибров и другой технической оснастки.

ЕСДП СЭВ призвана обеспечить эффективное выполнение интеграционных мероприятий стран—членов СЭВ в области машино- и приборостроения, а именно:

1) специализацию и кооперирование производства;

2) совместные проектно-конструкторские разработки;

3) стандартизацию в рамках СЭВ отдельных видов продукции;

4) сотрудничество в области технической оснастки.

ЕСДП СЭВ разработана на основе международной системы допусков и посадок ИСО, которой соответствуют основные закономерности построения системы, числовые значения допусков и предельных отклонений, условные обозначения.

Благодаря этому ЕСДП СЭВ служит:

1) повышению эффективности экономического и научно-технического сотрудничества стран—членов СЭВ с другими странами мира;

2) повышению конкурентоспособности продукции стран—членов СЭВ на мировом рынке;

3) сокращению сроков подготовки, удешевлению производства и эксплуатации изделий по технической документации, полученной из других стран.

Объектами стандартизации ЕСДП СЭВ являются:

1) поля допусков и рекомендуемые посадки — СТ СЭВ 144—75 (соответственно стандарт международной системы допусков и посадок ИСО/Р 1829—1970);

2) общие положения, ряды допусков и основных отклонений — СТ СЭВ 145—75 (соответственно ИСО/Р 286—1962);

3) предельные отклонения размеров с неуказанными допусками — СТ СЭВ 302—76 (соответственно МС ИСО 2768—1973);

4) поля допусков деталей из пластмасс — СТ СЭВ 179—75 и др.

ЕСДП СЭВ распространяются на сопрягаемые и несопрягаемые гладкие цилиндрические элементы и элементы, ограниченные параллельными плоскостями.

ЕСДП СЭВ введена взамен применявшейся ранее системы допусков и посадок ОСТ, поэтому имеется специальная таблица перехода обозначений посадок, применяемых на чертежах до 1980 г., в обозначения СТ СЭВ.

Разработаны также «Основные нормы взаимозаменяемости «типовых соединений» (резьбы, зубчатых передач, шпоночных соединений и т. д.).

Посадки бывают в системе отверстий и в системе вала.

Посадки в системе отверстий — посадки, в которых различные зазоры и натяги получают соединением различных валов с основным отверстием.

Установленные системой допуски и отклонения относятся к деталям, размеры которых определены при температуре 20°. Каждое поле допуска определено относительно нулевой линии величиной допуска. По наборам полей допусков и посадок система разделена на четыре диапазона номинальных размеров: до 1 мм, от 1 до 500 мм, от 500 до 3150 мм, от 3150 до 10 000 мм.

Для каждого диапазона стандартизированы ряды основных отклонений и допусков и даны рекомендации по образованию посадок.

Стандарт СТ СЭВ 145—75 содержит таблицы (для отверстий и валов), в которых указано по 28 рядов (по числу посадок) значений основных отклонений.

Каждый размер на чертеже включает в себя числовое значение (например 40), допуск, величина которого зависит от номинального размера и обозначается цифрами (например 6) или так называемыми квалитетами (квалитетов существует 19—01, 0, 1, 2... , 17); и положение поля допуска относительно нулевой линии (например *g*), которое обозначается буквами латинского алфавита (прописными для отверстия и строчными для валов).

Квалитет (степень точности) — ступень градации значений допусков системы. Каждый квалитет содержит ряд допусков, которые в системе допусков и посадок рассматривают как соответствующие приблизительно одинаковой точности для всех номинальных размеров.

Обозначение посадки $40 \frac{H7}{g6}$, где 40 — номинальный размер; *H* — обозначение положения поля допуска отверстия; *g* — обозначение положения поля допуска вала; 6 и 7 — квалитеты.

При изготовлении детали необходимо получить не только заданную точность размеров, но и обработать поверхности с указанной на чертеже шероховатостью (в верхнем правом углу, см. рис. 115 или на линиях контура).

Стандарт устанавливает следующие параметры шероховатости:

R_a — среднее арифметическое отклонение профиля,

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где y_i — расстояние между любой точкой профиля и средней линией, измеренное по нормали.

R_z — высота неровностей профиля по 10 точкам,

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| \right),$$

где H_{\min} — отклонение пяти наибольших минимумов профиля; H_{\max} — отклонение пяти наибольших максимумов профиля.

Шероховатость поверхностей обозначают на чертеже для всех выполняемых по данному чертежу поверхностей, независимо от методов их обработки. Исключение составляют поверхности, шероховатость которых не обусловлена требованиями конструкции и не подлежит дальнейшему контролю.

В обозначении шероховатости поверхности, вид которой не устанавливается, применяют знак $\sqrt{\quad}$. Для поверхности, которая должна быть образована удалением слоя материала путем точения, фрезерования, сверления, шлифования, полирования и т. д., применяют знак $\sqrt{\quad}$. Для поверхности, которая должна быть образована без удаления материала путем штамповки, проката, литья и т. д., применяют знак $\sqrt{\quad}$.

Дополнительно можно установить требование к направлению неровностей поверхности.

Типы направлений неровностей выбирают из табл. 8.

Таблица 8

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение	Обозначение
Параллельное		$\sqrt{=}$, $\sqrt{=}$, $\sqrt{=}$
Перпендикулярное		$\sqrt{\perp}$, $\sqrt{\perp}$, $\sqrt{\perp}$
Перекрещивающееся		\sqrt{x} , \sqrt{x} , \sqrt{x}
Произвольное		\sqrt{M} , \sqrt{M} , \sqrt{M}
Кругообразное		\sqrt{C} , \sqrt{C} , \sqrt{C}
Радиальное		\sqrt{R} , \sqrt{R} , \sqrt{R}

Согласно различным ГОСТ обозначение шероховатостей поверхности имеет разный вид, например $\nabla 5$ (до 1975 г.), $\sqrt{\overset{Rz\ 20}{\quad}}$ (с 1975 г.), $\overset{20 \text{ шлифовать}}{\sqrt{2,5}}$ (с 1980 г.).

В верхней строке указывают самый грубый параметр. Базовая длина дана в мм. Если параметры нужно соблюсти везде, базовую длину не указывают. Имеются специальные таблицы перевода для различных обозначений (разных годов) параметров шероховатости, которыми следует пользоваться в случае работы с чертежами разных лет.

§ 45. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ИХ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

Изготовление геодезических приборов осуществляют на специальных оптико-механических заводах. Опытные партии приборов могут выпускать опытно-экспериментальные заводы при научно-исследовательских институтах или опытно-механические мастерские при геодезических и других предприятиях.

Приборы собирают в сборочных цехах из различных деталей, изготовленных по рабочим детализовочным чертежам. После сборки приборы юстируют и подвергают испытаниям. Любой геодезический прибор состоит из большого количества оптических и механических деталей. Современные оптико-электронные геодезические приборы содержат также электронные узлы.

Технология изготовления оптических деталей отличается от технологии изготовления механических деталей. Детали этих двух типов изготавливают в различных цехах, а иногда и на разных производствах.

Изготовление оптических деталей геодезических приборов

В настоящее время для изготовления оптических деталей наиболее подходящим материалом являются различные виды стекол. Стекла являются типичными представителями аморфных твердых тел. На твердые кристаллические тела стекла похожи рядом внешних свойств (твердость, прочность, постоянство объема и формы, малый коэффициент температурного расширения), на жидкость — внутренним строением.

Для изготовления оптических деталей второстепенного значения применяют техническое силикатное стекло. Техническое стекло выпускается нескольких видов:

1. Зеркальное стекло. Оно весьма просто по химическому составу и обычно содержит окислы SiO_2 , Na_2O , CaO или SiO_2 , K_2O . Его применяют для изготовления луп, конденсоров, очков, отражателей и т. д.

2. Термическое стекло. Оно обладает высокой механической прочностью, химической устойчивостью, прозрачностью и не кристаллизуется при обработке на воздуходувной горелке. В его состав входят SiO_2 — 67,3 %, Al_2O_3 — 2,5 %, B_2O_3 — 2,0 %, CaO — 7,0 %, ZnO — 7,0 %, Na_2O — 1,4 %. Термическое стекло применяют для изготовления ампул уровней.

В некоторых случаях применяют органическое стекло и особенно плексиглас, представляющий собой прозрачный термо-

пластик, изготавливаемый из акриловой смолы (масса К—4). Плексиглас имеет невысокую стоимость, пластичен, хорошо гнется, прессуется и поддается всем видам механической обработки, имеет меньшую массу, чем силикатное стекло. Он устойчив к ряду физико-химических реагентов (вода, воздух, солнце). По показателям преломления приближается к оптическому стеклу типа крон. Реже применяют полистирол и полидихлорстирол, которые по оптическим характеристикам соответствуют стеклу флинт. Недостатки органического стекла: невысокая твердость поверхности, которая легко царапается, высокий коэффициент температурного расширения, недостаточная оптическая однородность и твердость и способность накапливать статическое электричество.

Ответственные оптические детали высокоточных приборов изготавливают из оптического силикатного стекла (ГОСТ 13659—78, ГОСТ 3514—76), которое отличается от технического более высокими параметрами однородности, прозрачности, постоянством оптических констант во всей массе стекла и повторяемостью от плавки к плавке.

Оптическое стекло изотропно, т. е. обладает одинаковыми свойствами во всех направлениях, и не имеет определенной точки плавления.

Оптическое стекло бывает двух основных видов: крон и флинт. Они, в свою очередь, делятся на типы, а типы — на марки, которые отличаются между собой химическим составом, величиной показателя преломления и средней дисперсией.

Отечественная промышленность выпускает около 200 марок оптического бесцветного стекла. В это число входят стекла серии «0» обычного применения и серии «100», устойчивые к ионизирующим излучениям. Согласно ГОСТ 3514—76, 13659—78 наиболее предпочтительны следующие марки стекла — легкие кроны: ЛК5, ЛК105, ЛК6, ЛК7; кроны: К2, К8, К108, К19, К119; баритовые кроны: БК6, БК8, БК10; фосфатные кроны: ФК, ТФК; тяжелые кроны: ТК2, ТК14, ТК16, ТК20, ТК21, ТК23; сверхтяжелые кроны: СТК; особый крон: ОК; кронфлинты: КФ4, КФ104; легкие флинты: ЛФ5, ЛФ105; флинты: Ф1, Ф4, Ф6; тяжелые флинты: ТФ1, ТФ3, ТФ5, ТФ7; сверхтяжелые флинты: СТФ; особые флинты: ОФ; тяжелые баритовые флинты: ТБФ. Все они отличаются показателем преломления и средней дисперсией. Основным показателем преломления для видимой части спектра принимается показатель преломления света с длиной волны 546,07 нм (Na), который обозначается через n_D — желтый луч. Разность показателей преломления для крайних линий спектра A' называется полной дисперсией $n_{A'} - n_h$. Разность показателей преломления для линий F' и C' называется средней дисперсией $n_{F'} - n_{C'}$. Разности показателей преломления для любых других пар линий спектра называются частными дисперсиями. Отношение любой частной

дисперсии к средней называется относительной частной дисперсией для данного участка спектра. Коэффициент средней дисперсии обозначается через ν , характеризует способность стекла разлагать свет на составные части и выражается формулой

$$\nu_C = \frac{n_C - 1}{n_{F'} - n_{C'}}.$$

Коэффициент ν введен Аббе, поэтому его называют числом Аббе.

Постоянной величиной оптического стекла также является термостатическая постоянная

$$\nu_C = \frac{\beta_C}{n_C - 1} - \alpha,$$

где β_C — приращение показателя преломления при повышении температуры на 1 °С (среднее в диапазоне от —60 до +20 °С); α — коэффициент линейного расширения.

Кроны — твердые стекла, содержащие до 60 % SiO_2 (кварцевый песок) и имеющие спектр яркого цвета. Флинты — мягкие и тяжелые стекла (до 44 % SiO_2). Цвет спектра — темный.

Кроны отличаются друг от друга, в основном, содержанием окиси бария: в кроне до 3 %, в тяжелом кроне более 30 %. Флинты отличаются друг от друга содержанием окиси свинца: в кронфлинте до 15 %, в тяжелом флинте более 50 %.

Изготовление оптического стекла

В состав оптических стекол входит большое число компонентов, в том числе соединения редких и рассеянных элементов. Смесь сырьевых материалов и сортированного стекольного боя, предназначенная для производства стекла, называется шихтой. Составные материалы шихты делят на главные и вспомогательные, причем последние служат для ускорения процесса варки стекла, улучшения качества стекломассы. Основными составляющими шихты оптического стекла являются кварцевый песок, а для высококачественного стекла молотый кварц, сода, поташ, мел, борная кислота, бура и др.

Для составления шихты используют лучшие, а в отдельных случаях и химически чистые компоненты. Применяют мелкодисперсные материалы с развитой поверхностью, но не пылеватые.

Шихта должна быть хорошо перемешана. Неоднородность шихты, вызванная плохим перемешиванием, является причиной образования камней, пузырей и т. д.

Оптическое стекло варят в горшковых и ваннных печах.

Варку стекла (шихты) производят при температуре 1400—1500°. Быстрее всего варят флинты и тяжелые флинты — 25—30 ч. Наиболее долго варят тяжелые баритовые кроны — 40—50 ч.

Все годные заготовки, полученные любым методом, подвергают отжигу (нагреву до вязкости) для снятия внутренних напряжений.

Основные размеры заготовок оптического бесцветного и цветного стекла в зависимости от их массы, формы, вида, типа стекла и области применения должны соответствовать техническим условиям (ГОСТ 13240—78).

В оптических мастерских заготовки подвергают резанию и сверлению алмазными фрезами и сверлами, шлифованию и полированию. Чаще всего заготовки подвергают обработке абразивными и полировальными материалами на специальных вращающихся и возвратно-поступательных станках. Из порошков-абразивов наиболее употребительны алмазы, корунд, наждак, кварцевый песок, синтетический алмаз, карборунд, электрокорунд, карбид бора, боразон.

После обработки детали абразивами и придания ей искомой формы приступают к полированию. Наиболее часто применяют полировальные порошки «крокус» и «полирит», окись хрома, окись тория, окись церия. В качестве подложек при полировании применяют сукно, войлок, фетр. Суспензию порошка в воде наносят на подложку, на которой полируют деталь.

После полирования деталь тщательно промывают водой или органическими растворами. Классы чистоты и методы контроля после окончательной обработки оптических деталей, включая операцию нанесения покрытий, устанавливаются ГОСТ.

Основные показатели качества оптического стекла

1. Светопоглощение. Проходя через стекло, свет частично поглощается, превращаясь в другие виды энергии. В лучших стеклах, сваренных в производственных условиях из наиболее чистых сырьевых материалов, потери света составляют до $0,1 \div 0,2$ %, а в среднем — $0,5 \div 0,6$ %. Основной вклад в потери света вносят примеси красящих элементов — железа, марганца, меди, хрома, никеля и кобальта, которые попадают в стекло вместе с сырьевыми материалами из атмосферы или производственных помещений. Наиболее прозрачны баросиликатные кроны. Баритовые кроны и легкие флинты имеют обычно несколько большее светопоглощение. Наименее прозрачны тяжелые флинты.

По коэффициенту светопоглощения в соответствии с ГОСТ 3514—76 установлено 7 категорий стекла (000, 00, 0, 1, 2, 3, 4). ГОСТ 3520—74 устанавливает порядок определения коэффициента светопоглощения.

2. Оптическая однородность. Она определяется изменением показателя преломления в различных участках блока стекла. Оптическая неоднородность появляется вследствие нарушения режима отжига стекла и приводит к уменьшению разрешающей силы оптической системы.

По оптической однородности стекло делят на 3 категории

(1, 2, 3). Допустимые отклонения показателя преломления n_D распределены в соответствии с ГОСТ 3514—76 по 5 категориям (0, 1, 2, 3, 4).

Методы определения оптической однородности, измерения показателя преломления сформулированы в ГОСТ 3518—80, 3516—74 и др.

3. Пузырность. Пузырьки представляют собой газовые включения в стекле различной формы и размеров. Скопление мельчайших пузырей диаметром до 2 мм называют мошкой. Пузыри играют роль дополнительных линз, частично преломляющих и рассеивающих свет, что приводит к ослаблению света, проходящего через оптическую систему прибора. Наибольшей пузырьностью отличаются тяжелые кроны, баритовые и тяжелые флинты. Детали оптической системы, расположенные в плоскостях изображения, например, сетки и шкалы, нужно изготавливать из стекла без пузырей.

По пузырьности регламентировано 11 категорий (1, 1а, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) по диаметру наибольшего пузырька и шесть классов (А, Б, В, Г, Д, Е) по количеству пузырей на массу стекла в 1 кг.

Кроме пузырей в массе стекла могут встречаться камни — любые непрозрачные включения в стекле. Камни часто создают в стекле местные напряжения, которые могут являться причиной нарушения механической прочности деталей.

4. Бессвильность. Свилы — это участки, показатель преломления которых резко отличен от показателя преломления основной массы стекла. Свилы в большинстве случаев заметны на глаз. Они играют роль дополнительных цилиндрических линз, отклоняющих лучи от заданного направления. Свилы в стекле портят качество изображения и чистоту поля зрения, рассеивают свет, создавая «хвосты» при наблюдении ярких объектов на темном фоне и полутени при наблюдении темных объектов на светлом фоне. Пересекающиеся нитевидные свилы могут привести к образованию вторичного изображения, смещенного относительно основного. Потоки тонких свилей гораздо опаснее одиночных свилей, если они занимают значительную площадь светового отверстия. Стекло, бессвильное в двух взаимно перпендикулярных направлениях, бессвильно в любом другом направлении. Свилы опасны также тем, что могут создавать местные напряжения, которые снижают механическую прочность изделий и вызывают двойное лучепреломление.

Категории бессвильности предусматривают две оценки заготовок стекла в зависимости от их размеров (1 и 2). В зависимости от числа направлений, по которым должен осуществляться контроль бессвильности, установлено 2 класса (ГОСТ 3514—76): класс Б — контроль в двух взаимно перпендикулярных направлениях; класс В — контроль в одном направлении.

5. Двойное лучепреломление. В результате механических воздействий (сжатие в оправе), при неравномерном нагревании или охлаждении в стекле могут быть вызваны внутренние напряжения, которые вызывают двойное преломление, когда луч света, входящий в образец стекла, делится на два — обыкновенный и необыкновенный с плоскостями поляризации, расположенными в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и различной скоростью распространения.

Двойное лучепреломление, обусловленное сжатием, исчезает вместе с устранением действующих сил. Двойное лучепреломление, обусловленное термообработкой, уменьшается путем отжига стекла. ГОСТ 3519—80 устанавливает метод измерения двойного лучепреломления в видимой области спектра.

6. Химическая устойчивость. Стекло должно противостоять разрушению водой, растворами кислот и щелочей. Химическая устойчивость стекол определяется их химическим составом. Метод определения химической устойчивости оптического стекла предусмотрен в ГОСТ 13917—68.

7. Налетоопасность. Со временем на стекле может образоваться капельно-нежировой налет щелочей, который гигроскопичен, т. е. реагирует на атмосферную влагу. Налет то высыхает, то вновь образуется. Капельный налет является основным видом брака оптических деталей, возникающего во время их хранения. В жарком климате он иногда полностью выводит приборы из строя. Стойкость стекла повышает окись алюминия.

Особым видом налетов на оптических деталях являются капельные жировые и биологические налеты. Последние представляют собой плесень и водоросли на поверхности стекла, споры которых всегда присутствуют в воздухе. Основной причиной образования биологического налета является высокая влажность воздуха. Применяя дезинфицирующие вещества и рациональные способы чистки оптических деталей при сборке приборов, можно предотвратить появление биологических налетов на деталях.

8. Пятнаемость. Под действием воды или кислот на стекле могут образовываться пятна, являющиеся результатом местных изменений состава стекла и образования участков, покрытых слоем вещества с иным показателем преломления. Пятна могут образовываться во время обработки стекла, например при полировании, в процессе сборки приборов. Для уменьшения пятнаемости варьируют химическим составом стекла.

9. Прочность. Имеет значение при расчете конструкций оправ, держателей, так как деформации могут привести к ухудшению оптических качеств.

10. Твердость. Имеет значение при обработке. Чем тверже стекло, тем труднее его обрабатывать, но тем меньше

оно поддается механическим воздействиям при эксплуатации.

11. Хрупкость. Хрупкость является большим недостатком стекол.

Покрyтия оптических деталей пленками

На готовую деталь могут наноситься следующие виды покрытий:

1. Зеркальные покрытия. Они осуществляются нанесением на поверхность детали непрозрачной пленки металла, обладающего высоким коэффициентом отражения (до 98 % для серебра и до 90 % для алюминия). Металлическую пленку затем покрывают тонким защитным слоем лака. Бывают зеркала с передним и задним покрытием. Последние дают два отражения: от зеркального слоя — яркое и от передней поверхности стеклянной подложки — слабое. Два изображения объекта мешают наблюдению, поэтому в оптическом приборостроении наибольшее распространение получили зеркала с передним покрытием.

2. Светоделительные покрытия. Их применяют в светоделительных кубиках и других деталях. Такие покрытия получают нанесением на поверхность детали прозрачных металлических пленок (серебро, алюминий, хром, никель) и неметаллических пленок (трехсернистая сурьма и др.).

3. Фильтровые покрытия. Их в виде пленок применяют для задержки определенных лучей спектра.

Особую группу прозрачных покрытий составляют нейтральные фильтры, служащие для ослабления светового потока в требуемое число раз без изменения спектрального состава света. Для нейтральных пленок наиболее пригодна платина.

4. Просветляющие покрытия. Применяются для уменьшения коэффициента отражения света при преломлении его через поверхности оптических деталей. При прохождении света через одну поверхность стекла на отражение теряется от 4,5 до 9 % света. Обычно оптические системы приборов имеют довольно большое число преломляющих поверхностей и потери света на отражение могут достигать 70 %. Снижение отражения или просветление стекол является важнейшей задачей технологии приготовления оптических деталей. При просветлении стекла используют интерференцию лучей, отраженных от передней и задней границ (т. е. интерференцию в тонких пленках). Пусть I — стекло, II — пленка (рис. 117). На пленку падает луч 1 , пройдя в ней, он частично отразится от поверхности AB и далее пройдет в воздух в виде луча $1'$, частично отразившись от поверхности CD . Всегда найдется луч 2 в падающем световом потоке, который на границе воздух — пленка (CD) дает луч $2'$. Луч $2'$ интерферирует с лучом $1'$. Толщину пленки и ее показатель преломления рассчитывают так, чтобы разность хода лучей $1'$ и $2'$ была равна и они гасили в значительной степени друг друга. Суммарная интенсивность отраженного света при

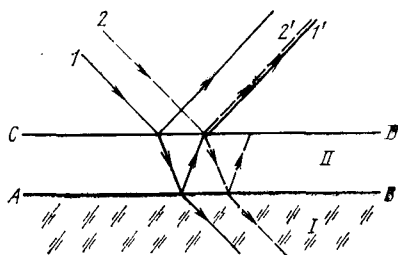


Рис. 117. Интерференция в тонких просветляющих пленках

относят: 1) нанесение металлических зеркальных и светоделительных покрытий из растворов солей металлов (главным образом серебра); 2) получение просветляющих пленок из кремнезема и двуокиси титана, а также образование защитных пленок, например из меди.

Физическими методами являются: 1) нанесение пленок из металлических и неметаллических веществ путем их испарения и конденсации в вакууме; 2) нанесение металлических пленок катодным распылением.

Процесс нанесения пленок обычно разбивается на 4 этапа: 1) подготовка поверхности детали; 2) нанесение пленки; 3) упрочнение или защита пленки; 4) контроль качества пленки (проверка на прочность, чистоту, определение коэффициента отражения).

Изготовление механических деталей

При изготовлении геодезических приборов применяют самые разнообразные материалы: металлы, пластмассы, дерево и др. Важнейшим промышленным металлом является железо, которое в сплавах с углеродом и другими элементами относят к группе черных металлов: сталь, чугун и ферросплавы. Все другие металлы и их сплавы относят к группе цветных металлов, которые подразделяют на легкие и тяжелые. Отличают также благородные и редкие металлы. Из цветных металлов в приборостроении применяют медь, алюминий, магний, свинец, цинк, олово, титан, хром, никель и др.

Большое место в приборостроении начинают занимать пластмассы, характеризующиеся малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью, широким диапазоном коэффициента трения, высоким сопротивлением истиранию, часто хорошими оптическими свойствами и прозрачностью, прочностью. Детали из пластмасс в пределах допустимых температур и давлений представляют собой упругие и твердые тела.

Простые пластмассы состоят из одного полимера, сложные — из полимера, пластификатора, наполнителя и красителя. В некоторых случаях добавляют катализаторы и стабилизиру-

этом близка к нулю. В соответствии с законом сохранения энергии уменьшение количества отраженного света приводит к увеличению количества света, проходящего в стекло.

Методы нанесения пленок

Эти методы можно разделить на химические и физические. К химическим методам

ющие компоненты. В качестве наполнителей используют древесную муку, тальк, каолин, асбест, стекловолокно, хлопчатобумажные, синтетические, стеклянные ткани, древесный шпон, металлический порошок, придающие изделиям необходимую прочность, жесткость, теплостойкость и электроизоляционные свойства.

Дерево применяют при изготовлении реек, штативов, ящиков и др.

Для получения заготовок из металла и последующего изготовления деталей применяют: литье, обработку давлением, металлокерамику (порошковую металлургию), физическую обработку (термическую, химическую, резанием), сварку (пайку).

При проектировании различных изделий следует избегать получения отбросов и стружки, а не ориентироваться на их переплавку. Следует помнить, что долг каждого специалиста — всячески сберечь материал, поэтому в настоящее время имеется тенденция увеличения удельного веса обработки металлов без снятия стружки (при резании), т. е. методами литья, пластической деформации и т. д.

Литье. Литье является наиболее простым и дешевым способом изготовления готовых деталей и заготовок, подлежащих окончательной обработке в механических цехах. В последнем случае на отливках, помимо припуска на усадку, предусматривают также припуск на обработку.

Основные этапы литья: изготовление формы, плавка металла, заливка формы, охлаждение отливки, удаление отливки из формы, зачистка отливки.

Обработка давлением. К этому виду обработки металла относят прокатку, прессование, волочение, ковку, штамповку. Сущность обработки давлением заключается в том, что металл в горячем и холодном состоянии деформируется под действием давления. Обработка давлением металла в холодном состоянии выполняется труднее, поэтому чаще ее ведут при температурах, при которых металл становится пластичным.

Прокатка. В прокат перерабатывают около 80 % всей выплаваемой стали и большую часть цветных металлов и сплавов. Прокат делят на сортовой, листовой и трубный. Из сортового проката наиболее распространены брусы, прутки, полосы, уголки, двутавры, швеллеры, тавры, рельсы и др.

Прессование. Прессование — способ обработки давлением, при котором металл выдавливают из замкнутой полости через отверстие, в результате чего получают изделие с сечением по форме отверстия. Прессуют цветные металлы и их сплавы, а также сталь из заготовок, полученных из сортового проката.

Волочение. На приборостроительных заводах заготовки, полученные на металлургических заводах, подвергают волочению в целях приближения сечения заготовки к сечению готовой детали, что позволяет свести к минимуму или вообще

исключить механическую обработку резанием. Волочение заключается в протягивании заготовки в холодном состоянии под действием внешней силы через отверстие, сечение которого меньше исходного сечения заготовки. В результате изделия получают гладкую поверхность и точные размеры.

Ковка. Ковка — способ обработки металла, находящегося в пластическом состоянии, под статическим и динамическим давлением. Ковка производится либо ударным воздействием на металл, либо медленным давлением прессом.

Штамповка. Штамповкой называют ковку в формах-штампах. Штамповкой достигается большая точность размеров, чистота поверхности и производительность, чем при свободной ковке.

Металлокерамика. Методы порошковой металлургии позволяют получать материалы и детали, обладающие высокой жаропрочностью, стабильными магнитными свойствами, а также полупроводниковые изделия. Механические характеристики металлокерамических изделий достаточно хорошие. При изготовлении деталей методами порошковой металлургии потери составляют 3—7 %, тогда как, например, при литье отходы материала иногда достигают 80 %. Процессы порошковой металлургии наиболее эффективны при серийном и массовом производстве. Процесс изготовления деталей состоит из следующих операций: приготовление шихты требуемого состава, дозирование, формирование в детали, спекание, термообработка, калибрование, механическая обработка и гальванопокрытие.

Физическая обработка. Из физической обработки наибольшее распространение получила обработка резанием, которая разделяется на следующие виды: точение, фрезерование, строгание, шлифование, сверление.

Сварка (пайка). Сваркой называют технологический процесс получения неразъемных соединений деталей. Сварку применяют для изготовления сложных конструкций приборов при их окончательной сборке.

В приборостроении наиболее часто применяют дуговую, плазменную, лазерную, холодную (давлением) сварку и пайку.

Пластмассы обрабатывают такими же способами, как и металлы.

Защитные покрытия материалов. К наиболее распространенным видам защитных от коррозии и декоративных покрытий относят следующие: металлические, химические, лакокрасочные и эмалевые.

Металлические покрытия различают по способу их нанесения на электролитические (гальванические), горячие, диффузионные и т. д.

Химические покрытия представляют собой пленки определенного химического состава, которые образуются на металле под действием химических реагентов.

Лакокрасочные покрытия основаны на образовании пленки

из органического вещества и пигмента. Такие покрытия, нанесенные на поверхность металла или пластмассы в виде одного или нескольких слоев лака или краски, после высыхания образуют непрерывные защитные и декоративные пленки.

Эмалевые покрытия представляют собой стекловидные пленки, образующиеся в результате сплавления при высоких температурах неметаллических порошков на основе двуокиси кремния.

§ 46. ИСПЫТАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

На работоспособность геодезических приборов и их узлов влияют различные внешние факторы: температура и влажность воздуха, солнечные лучи, атмосферные осадки, пыль и песок, радиация, микроорганизмы, пары солей и кислот, вибрации и удары, нестабильность напряжения и частоты питающей сети и т. д. Совокупность указанных внешних факторов называют условиями эксплуатации приборов. Учет условий эксплуатации оказывает большое влияние на конструкцию и стоимость прибора.

Геодезические приборы подвергают контролю и испытаниям. Контроль — процесс получения и обработки информации, оценивающей соответствие прибора техническим условиям (ТУ) и государственным стандартам. Такой контроль выполняется обычно в тех же условиях, в которых прибору надлежит работать.

Под испытанием понимают проверку устойчивости работы прибора под действием различных внешних факторов.

Контролю и испытаниям подвергают макеты в процессе разработки геодезических приборов, с целью учета результатов на последующих этапах конструирования, собранные и отрегулированные опытные образцы в процессе предварительной и государственной приемки (ГОСТ 8.001—80), на основании которой принимают решение о целесообразности серийного выпуска.

При серийном производстве выполняют приемо-сдаточный контроль и периодические (типовые) испытания. Приемо-сдаточному контролю, являющемуся составной частью производственного процесса, подвергают все собранные приборы. Сведения о результатах этого контроля должны содержаться в заключении отдела технического контроля (ОТК). На первом этапе приемо-сдаточного контроля проверяют сопроводительную документацию и производят внешний осмотр прибора. Далее выполняют исследования, в процессе которых проверяют характеристики прибора, установленные ТУ. Если прибор не проходит приемо-сдаточного контроля, то его возвращают в цех для выявления брака и его устранения.

Приборы, соответствующие ТУ, пломбируют и отправляют на упаковку. В сопроводительные документы (паспорт и фор-

муляр) вносят следующие данные: заключение о пригодности к эксплуатации, отметки о результатах приемо-сдаточного контроля, гарантийные сроки эксплуатации, гарантируемые характеристики, допустимые условия эксплуатации.

Периодические (типовые) испытания серийно выпускаемых приборов проводят для выборочных партий при модернизации отдельных узлов и конструкций, при изменении технологического и производственного процессов, при передаче производства приборов на другое предприятие и т. д.

Испытания подразделяют на механические, климатические, электрические и специальные.

Для повышения достоверности результатов обычно испытаниям подвергают не один, а партию из нескольких приборов.

Механические испытания. Все приборы в той или иной степени подвергаются механическим воздействиям (при сборке, погрузке, транспортировке, выгрузке, установке, эксплуатации, ремонте и т. д.). Механические воздействия вызывают разрушение креплений, самовывинчивание резьбовых деталей, отслоение и осыпание покрытий, замыкание неизолированных проводов, самопроизвольное замыкание и размыкание электрических контактов, смещение оптических деталей и т. д.

Различают три основных вида механических воздействий: вибрации, линейные перегрузки и удары.

Вибрациями называют механические колебания. Возбудители вибраций вызывают колебания системы с частотой, равной частоте следования возбуждающих импульсов (вынужденные колебания). При совпадении частот собственных колебаний с частотами возбуждающих наступает явление резонанса, когда сравнительно небольшие возбуждающие силы могут вызвать колебания с большой амплитудой и создать в колеблющейся системе очень большие напряжения.

При эксплуатации частоты и интенсивность вынужденных колебаний геодезических приборов в зависимости от условий площадки, где проводятся измерения, могут изменяться в широких диапазонах. При этом колебания отдельных элементов прибора приводят к искажениям их работы.

Различают вибропрочность и виброустойчивость приборов. Под вибропрочностью понимают способность прибора сохранять свою работоспособность после воздействия вибраций в заданных параметрах частот и коэффициентов перегрузки. Проверка на вибропрочность проводится в нерабочем (выключенном) состоянии приборов.

Во время испытаний на вибропрочность выявляют прочность конструкции, дефекты сборки и юстировки, прочность соединений, склеек, паяк, надежность контактов и т. д.

Под виброустойчивостью понимают способность приборов нормально функционировать во время воздействия вибраций в заданных параметрах частот и коэффициентов перегрузки.

Теоретически рассчитать, как будет вести себя прибор в целом и его отдельные детали и узлы при воздействии вибраций, очень сложно, поэтому поведение приборов при вибрациях оценивают по результатам виброиспытаний на вибростендах. При испытаниях чаще применяют механические и электродинамические вибростенды. Механические вибростенды создают вибрации с частотой до 300 Гц. Они содержат эксцентриковый или центробежный механизм, заставляющий колебаться платформу с закрепленным на ней испытуемым прибором.

Электродинамические стенды создают колебания в широком диапазоне частот от десятков до несколько тысяч Гц. Принцип работы электродинамических стендов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и переменного магнитного поля катушки, вследствие чего установленная на пружинах платформа с прибором совершает возвратно-поступательные колебания.

Параметры вибрационных испытаний прибора определяют согласно соответствующим техническим условиям, в которых указывают диапазон частот, коэффициент перегрузки и продолжительность вибрационного воздействия. Связь между отдельными параметрами вибраций выражается формулой

$$j = \frac{4\pi^2 f^2 s}{9810},$$

где j — коэффициент перегрузки; f — частота колебаний стенда в Гц; s — амплитуда колебаний стола стенда в мм.

Линейные перегрузки геодезических приборов возникают при их транспортировке во время взлета, посадки и виража самолета, разгоне и торможении автомобилей и т. д. Сила, возникающая при линейных перегрузках, в отличие от вибраций сохраняет свое направление относительно корпуса прибора. Влияние линейных перегрузок определяют на специальных центрифугах согласно техническим условиям.

Ударные нагрузки на геодезические приборы могут возникнуть при погрузке и разгрузке, при транспортировке по плохим дорогам, при столкновениях транспорта и т. д. Различают ударную прочность и ударную стойкость прибора. Ударная прочность — способность прибора сохранять работоспособность после воздействия удара. Ударная стойкость — способность прибора сохранять работоспособность во время действия ударов.

Испытания приборов на воздействие ударов проводят на ударных стендах согласно техническим условиям, в которых должны быть указаны количество ударов, коэффициент перегрузки, длительность ударного импульса.

Ударные стенды бывают эксцентрикового и копрового типа. В первых стол с испытываемым прибором при помощи эксцентрика поднимается на некоторую высоту, а затем совершает свободное падение. В копровых стендах ударное ускорение

создается за счет удара маятника. Существуют также стенды, в которых ударное воздействие создается за счет спуска предварительно сжатой пружины.

Переносные приборы некоторых типов подвергают ударным испытаниям при падении. При этом оговаривается высота свободного падения и другие параметры.

Испытания приборов на транспортные перегрузки можно проводить в лабораториях, на стендах транспортной тряски по ГОСТ 13007—67 и в натуральных условиях при транспортировке грузовым автомобилем по грунтовым и булыжным дорогам со скоростью 20—40 км/ч на расстояние до 1000 км. Первый способ наиболее простой и дешевый.

Климатические испытания. Под влиянием различных климатических факторов (температуры, влажности, давления и т. д.) в геодезических приборах может произойти расфокусировка, расклейка оптических деталей, коррозия, может измениться вязкость масел и смазок, параметры электронных схем и др.

Климатические испытания проводят, как правило, после механических, так как появление под действием механических перегрузок трещин, зазоров, отслоений покрытий способствует разрушающему воздействию климатических факторов. Так как создать совокупность воздействия всех климатических факторов в лабораторных условиях трудно и долго, проводят испытания приборов на раздельное воздействие одного или нескольких факторов.

Стендовые климатические испытания приборов проводят в специальных камерах.

Термокамеры и термовлагокамеры предназначены для испытания приборов на воздействие повышенных или пониженных температур и влажности. После выдержки прибора в камере проверяют исправность работы механизмов, нарушение клеевых соединений оптических деталей, вытекание смазки и уплотняющей замазки, отпотевание внутренних деталей или образование инея (в зависимости от температуры), нарушение юстировки оптической системы, осыпку лака и др.

Камеры тепла, влаги и грибообразования имитируют воздействие на прибор тепла, повышенной влажности и разрушающего действия плесневых грибков. Работа их сходна с работой термовлагокамеры, но для создания благоприятных условий размножения грибков из вводимых в камеру спор обеспечивается малая подвижность воздуха.

Термобарокамеры предназначены для испытаний приборов на воздействие пониженного атмосферного давления при пониженных температурах и повышенной влажности.

Камеры солнечной радиации предназначены для испытаний приборов под действием солнечной радиации. Создаваемое в камерах излучение ксеноновыми газоразрядными лампами по своему спектральному составу близко к солнечному свету.

Некоторые геодезические приборы испытывают на водонепроницаемость в дождевальных камерах.

Камера морского тумана предназначена для испытаний приборов на воздействие соляного тумана, создаваемого распылением форсунками морской воды. Через несколько суток проверяют отсутствие коррозии и повреждения покрытий.

Камеры песка и пыли предназначены для испытаний приборов на пылеустойчивость. В них со скоростью до 15 м/с в течение 1—2 ч продувают смесь частиц песка, мела и глины размером до 50 мкм. После испытаний проверяют сохранность наружных покрытий и отсутствие пыли внутри прибора.

Последовательность и параметры испытаний в указанных камерах определены в технических условиях.

Приборы считаются выдержавшими климатические испытания, если во время или после испытаний их параметры соответствуют техническим условиям и требованиям ГОСТ, а механические повреждения, окисление металлических поверхностей, грибковые образования и т. д. не превышают допустимых значений.

Электрические испытания. Электрическим испытаниям подвергаются электронно-оптические приборы: светодальномеры, радиодальномеры, электронные тахеометры, различные геодезические датчики и т. д. В результате испытаний определяют влияние на работоспособность прибора колебаний частоты, напряжения питания, электрических приборов и др.

Специальные испытания. Специальные испытания геодезических приборов и оборудования проводят с учетом специфических особенностей их эксплуатации. К числу таких испытаний относят проверку радиационной стойкости, воздействия сильных магнитных, электрических и СВЧ полей, агрессивных газов и др. Проведение этих испытаний требует применения специального оборудования.

§ 47. ОБРАЩЕНИЕ С ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ. ХРАНЕНИЕ ПРИБОРОВ И УХОД ЗА НИМИ

Качество и успех производства топографо-геодезических работ зависят не только от знаний и навыков исполнителя, наличия и технического уровня приборов, но и от состояния приборов, предназначенных для точных измерений. Геодезические приборы являются сложными и чувствительными оптико-механическими и оптико-электронными устройствами. Умелое и внимательное обращение с геодезическими приборами в процессе работы, тщательный и своевременный уход за ними обеспечивают получение максимально возможной для них точности за короткое время и вселяют уверенность у исполнителя в полученных результатах.

Полевые работы подчас выполняют в трудных физико-географических условиях, мало благоприятствующих сохранности

приборов. Приборы перевозят автотранспортом, на повозках, вьюках по бездорожью, по болотам, в условиях полупустынь и т. п.

Исполнитель постоянно должен заботиться о своих приборах: принимать меры к уменьшению тряски прибора при перевозке и переноске его, защищать прибор от влаги, пыли, не допускать быстрой смены температурных условий, прямого воздействия на прибор солнечных лучей, дождя и снега.

Необходимо систематически следить за работой прибора и своевременно производить его чистку, смазку, профилактический осмотр и ремонт.

Все данные о работе прибора, результатах его исследований, профилактическом ремонте должны заноситься в паспорт, выданный заводом-изготовителем.

При получении прибора следует произвести его осмотр. Открыть ящик (футляр), внимательно ознакомиться с укладкой прибора так, чтобы уметь правильно уложить его. Прибор из ящика вынимают за подставку, не касаясь руками зрительной трубы и уровня, сразу устанавливают на штатив и прикрепляют к штативу становым винтом. Категорически запрещается оставлять прибор неприкрепленным на штативе. Ножки штатива должны быть надежно вдавлены в грунт. При внешнем осмотре прибора следует убедиться в сохранности его частей и правильности вращения подвижных частей. В процессе поверок и юстировки прибора необходимо проявлять особую аккуратность при затягивании исправительных винтов. Излишние усилия могут привести к поломке винта и в то же время нельзя оставлять незатянутые винты, чтобы не нарушилась юстировка прибора. Прямое попадание на прибор солнечных лучей приводит к неравномерному нагреву его частей и штатива, что вызывает появление не предусмотренных технологией источников ошибок в измерениях. Капли дождя и влаги влекут за собой коррозию металлических частей прибора. Пыль и песок нарушают смазку, вызывают загрязнение и порчу оптических деталей.

В процессе работы прибор устанавливают под зонтом, в перерывах и при переноске — накрывают специальным чехлом. Случайно попавшие капли воды удаляют с прибора сухой мягкой и чистой тряпкой. Нельзя прикасаться к оптическим деталям прибора пальцами руки, чтобы не повредить слой просветленного покрытия и не оставить жирных пятен. Пыль с оптических деталей удаляют мягкой кисточкой или фланелью.

Перед началом угловых измерений следует повернуть на несколько оборотов алидадную часть прибора вокруг вертикальной, а зрительную трубу вокруг горизонтальной оси, чтобы масло равномерно распределилось на трущихся поверхностях.

Необходимо убедиться в устойчивости штатива и подставки прибора, а наводящие и подъемные винты стараться устанавливать в среднее положение. При работе наводящими и мик-

рометрными винтами последнее движение надо выполнять на ввинчивание. Визирование зрительной трубой и отсчетывание по шкалам микроскопов выполнять только после тщательного устранения параллаксов.

После работы на холоде в зимнее время прибор не следует сразу, тем более без укладочного ящика, вносить в отапливаемое помещение, чтобы избежать отпотевания. Внесенный прибор нельзя тотчас открывать и вынимать из ящика.

При укладке прибора в ящик надо отпустить зажимные винты, установить его в ящике, закрепить сначала упаковочные винты ящика и лишь после этого закрепить зажимные винты прибора.

Хранить приборы лучше всего в сухом теплом помещении. При размещении в палатке ящик с прибором следует ставить на доски или жерди.

В полевых условиях с точки на точку прибор чаще всего переносится вместе со штативом. Переносить прибор должен сам наблюдатель так, чтобы основная ось прибора занимала отвесное положение, а становой винт был туго затянут. Особую осторожность следует проявлять при переходе через препятствия. По окончании рабочего дня следует очистить ножки штатива и пятки реек тряпкой, щеткой или пучком травы.

Во время транспортировки надо следить, чтобы ящик с прибором не переворачивался на бок. На грузовой автомашине прибор лучше устанавливать в кабине или в передней части кузова у кабины водителя. Рейки следует перевозить в чехлах или упаковывать так, чтобы не стереть их раскраску.

В багаж геодезические приборы можно сдавать только в специальных упаковочных ящиках с надписью: «Верх», «Осторожно, стекло», «Точный прибор».

При переправах через реки и другие водные препятствия прибор в лодке устанавливается на помост из досок.

Приведенные указания не являются исчерпывающими правилами обращения с геодезическими приборами.

Производитель работ в каждом конкретном случае должен исходить из того, что современные геодезические приборы — сложные, точные и дорогостоящие приборы, требующие умелого и бережного обращения с ними.

Дефекты, обнаруженные в процессе работы с прибором, заносятся в паспорт, который всегда должен быть при приборе.

Желательно, чтобы каждый прибор закреплялся за одним исполнителем на весь период выполнения им работ.

По окончании полевых работ приборы сдают на склад (в геокамеру). Помещение для хранения приборов должно быть сухим, светлым, с центральным отоплением и вентиляцией. Не допускается хранить геодезические приборы в сараях, подвалах и других нежилых помещениях с повышенной влажностью и значительными температурными колебаниями. Помещение

склада должно быть оборудовано стеллажами для хранения приборов в ящиках, пирамидами для хранения штативов и реек, устанавливаемых в вертикальное положение, шкафами и ящиками для хранения мелких инструментов и принадлежностей. Стеллажи, пирамиды и шкафы не следует располагать вдоль наружных стен и вблизи отопительных батарей. В геокамерах необходимо иметь бетонные столбы для поверок, исследований и осмотра приборов, механическую мастерскую и рабочее место для приема и выдачи приборов.

В обязанности работников геокамеры (склада) входит: прием, выдача, учет и хранение приборов, приведение приборов в надлежащий порядок, профилактический осмотр приборов, выполнение мелкого и текущего ремонта, чистка и смазка приборов, производство поверок и юстировка приборов, а также подготовка приборов к передаче в специальные ремонтные мастерские по составленным дефектным ведомостям. Деятельность работников склада должна служить образцом бережного отношения к приборам.

Поступающие на склад приборы должны быть тщательно вычищены и уложены в ящики, металлические наружные части штативов и реек должны быть смазаны.

При приемке приборов на склад из ремонтной мастерской следует проверять устранение неисправностей, указанных в дефектной ведомости. Сведения о ремонте приборов заносятся в их паспорта.

О приеме и выдаче приборов со склада делаются записи в карточке, заведенной на складе на каждый прибор, и в книге учета приборов. На складе также ведутся инвентарная книга и книга материальных ценностей.

Для производства работ со склада выдаются только исправные приборы.

§ 48. ОБЩИЕ ПРАВИЛА РАЗБОРКИ И СБОРКИ, ЧИСТКИ И СМАЗКИ ПРИБОРОВ. УСТРАНЕНИЕ МЕЛКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Хороший уход за геодезическими приборами, своевременная их чистка и смазка сохраняют приборы в исправном состоянии на долгие годы. Исполнитель обязан уметь технически правильно обслуживать приборы, производить их профилактическую разборку и сборку, иметь необходимые навыки для чистки, смазки и устранения несложных неисправностей.

Вместе с тем, всегда следует помнить, что разборка геодезических приборов исполнителем может производиться лишь в случае крайней необходимости, когда нет иного выхода. Для этого каждый исполнитель должен быть не только высококвалифицированным специалистом, хорошо изучившим устройство приборов, но он должен хорошо знать условия, в которых эта работа может быть выполнена.

Разбирать геодезические приборы можно лишь в чистом, сухом, отапливаемом и светлом помещении. Категорически запрещается разбирать приборы на открытом воздухе.

В процессе разборки, сборки, чистки, смазки и юстировки прибора надлежит строго выполнить ряд требований:

— подготовить рабочее место (стол), накрыть его светлой и мягкой материей или бумагой;

— иметь необходимые инструменты, принадлежности и материалы (набор отверток, пассатижи, кусачки, надфиль, зубную щетку, мягкую кисточку, пинцет, бензин, спирт, масло, вазелин или тавот, острые деревянные палочки, чистые стирающие льняные тряпки или специальные салфетки, гигроскопическую вату, запасные исправительные винты, гипс, столярный клей, резиновый баллон-продувку);

— до разборки продумать ее порядок и последовательность обратной сборки;

— нанести метки на сопряженных деталях;

— перед вывинчиванием винтов обязательно проверять наличие их стопорения, подбирать отвертки по размеру шлицов;

— определить места расположения отдельных деталей и узлов, удобные для последующей правильной сборки;

— при вынимании или установке одной оптической детали полностью исключить случайные прикосновения и сдвиги других оптических деталей;

— смещать и отделять призмы полного внутреннего отражения с нечетным числом граней и кронштейны, на которых крепятся оптические детали, разрешается только в исключительных случаях;

— перед чисткой необходимо тщательно осмотреть вату и поверхность детали, чтобы не было на них абразивов и песчинок, особенно при чистке лимбов, сеток нитей, шкал микроскопов и других оптических деталей;

— при чистке прибора рекомендуется придерживаться основных правил (грязь и старое масло с металлических деталей смывать бензином, просушить деталь, протереть промасленной тряпкой; грязь на резьбе винтов снимается зубной щеткой, смоченной бензином, затем деталь протирается чистой промасленной тряпкой; лимбы чистятся тампоном из ваты, намотанной на палочку, поступательно-вращательными движениями; пятна пота рук и грязь на лакированных и оксидированных поверхностях счищаются сухой мягкой салфеткой (спирт растворяет лак, бальзам и оксидированный слой), другие оптические детали следует чистить мягкой салфеткой или ватой (тампоном), смоченной в спирте, не следует стекло протирать сухой тряпкой, так как при этом на нем образуется заряд электричества, который снова притягивает пылинки);

— не следует смывать снаружи приборов водоотталкивающую замазку;

— чистые детали лучше накрывать стеклянным колпаком или чистой бумагой;

— трущиеся поверхности следует смазывать только теми смазочными материалами и в тех количествах, которые указаны в паспорте; при отсутствии указаний можно применять только нейтральные масла; ни в коем случае нельзя смазывать прибор животными или растительными маслами, так как они быстро застывают, а главное, окисляют поверхность металла. В качестве смазочных материалов могут быть рекомендованы для осевых систем: масло ОКБ 122-16, ОКБ 122-5, ЛК 20, ЛК-2 — в летнее время и ОКБ 122-12, ОКБ 122-7 — зимой и другие сорта костного масла; для резьбовых соединений и подъемных винтов — густые консистентные смазки — ОКБ-7 (ГОСТ 18179—72), ЦИАГИМ-221;

— излишняя смазка ведет к скоплению грязи;

— сборка приборов производится в обратном порядке;

— при сборке нельзя перетягивать винты;

— перед завинчиванием винта рекомендуется слегка смазать его резьбу.

После сборки прибора необходимо выполнить его осмотр, проверки и необходимые исследования.

В процессе эксплуатации сам исполнитель может производить исправление уровней и замену ампул; устранение разворота и замену сетки нитей; замену пружин и штифтов наводящих и элевационных винтов; регулировку хода подъемных винтов; устранение рена и параллаксов в микроскопах; установку диоптрийных колец окуляров; замену смазки осей; устранение неустойчивости головки штатива и подставки прибора.

§ 49. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Общие меры безопасности на топографо-геодезических работах определяются соответствующими правилами [32], которые являются обязательными для всех лиц, работающих с геодезическими приборами. Здесь кратко излагаются лишь важнейшие меры безопасности при работе с геодезическими приборами.

Не разрешается смотреть на солнце через оптические приборы без специального дымчатого стекла, чтобы избежать ожога глаз.

Нельзя устанавливать прибор на скальных выступах, у обрывов, на осыпях, узких скальных карнизах.

К работе с приборами, имеющими электропитание (светодиодные радиодальномеры, лазерные и другие приборы), допускаются лица, прошедшие специальную подготовку и сдавшие проверочные испытания на знание правил по технике безопасности. При наблюдениях названными приборами возникают опасные электромагнитные поля высокой частоты.

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Глава 9

ТЕОДОЛИТЫ

§ 50. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОВРЕМЕННЫХ ТЕОДОЛИТАХ

Согласно ГОСТ 10529—79 отечественная промышленность изготавливает теодолиты типов Т1, Т2, Т5, Т15, Т30 и Т60 и их модификации. В табл. 9 приведены основные технические характеристики отечественных теодолитов. Модификациями вышеуказанных типов теодолитов являются: Т15М и Т30М — в маркшейдерском исполнении; Т5К, Т15К и Т30К — с компенсатором углов наклона вместо уровня при вертикальном круге; Т1А, Т2А и Т5А — с автоколлимационным окуляром. Теодолиты Т15К и Т60 изготавливаются с трубой прямого изображения. При выпуске теодолита в двух исполнениях — с прямым и обратным изображением оптики зрительной трубы — марке теодолита с прямым изображением трубы приписывается буква П, например Т5КП по ГОСТ 10529—79. Для модификаций теодолитов перед обозначением типа теодолита указывается порядковый номер модели, например 2Т2.

Выпускаемые согласно ГОСТ 10529—79 типы теодолитов можно подразделить на высокоточные $m_B \leq 1''$ (Т1 и Т05), точные $m_B \leq 10''$ (Т2 и Т5), технические $m_B > 10''$ (Т15, Т30, Т60).

Зрительные трубы теодолитов имеют оптические визиры, в Т60 допускается простой визир.

Сетки нитей зрительных труб имеют вид, указанный на рис. 118.

Предел разрешения (ПР) зрительной трубы в центре поля зрения должен быть не менее

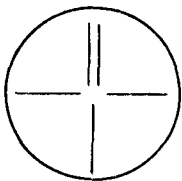
$$\text{ПР} = \frac{120''}{D} K, \quad (9.1)$$

где D — диаметр свободного отверстия объектива в мм; $K=1,2$ — для зрительных труб обратного изображения и $K=1,4$ — для зрительных труб прямого изображения.

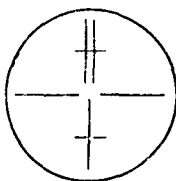
Коэффициент нитяного дальномера в трубах с сетками вида 2 и 4 (см. рис. 118) должен быть $100 \pm 0,5\%$, асимметрия дальномерных штрихов не более 0,2 %.

Теодолиты Т1 и Т2 с двусторонним (по диаметрально противоположным штрихам), а теодолиты Т5, Т15, Т30 и Т60 —

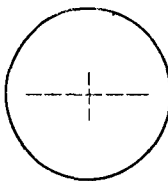
№ п/п	Наименование параметра	Нормы по типам					
		T1	T2	T5	T15	T30	T60
1	Средняя квадратическая ошибка измерения угла одним приемом, с, не более: горизонтального вертикального	1	2	5	15	30	60
		1,5	3	12	25	45	—
2	Полные ошибки диаметров лимба горизонтального круга, с., не более	1,2	1,5	2,5	—	—	—
3	Увеличение зрительной трубы	30,40	25		18	15	
4	Угол поля зрения, градус	1	1,5		2		
5	Диаметр свободного отверстия объектива трубы, мм	50	35		25	20	
6	Наименьшее расстояние визирования, м, не более	5	2	1,5	1,2	1	
7	Пределы измерения углов, градус: горизонтальных вертикальных	360					
		+60		-55			
8	Масса, кг, не более: а) теодолита б) теодолита и принадлежностей в упаковке	11	5	4,5	3,5	2,5	2
		16	9	8,5	6,5	3,5	3,5



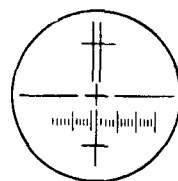
Вид 1. Сетка теодолита T1



Вид 2. Сетка теодолитов T2, T5, T15, T30 и T60



Вид 3. Сетка теодолитов T1A, T2A и T5A



Вид 4. Сетка теодолитов T15M и T30M

Рис. 118. Сетки нитей отечественных теодолитов

с односторонним отсчитыванием по лимбу. Все теодолиты, кроме Т60, имеют устройство электроосвещения. Оптические центры Т1, Т2, Т5 и Т15 встроены в алидаду, для теодолитов Т30 и Т60 допускается оптическое центрирование через полю вертикальную ось при помощи зрительной трубы.

Теодолиты имеют уровни при алидадной части с ценой деления для Т1 — $\tau=10''$, Т2 — $\tau=15''$, Т5 — $\tau=30''$, Т15 — $\tau=45''$, Т30 и Т60 — $\tau=60''$, у теодолита Т1 уровень при вертикальном круге с ценой деления $\tau=10''$, а у Т2 и Т5 — $\tau=15''$. Теодолиты Т5К, Т15К и Т30М имеют компенсатор при вертикальном круге, диапазон работы которого, соответственно, составляет 3', 4' и 5'; ошибка компенсации, соответственно, 3'', 5'' и 10''.

Теодолит типа Т60, оснащенный зенитной насадкой, позволяет выполнять вертикальное проектирование, начиная с 1 м — расстояния наименьшего визирования.

Средний срок службы теодолитов должен быть 8 лет, а для теодолитов в маркшейдерском исполнении — 6 лет. Отечественная промышленность гарантирует срок эксплуатации 2 года со дня ввода теодолитов в геодезическое производство.

Современные теодолиты (см. табл. 9) являются точными оптическими приборами; их круги и отсчетная система изготовлены из оптического стекла. Как правило, отсчитывание выполняют с помощью одного общего для обоих кругов отсчетного микроскопа, расположенного рядом со зрительной трубой. В качестве отсчетных приспособлений широко используют оптические микрометры (в основном — клиновые, реже — с плоскопараллельными пластинками), шкаловые микроскопы и микроскопы с индексом (последние только в технических теодолитах).

В теодолитах последних выпусков используют высококачественные зрительные трубы относительно небольшой длины с апохроматической или ахроматической коррекцией, которые можно переводить через зенит. Трубы высокоточных приборов обеспечивают, как правило, обратное изображение. В последние годы наметился переход к трубам с прямым изображением (в приборах массового применения).

Широко используются в теодолитах такие элементы, как компенсатор (вместо уровня при вертикальном круге), оптический центрир в алидадной части, оптические визиры при трубе, съемная ориентир-буссоль, дальномерные насадки, призмы для кругового визирования.

В настоящее время отечественная промышленность приступила к выпуску новых теодолитов 2Т2, 2Т5К, 2Т5 с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Основная цель разработки новых теодолитов — высокая унификация отдельных элементов и узлов, достигающая 70—90 %, максимальное повышение уровня их технологичности. Унификации подверглись прежде всего алидадная часть, подставка и колонки теодолитов, детали управления. Унификация наложила

свой отпечаток и на некоторые параметры приборов; наиболее характерные из них приведены в табл. 10. Разработаны и выпускаются серийно автоколлимационные теодолиты 2Т5А, 2Т2А.

Однако следует отметить, что конструктивные и технологические особенности теодолитов Т2, Т5, Т5К при умелой эксплуатации и ремонте позволяют продлить срок их службы.

Т а б л и ц а 10

Унифицированная серия теодолитов 2Т

Параметры	Теодолиты		
	2Т2	2Т5	2Т5К
Увеличение зрительной трубы	27,5	27,5	27,5
Диаметр выходного зрачка, мм	1,4	1,4	1,4
Наименьшее расстояние визирования, м	1,5	1,5	1,5
Диаметры лимбов, мм	90/65	90/70	90/70
Цена деления круга-искателя, градус	10	10	10
Цена деления лимбов, градус	20/20	1/1	1/1
Точность отсчета, с.	0,1	6	6
Цена деления уровня при алидаде, с. на 2 мм	15	30	30
Цена деления уровня при вертикальном круге, с. на 2 мм	15	30	—
Высота до горизонтальной оси, мм	225	225	225
Масса, кг	4,2	3,8	3,6
Температурный диапазон работы	От -40 до +50 °С		

Для удобства работы у большинства теодолитов зажимные и наводящие устройства размещают на одной механической оси. Повсеместно получили признание при изготовлении приборов облегченные и высокопрочные антимагнитные материалы и сплавы.

В геодезических приборах зрительная труба служит для визирования и отсчитывания по шкалам реек, а также для контроля устойчивости геодезических приборов в процессе измерений (поверительные трубы). Все зрительные трубы как минимум включают объектив (телеобъектив), окуляр, сетку нитей.

Поскольку зрительные трубы рассчитываются так, чтобы при фокусировании на бесконечность величина $\Delta=0$, то труба при $-s_{\text{виз}}=\infty$ является телескопической системой ($s_{\text{виз}}$ — расстояние до визирной цели).

В теодолите Theo-010 применяют зрительную трубу с зеркально-линзовым объективом.

По конструкции зрительные трубы всех теодолитов сходны между собой. Различаются лишь конструкции фокусирующего механизма. В одних моделях (Т30, Т15, Т15К, Т5К) фокусирующая рукоятка — кремальера — вынесена на боковую кры-

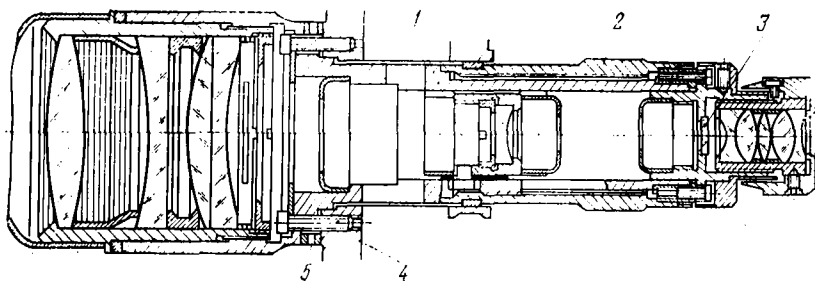


Рис. 119. Зрительная труба теодолитов 2Т2, 2Т5

шку, в других (Т5, Т2, 2Т2, 2Т5, 2Т5К) кремальера выполнена в виде кольца на трубе.

Зрительная труба теодолитов 2Т2, 2Т5К, 2Т5 (рис. 119) конструктивно отличается от зрительных труб других теодолитов. Это отличие состоит прежде всего в том, что сетка нитей 3 зрительной трубы установлена неподвижно, причем перекрестие центрируется относительно оптической оси зрительной трубы. Такая конструкция обеспечивает более стабильное положение визирной оси при перефокусировании на разноудаленные визирные цели; перефокусирование осуществляется перемещением вкладыша 1 с отрицательной линзой кремальеры 2.

Поскольку сетка неподвижна коллимационную погрешность исправляют всей зрительной трубой, изменяя ее взаимное положение относительно горизонтальной оси 4 с помощью клинового кольца 5 специальным накладным ключом.

Корпус зрительной трубы и оправу фокусирующего компонента изготавливают из легких алюминиевых сплавов. Внутренние поверхности скольжения упрочняют нанесением твердой оксидной пленки толщиной 6—9 мкм. Это обеспечивает износоустойчивость, легкость и плавность хода фокусирующей линзы, так как оксидные пленки пористы и хорошо удерживают смазку.

В теодолите Т2 применена зрительная труба ГД-302 (рис. 120) с апохроматической коррекцией, а в теодолитах Т5К и группы 2Т — ГД-309 с ахроматической коррекцией. В первой трубе значительно уменьшен вторичный спектр и сферическая и хроматическая абберации. Во второй трубе хорошо исправлены сферическая и хроматическая абберации, но вторичный спектр не исправлен, контрастные контуры изображения имеют легкий фиолетовый оттенок.

Высокие требования предъявляются к положению фокусирующей линзы. Если фокусирующая линза установлена в оправе с перекосом, то ее оптическая ось не совпадает с оптической осью объектива, если же фокусирующая линза пережата в оправе, то качество изображения будет низким.

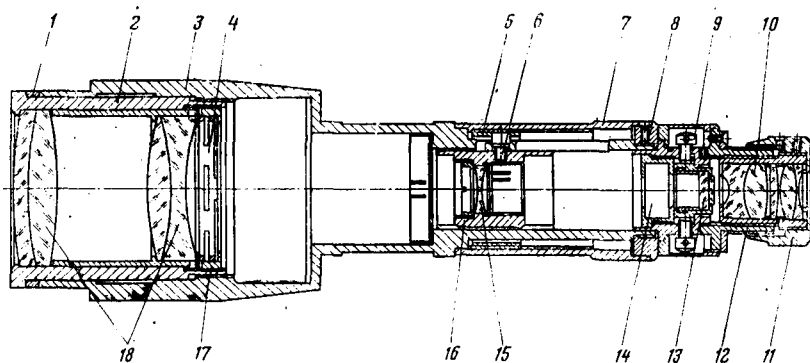


Рис. 120. Зрительная труба теодолита Т2:

1 — компенсационное кольцо; 2 — оправа объектива; 3 — корпус; 4 — пружинное кольцо; 5 — гайка; 6 — винт; 7 — кольцо кремальеры; 8 — втулка; 9 — юстировочные винты; 10 — окуляр; 11 — диоптрийное кольцо; 12 — корпус окуляра; 13 — сетка нитей; 14 — гайка; 15 — фокусирующая линза; 16 — оправа фокусирующей линзы; 17 — гайка объектива; 18 — линзы объектива

Особо следует отметить, что смещение перекрестия сетки нитей с оптической оси (что бывает необходимо при исправлении коллимационной ошибки или места нуля) в зрительных трубах с внутренней фокусировкой вызывает изменение направления визирной оси при перефокусировании на разноудаленные точки, т. е. приводит к нарушению стабильности места нуля вертикального круга и к изменению коллимационной ошибки при перефокусировании.

На рис. 121 показан график зависимости между дальностью визирования s и измерением направления визирной оси δ_u [22]. Кривые графика рассчитаны для различных теодолитов из условия, что место нуля (МО) и коллимационная ошибка (С) исправлены на $1'$ по бесконечно удаленному предмету. Если исправление велось на другую величину, то искомое значение можно определить по формулам

$$\delta'_u = \frac{\delta_u}{60''} \delta MO_\infty, \quad \delta'_u = \frac{! \delta_u}{60''} \delta C_\infty,$$

где δ_u — значение, взятое из графика.

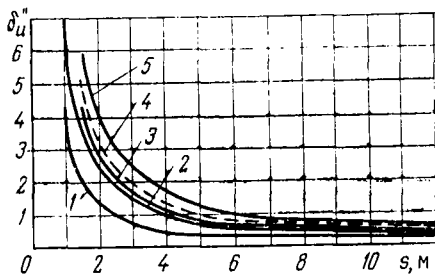


Рис. 121. График влияния смещения сетки нитей на положение визирной оси:

1 — для теодолита Т30; 2 — для Т15, Т15К; 3 — для Т2, Т2А; 4 — для Т5, Т5А; 5 — для Т5К, 2Т5К, 2Т5, 2Т2

Приведенные формулы и график показывают, что ошибка изменения положения визирной оси ощущается в основном на коротких линиях (до 10 м). Однако при геодезическом обеспечении строительства такие короткие расстояния встречаются часто, и если работа производится при одном положении круга, эту погрешность следует иметь в виду.

§ 51. ТЕОДОЛИТЫ ТЕХНИЧЕСКИЕ

Теодолиты технические предназначены для угловых измерений при инженерных, геологических и линейных изысканиях, при прокладке теодолитных и тахеометрических ходов, в съёмочных сетях, при переносе проектов в натуру, при геодезическом обеспечении строительства сооружений и т. п. Эти приборы обычно небольших размеров, имеют малую массу и просты в использовании. Диаметр горизонтального круга у них в пределах 50—80 мм, а вертикального 40—70 мм, увеличение зрительной трубы 17—25×. В силу относительно невысокой точности эти теодолиты обычно имеют простейшие отсчетные приспособления — в старых конструкциях верньеры, а в современных — односторонние штриховые и шкаловые микроскопы [22].

К этому классу теодолитов относятся современные оптические теодолиты Т15, Т30, Т60. Из теодолитов, изготавливаемых иностранными фирмами и применяемых в СССР, можно назвать Theo-020 (ГДР), ТЕ-Д2 (ВНР), теодолиты зарубежных фирм: «Ниппон» (Япония), «Отто Феннель» (ФРГ), «Фило-техника» (Италия), «Керн» (Швейцария), «Файнтехник» (ФРГ), «Вильд Хеербруг» (Швейцария) и др. выпускают технические теодолиты с нониусами, штриховыми и шкаловыми микроскопами.

В СССР ранее выпускались и иногда еще находят применение технические теодолиты ТТ-50, ТТ-4, ОТМ, Т20.

Теодолит Т30 показан на рис. 122. Оптическая схема теодолита Т30 имеет одноканальную отсчетную систему с отсчитыванием по одной стороне угломерных кругов. Оценка доли деления круга производится на глаз по неподвижному индексу. На рис. 123 показано поле зрения штрихового отсчетного микроскопа. Отсчет по вертикальному кругу равен $358^{\circ}46'$, отсчет по горизонтальному кругу равен $70^{\circ}05'$.

Формулы для вычисления углов наклона имеют следующий вид:

$$\alpha = \frac{Л - П - 180^{\circ}}{2}, \quad \alpha = Л - МО = МО - П - 180^{\circ}, \quad (9.2)$$

где Л и П — отсчеты по вертикальному кругу при его положении слева и справа; МО — место нуля вертикального круга.

В теодолите Т15 также применена одноканальная схема отсчетной системы с отсчитыванием по одной стороне угломерных кругов.

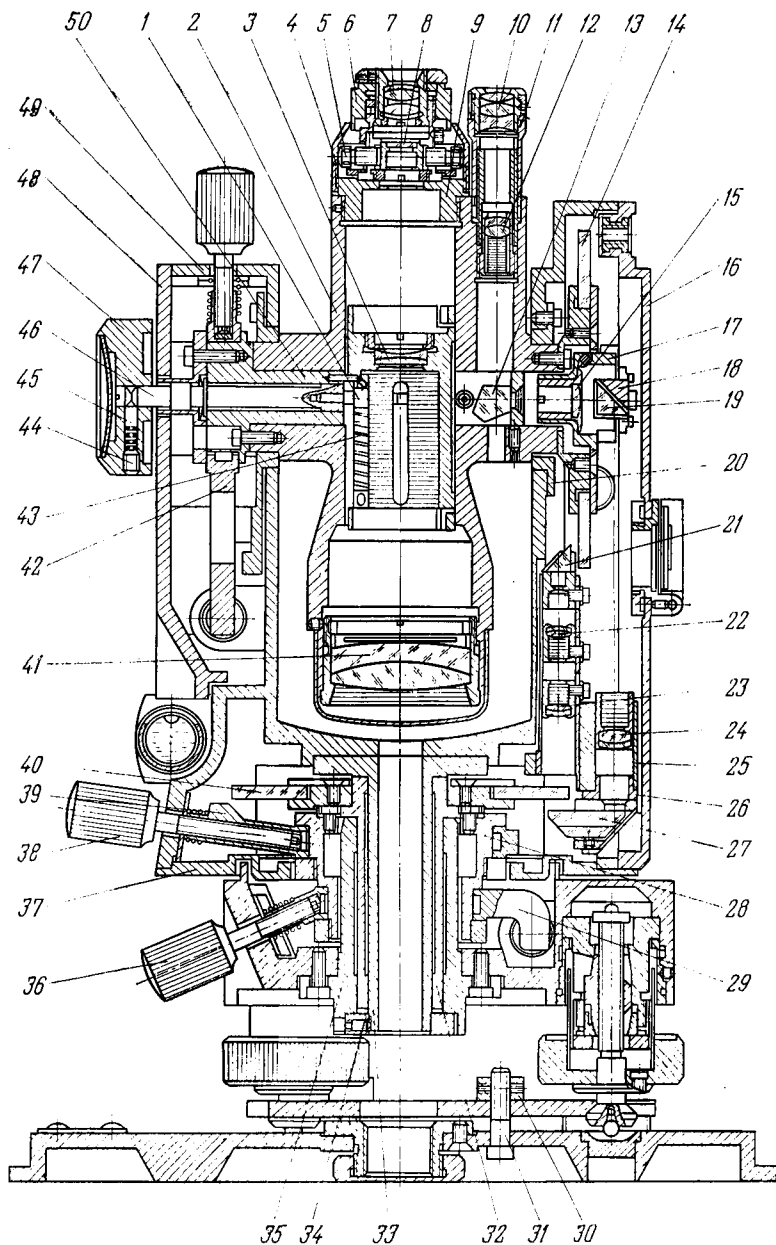


Рис. 122. Теодолит Т30 (разрез):

1 — трубка; 2 — корпус трубы; 3 — фокусирующая линза; 4 — колпачок; 5 — юстировочные винты сетки; 6 — диоптрийное кольцо; 7 — окуляр; 8 — сетка; 9 — фланец; 10 — окуляр микроскопа; 11 — отсчетный микроскоп; 12 — объектив микроскопа; 13 — пентапризма; 14 — вертикальный круг; 15 — коллектив с индексом; 16, 48 — боковые крышки; 17, 25 — кронштейны; 18 — оправа призмы; 19, 21, 27 — призмы; 20, 43 — лагеры; 22, 23 — линзы объектива вертикального круга; 24 — объектив горизонтального круга; 26 — обой-

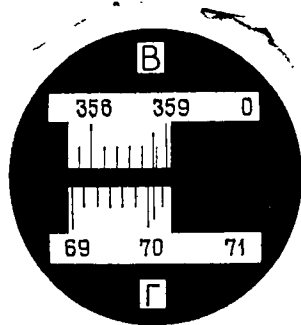


Рис. 123. Поле зрения штрихового микроскопа теодолита Т30

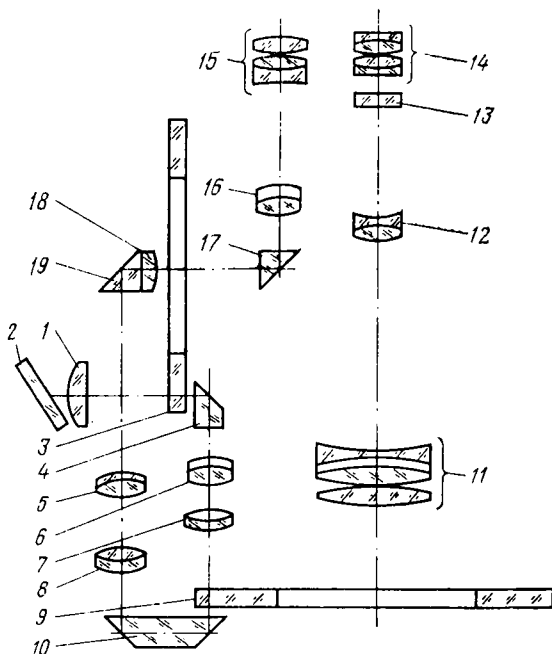


Рис. 124. Оптическая схема теодолита Т15

В теодолите Т15 изображение штрихов вертикального круга 3 (рис. 124) с помощью призмы 4 и двух линз 6 и 7 объектива проецируется в плоскость штрихов горизонтального круга 9. Изображение штрихов обоих кругов с помощью призмы 10, линз 8, 5 объектива и призмы 19 проецируется на плоскую поверхность коллектива 18, на которой нанесены две шкалы и диффрагма, ограничивающая поле зрения отсчетного микроскопа. Отсчетный микроскоп состоит из объектива 16 и окуляра 15. Прямоугольная призма 17 изменяет направление хода лучей. Подсветка кругов осуществляется через иллюминатор 1 зеркалом 2.

Оптическая схема зрительной трубы состоит из трехлинзового объектива 11, фокусирующей линзы 12, склеенной из двух линз, сетки 13 и симметричного окуляра 14.

В поле зрения отсчетного микроскопа изображение штрихов горизонтального круга отмечено буквой «Г», а вертикального — буквой «В». Угломерные круги разделены через 1° , каждый штрих оцифрован. В верхней и нижней половинах поля зрения имеются две шкалы, содержащие по 60 основных делений и по 2 дополнительных. Номинальное значение цены одного деления шкалы — $1'$. Погрешность отсчитывания по шкалам

ма; 28 — втулка хомутиков; 29, 39, 42 — хомутики; 30 — гайки; 31 — винты; 32 — втулка вертикальной оси; 33 — вертикальная ось; 34 — ограничительная гайка; 35 — оправа вертикальной оси; 36, 38 — закрепительные винты; 37 — нижняя крышка; 40 — горизонтальный круг; 41 — объектив; 44 — винт; 45 — вкладыш; 46 — ось кремальеры; 47 — кремальера; 49 — колонка; 50 — втулка кремальеры

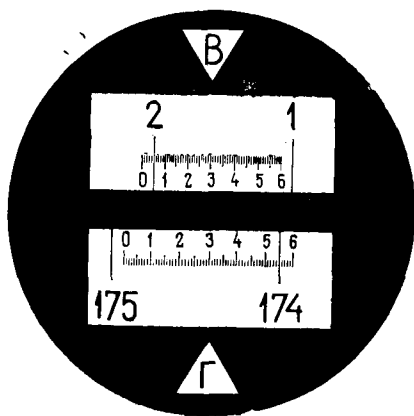


Рис. 125. Поле зрения шкалового микроскопа теодолита Т15

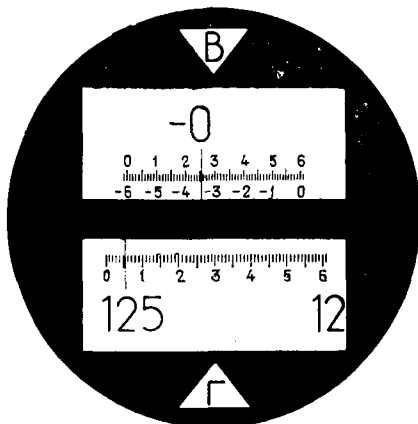


Рис. 126. Поле зрения шкалового микроскопа теодолитов с секторной оцифровкой вертикального круга (Т15К, 2Т15, 2Т5, 2Т5К)

составляет около $0,1'$ ($6''$). На рис. 125 отсчет по горизонтальному кругу равен $174^{\circ}55,0'$, по вертикальному кругу — $2^{\circ}05,2'$. Формулы для вычисления углов наклона имеют тот же вид (9.2), что и для теодолита Т30.

В теодолите Т15К применен вертикальный круг с секторной оцифровкой. Секторная оцифровка (рис. 126) позволяет определять углы наклона, не прибегая к дополнительным вычислениям. Вертикальный круг разбит на 4 сектора, из которых два противоположных имеют положительную оцифровку, а два других — отрицательную. В соответствии с этим верхняя оцифровка шкалы служит для отсчитывания положительных вертикальных углов, нижняя — отрицательных. На рис. 126 отсчет по вертикальному кругу равен $-0^{\circ}34,5'$. Если бы перед цифрой 0 не было знака минус, то отсчет был бы $0^{\circ}25,5'$. Отсчет по горизонтальному кругу равен $125^{\circ}05,2'$.

В теодолите Т15К основное положение вертикального круга — слева от наблюдателя. Формулы для вычисления углов наклона имеют вид

$$\alpha = \frac{Л - П}{2}, \quad \alpha = Л - МО, \quad \alpha = МО - П. \quad (9.3)$$

Теодолит Т15К разработан на базе Т15. Основным отличием является узел компенсатора вертикального круга, несколько изменена конструкция зрительной трубы, а также оптическая система объективов вертикального и горизонтального кругов.

Зрительная труба в Т15К прямого изображения и в отличие от Т15 содержит оборачивающую призмную систему Порро.

В качестве автоматического компенсирующего элемента в Т15К применена призма с крышей (Акр-90°) на маятниковом пружинном подвесе.

Погрешность компенсатора не превышает 1—2".

В настоящее время отечественная промышленность на базе теодолита Т30 освоила выпуск технического теодолита 2Т30. Зрительная труба с увеличением 20^х имеет уровень для установки трубы в горизонтальное положение.

Вертикальный круг имеет секторную оцифровку, в качестве отсчетного устройства используется шкаловая микроскоп, цена деления шкалы 5', точность отсчитывания по кругам 0,5'.

§ 52. ТОЧНЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

К точным теодолитам относятся Т5, Т5К, 2Т5, 2Т5К, Т2, 2Т2.

Теодолит Т5 имеет точно такое же поле зрения отсчетного микроскопа, что и Т15. В теодолите Т5 за основное положение принят вертикальный круг справа. Формулы для вычисления углов наклона имеют вид

$$\alpha = \frac{\text{П} - \text{Л} - 180^\circ}{2}; \quad \alpha = \text{П} - \text{МО}, \quad \alpha = \text{МО} - \text{Л} - 180^\circ, \quad (9.4)$$

где П и Л — отсчеты при вертикальном круге справа и слева; МО — место нуля вертикального круга.

К отсчетам, меньшим 90°, прибавляют предварительно 360°. Перед отсчетом по вертикальному кругу необходимо убедиться в том, что концы пузырька уровня совмещены.

Отсчетное устройство теодолита 2Т5 (рис. 127, 128, 129), являющегося представителем группы унифицированных теодолитов серии 2Т, аналогично отсчетному микроскопу теодолита Т15К. В теодолите 2Т5, как и в других теодолитах унифицированной серии, за основное положение принят вертикальный круг слева. Для вычисления углов наклона используют формулы (9.3) — те же, что и при вычислении углов, измеренных теодолитом Т15К.

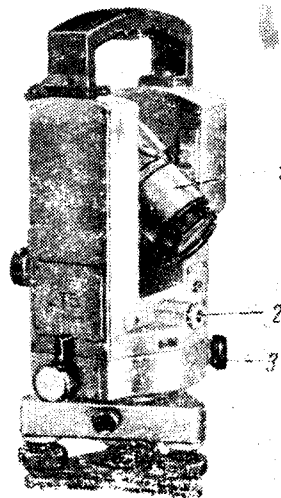


Рис. 127. Теодолит 2Т5:

1 — зрительная труба; 2 — окуляр оптического отвеса; 3 — кремальера для перестановки лимба

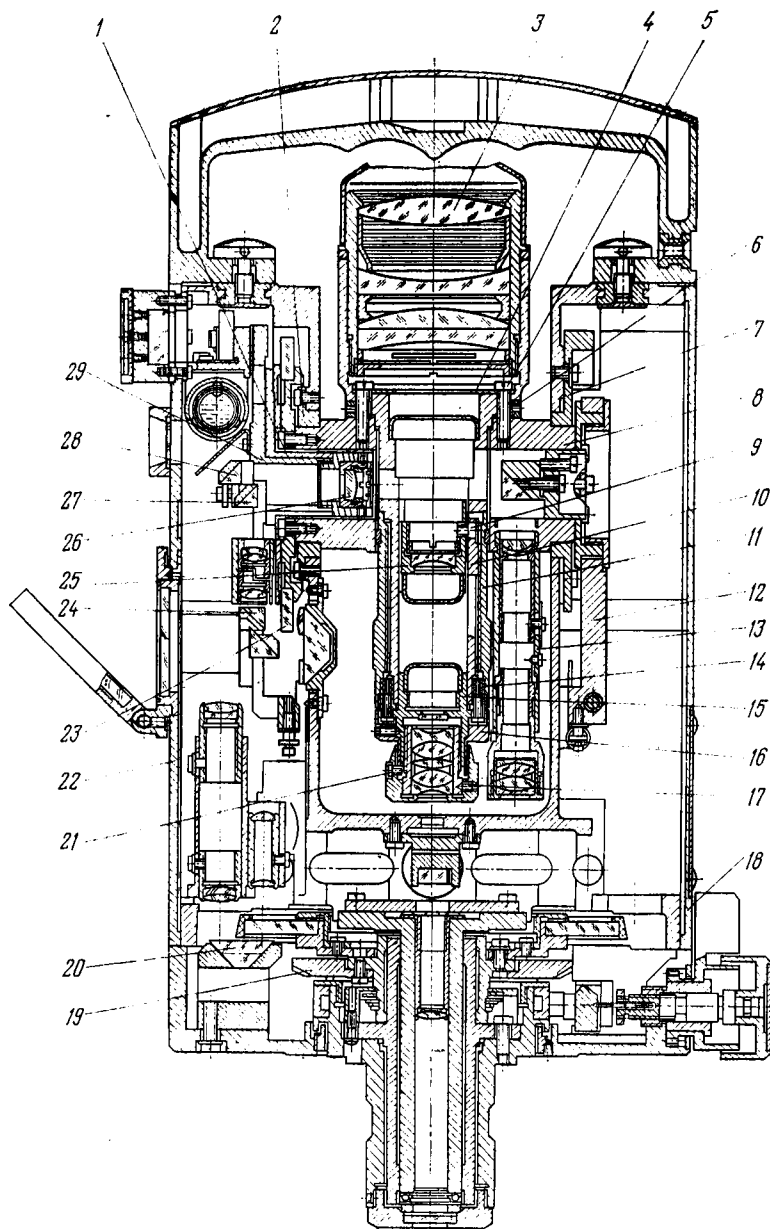


Рис. 128. Теодолит 2Т5 (разрез):

1 — ось алидады вертикального круга; 2, 7 — лагера; 3 — объектив; 4 — диафрагма; 5, 9 — винты; 6 — клиновое кольцо; 8 — горизонтальная ось; 10 — вкладыш; 11 — кремальеры; 12 — хомутик; 13 — микроскоп; 14, 15, 29 — втулки; 16 — колпачок; 17 — винт стопорный; 18, 22 — боковые крышки; 19 — зубчатое колесо; 20, 24, 27, 28 — призмы; 21 — винт-упор; 23 — вертикальный круг; 25 — оправка фокусирующей линзы; 26 — шкала

Перед измерением углов наклона следует совместить концы пузырька уровня установочным винтом.

Принцип действия оптического компенсатора теодолита Т5К основан на том, что оптическая деталь или целая оптическая система, закрепленная на пружине или проволоках,

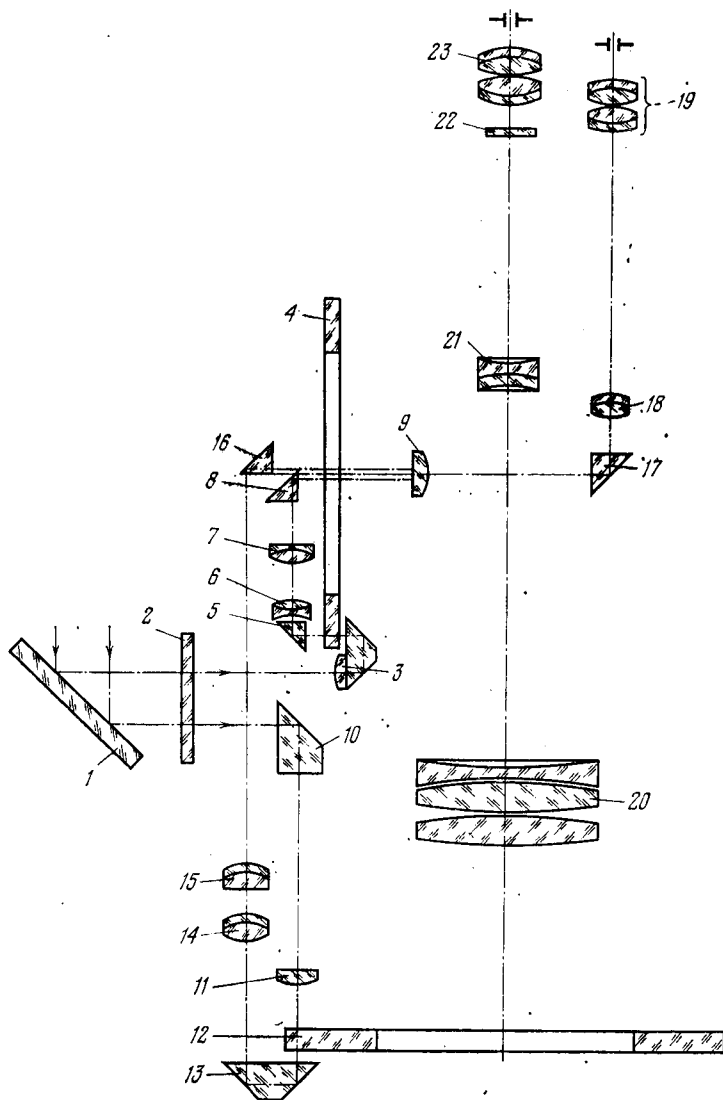


Рис. 129. Оптическая схема теодолита Т5:

1 — зеркало; 2 — иллюминатор; 3 — призма; 4 — вертикальный круг; 5, 8 — призмы; 6, 7 — линзы объектива вертикального круга; 9 — коллектив со шкалой; 10 — призма; 11 — коллектив; 12 — горизонтальный круг; 13, 16, 17 — призмы; 14, 15 — линзы объектива горизонтального круга; 18 — объектив микроскопа; 19 — окуляр микроскопа; 20 — объектив зрительной трубы; 21 — фокусирующая линза; 22 — сетка; 23 — окуляр зрительной трубы

становится маятником и под действием собственной массы стремится занять отвесное положение, компенсируя этим погрешность установки теодолита. На рис. 130 изображен принцип действия оптического компенсатора, которым может являться отражающая поверхность плоского зеркала Π_2 . На рис. 130, а показано исходное положение прибора, когда вертикальная ось вращения xx_1 расположена отвесно, визирная ось зрительной трубы — горизонтально, а штрих «О» вертикального круга проецируется с помощью линз Λ_1 и Λ_2 в двух отражающих поверхностях Π_1 и Π_2 в точку O' шкалы отсчетного микроскопа. На рис. 130, б показано положение системы после наклона вертикальной оси на угол γ . Все элементы оптической системы наклонились на тот же угол, кроме отражающей поверхности Π_2 , которая под действием собственной массы и благодаря гибкому элементу в точке закрепления осталась в прежнем положении. Если зрительную трубу снова установить горизонтально, то штрих «О» вертикального круга снова спроецируется в точку O' шкалы микроскопа. Таким образом, независимо от угла наклона прибора при неизменном положении зрительной трубы отсчет по вертикальному кругу остается одним и тем же. Если при наклоне теодолита падающий на линзу Λ_2 пучок лучей будет оставаться параллельным ее оптической оси, то отсчет по шкале не изменится, т. е. будет выполнено условие компенсации. Условие параллельности может быть обеспечено, если фокусное расстояние первой линзы будет равно половине радиуса вертикального круга:

$$f'_1 = R/2.$$

Это равенство справедливо для условия, когда компенсатор занимает строго отвесное положение, т. е. упругий момент под-

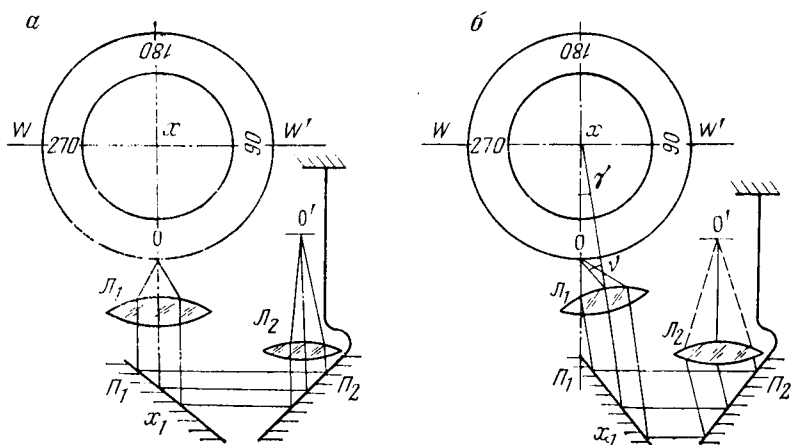


Рис. 130. Схема действия оптического компенсатора Т5К

вески пренебрегаемо мал по сравнению с моментом компенсатора. Если упругий момент подвески достигнет значения, соизмеримого с моментом компенсатора, то при наклоне теодолита компенсатор не будет оставаться отвесным, у него появится некоторый угол отклонения κ , величина которого будет зависеть от угла наклона. Поэтому в общем случае формула условия компенсации выглядит так:

$$f'_1 = \frac{R}{2 \left(1 - \frac{\kappa}{\gamma}\right)}, \quad (9.5)$$

для малых углов отношение $\kappa/\gamma = k$ — величина постоянная, тогда

$$f'_1 = \frac{R}{2(1 - k)}. \quad (9.6)$$

Условие компенсации может быть выполнено и тогда, когда $f'_1 \neq \frac{R}{2}$. Для этого достаточно только изменить момент компенсатора, доведя его до такой величины, когда произойдет полная компенсация наклона. Изменение момента достигается перемещением или изменением груза 7 (рис. 131), а компенсатором является призма 11 (вместо двух зеркал P_1 и P_2 на рис. 130), установленная в оправу 10, которая с помощью кронштейна 9 укреплена на штанге 12, соединенной с упругим элементом — пружиной 2. Верхняя часть пружины закреплена на неподвижном кронштейне 3, связанном с платой 1. Пружину закрепляют пластинками 5 и 13. Ограничители 4 предохраняют пружину от повреждения при транспортной тряске. Штифт 6 служит осью вращения кронштейна 9 при юстировке призмы компенсатора 11. Для успокоения колебаний компенсатора служит демпфер 8 воздушного типа.

Теодолит Т15К отличается от теодолита Т5К лишь направлением оцифровки шкалы вертикального круга. За основное положение, как и во всех других теодолитах унифицированной группы 2Т, принят вертикальный круг слева.

Теодолит Т5К может быть использован в качестве нивелира. Для приведения визирной оси зрительной трубы в горизонтальное положение достаточно путем ее наклона установить отсчет по отсчетному микроскопу, равный месту нуля (МО), поэтому к точности определения МО вертикального круга предъявляются повышенные требования. Высоту прибора измеряют до красной точки, расположенной в центре кремальер.

Теодолит Т2 имеет ряд узлов, унифицированных с другими теодолитами.

Основными отличительными особенностями теодолита Т2 являются угломерные круги, разделенные с высокой точностью, более сложная оптическая схема отсчетной системы. Послед-

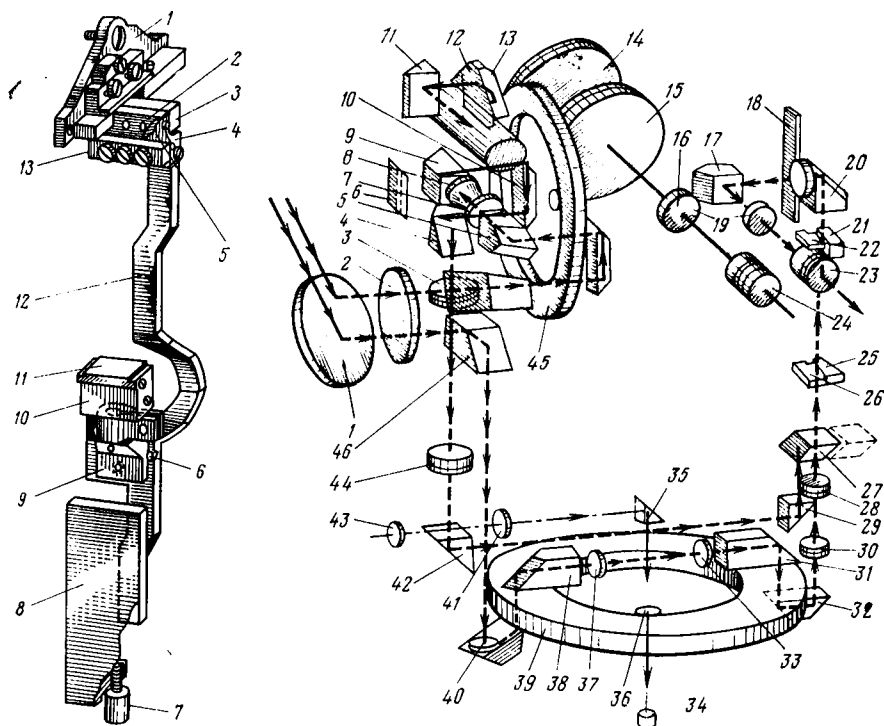


Рис. 131. Компенсатор Т5К

Рис. 132. Оптическая схема Т2:

1 — зеркало; 2 — иллюминатор; 3, 44 — линзы объектива вертикального круга; 4, 6, 12, 13, 29, 32, 35, 42, 46 — призмы; 5, 9 — призмы мостика вертикального круга; 7, 8 — линзы мостика вертикального круга; 10 — призма со светофильтром; 11 — призма-лупа; 14, 15 — линзы объектива зрительной трубы; 16 — фокусирующая линза; 17 — пентапризма; 18 — шкала; 19 — объектив микроскопа; 20 — блок призм; 21, 22, 25, 26 — оптические клинья микроскопа; 23 — окуляр микроскопа; 24 — окуляр; 27 — ромб-призма; 28, 30 — линзы; 31, 38 — призмы мостика горизонтального круга; 33, 37 — линзы мостика горизонтального круга; 34 — защитное стекло; 36 — объектив оптического отвеса; 39 — горизонтальный круг; 40 — призма с коллективом; 41 — сетка отвеса; 43 — окуляр отвеса; 45 — вертикальный круг

няя позволяет использовать при отсчитывании принцип совмещенного отсчета по двум противоположным сторонам угломерных кругов оптического микрометром.

Оптическая схема теодолита Т2 показана на рис. 132, разрез теодолита — на рис. 133.

На рис. 134 показана схема оптического микрометра. Микрометр состоит из двух пар оптических клиньев. Одна, нижняя, пара неподвижная, а вторая, верхняя, — подвижная; вращением маховичка ее можно перемещать поступательно вдоль направления луча. Инструментальные ошибки в микрометре сведены до минимума благодаря жесткому креплению шкалы с подвижными клиньями. Равномерность шкалы микрометра обеспечивается на точных продольных делительных машинах

с ошибкой не более 0,002 мм, что соответствует ошибке отсчета в 0,03".

Микрометр укреплен на боковой крышке правой колонки теодолита, если смотреть при круге лево.

Изображения штрихов горизонтального и вертикального кругов формируются в системе микрометра отдельно по двум оптическим каналам. Переключение каналов осуществляется с помощью призмы, которую во время отсчета по горизонтальному кругу отводят в сторону путем вращения специальной рукоятки переключателя, а при отсчитывании по вертикальному кругу вводят в систему.

Поле зрения отсчетного микроскопа-микрометра показано на рис. 135. В верхней половине большого окна видно изображение штрихов основной стороны круга, а в нижней — противоположной ей — контрольной стороны. В малом окне виден горизонтальный штрих — индекс и изображение штрихов шкалы микрометра.

Горизонтальный круг имеет двойные (бифилярные) штрихи, а вертикальный — одинарные; при наблюдении вертикального круга фон поля приобретает желтый оттенок.

Чтобы отсчитывать по кругу, необходимо вращением маховичка микрометра совместить изображения верхних и нижних штрихов круга. Отсчет числа градусов производят по верхнему изображению слева от центра или непосредственно в центре окна. Затем отсчитывают число десятков минут, равное числу интервалов, заключенных между отсчитанным верхним оцифрованным штрихом и нижним оцифрованным штрихом, отличным от верхнего на 180°. При этом следует иметь в виду, что нижний оцифрованный штрих всегда будет располагаться вправо от верхнего или, как частный случай, может быть совмещен с ним. Единицы минут отсчитывают в малом окошке по левому ряду цифр. Десятки секунд отсчитывают там же, но по правому ряду цифр. Секунды и их доли отсчитывают по неподвижному индексу, имея в виду, что каждое малое деление шкалы соответствует 1" (на рис. 135 отсчет 57°58'02,0").

В теодолите Т2 за основное положение принят круг лево. Формулы для вычисления зенитных расстояний имеют вид:

$$z = \frac{Л - П + 360^\circ}{2}; \quad z = Л - МZ; \quad z = МZ - П, \quad (9.7)$$

где z — зенитное расстояние; $МZ$ — место зенита; $Л$ и $П$ — отсчеты при вертикальном круге слева и справа.

В необходимых случаях к $МZ$ нужно прибавить 360°.

Основными конструктивными особенностями модели теодолита Т2 являются: новая система отсчитывания по микроскопу оптического микрометра; неподвижное закрепление сетки нитей — исправление коллимационной ошибки путем поворота всей трубы; унификация ряда узлов с теодолита Т5, Т15;

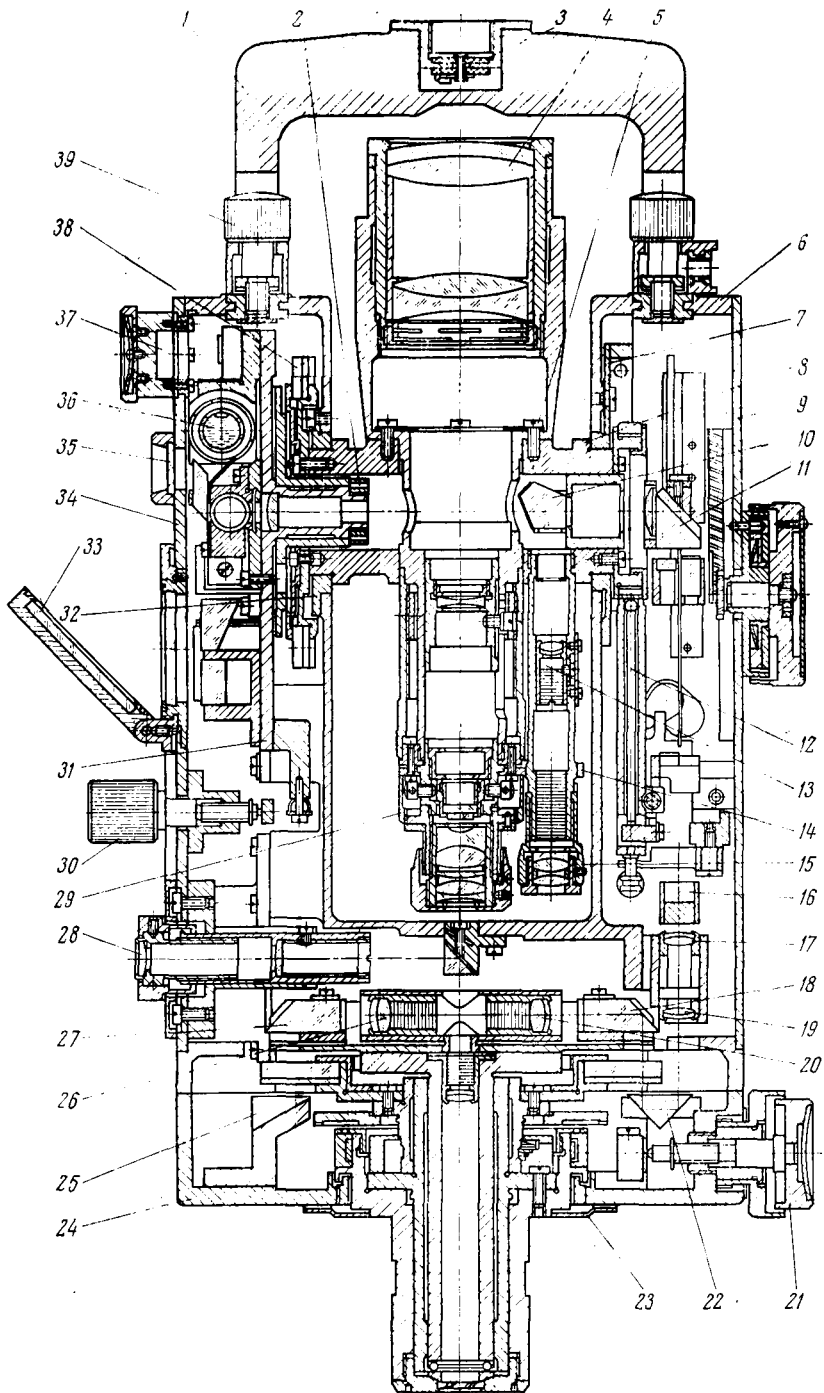


Рис. 133. Теодолит Т2 (разрез):

1 — ручка; 2 — гайка; 3 — контактное гнездо-патрон; 4 — объектив; 5 — винт; 6 — колонка; 7, 32 — лагера; 8 — горизонтальная ось; 9, 34 — боковые крышки; 10 — пентапризма; 11 — блок призм; 12 — хомутки; 13 — оправа с объективом микроскопа; 14 — перемычка; 15 — диоптрийное кольцо; 16 — ромб-призма; 17, 19 — линзы объектива горизонтального круга; 18, 27 — призмы оптического мостика горизонтального круга; 20, 26 — линзы оптического мостика горизонтального круга; 21 — наводящий винт; 22, 25 — призмы; 23 — токосъемное кольцо; 24 — горизонтальный круг; 28 — окулярная часть оптического отвеса; 29 — колпачок; 30 — наводящий винт уровня; 31 — плата; 33 — зеркало; 35 — окно; 36 — уровень при алидаде вертикального круга; 37, 38 — призмы; 39 — вертикальный круг

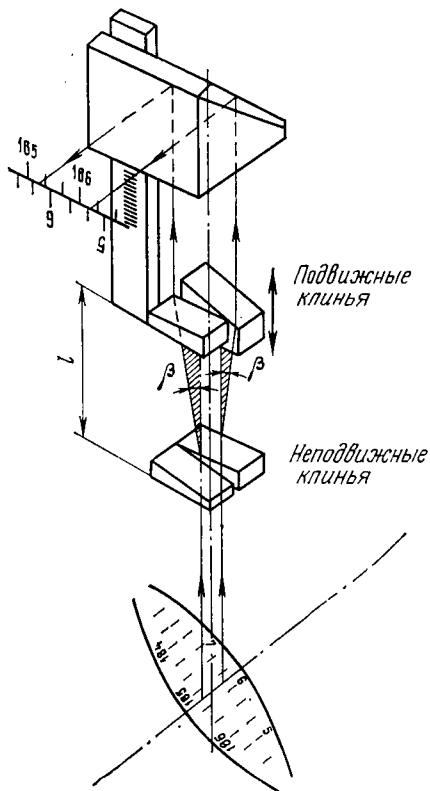
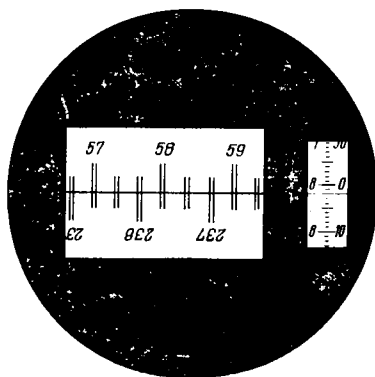


Рис. 134. Схема оптического микрометра Т2

Рис. 135. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т2



имеется круг-искатель для установки начального отсчета; применены закрепительные устройства куркового типа.

В отсчетной системе теодолита Т2 (рис. 136) применена дополнительная шкала десятков минут. В связи с этим вид поля зрения (рис. 137) отсчетного микроскопа несколько изменен. В центральном малом окошке, разделенном горизонтальной линией, производится совмещение изображений штрихов угломерного круга. В верхнем большом окошке отсчитывают число градусов и десятков минут, в боковом окошке — единицы минут и секунды.

Цифра, расположенная под числом градусов, показывает количество десятков минут. Единицы минут и секунды отсчи-

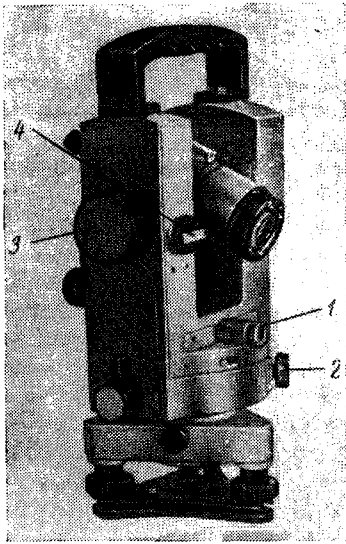


Рис. 136. Теодолит Т2:

1 — окуляр оптического отвеса; 2 — кремальера для перестановки лимба; 3 — барабан оптического микрометра; 4 — переключатель кругов



Рис. 137. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т2

тывают, как и в Т2, по индексу в малом правом окне. На рис. 137 отсчет по микроскопу соответствует $17^{\circ}25'27,0''$.

Измерение и вычисление углов выполняются так же, как в теодолите Т2. За основное положение принят круг лево.

§ 53. ВЫСОКОТОЧНЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

Высокоточные теодолиты предназначены для построения государственных геодезических сетей 1, 2 и 3 классов, точной полигонометрии, создания высокоточных инженерно-геодезических сетей при строительстве уникальных сооружений, решения научных задач и т. п. Диаметр горизонтального круга у современных теодолитов этой группы составляет 140—200 мм, а вертикального круга—90—130 мм. Применяются высокоточные двусторонние оптические микрометры на базе плоскопараллельных пластин; в теодолитах прежних конструкций для взятия отсчетов использовались микроскопы с винтовым микрометром. Точность измерений высокоточными теодолитами может быть повышена путем использования вспомогательных устройств: окулярного микрометра, накладного уровня, дополнительной поверительной (контрольной) трубы у подставки.

К современным высокоточным теодолитам следует отнести Т05 и Т1, из прежних приборов (из еще применяющихся) —

ОТ-02, ТТ 2/6. Из зарубежных теодолитов к этой группе можно отнести ряд теодолитов, например, Theo-003 (ГДР), ТЗ, Т4 («Вильд Хеербруг», Швейцария), ДКМ-3 («Керн», Швейцария), ТРг («Аскания», Западный Берлин) и др.

Теодолит Т-05 (рис. 138) ($m_{\phi} = 0,5''$) состоит из двух частей. Верхняя съемная часть включает зрительную трубу, горизонтальную ось и вертикальный круг; нижняя часть — несъемную подставку с подъемными винтами, вертикальную осевую систему, горизонтальный круг, алидаду с колонками, несущими лагерами, оптическую отсчетную систему горизонтального круга.

Вертикальная ось цилиндрическая, полая, саморегулирующаяся, жестко соединена с алидадной частью и опирается через шарики на коническую ось баксы. В нижней части прибора находится разгрузочное приспособление, предохраняющее рабочие части прибора при транспортировке.

Горизонтальная ось имеет стальные цилиндрические цапфы открытого типа, которые ложатся на несущие лагера нижней части, одна из которых имеет исправительные винты для исключения неравенства подставок. Зрительная труба центральная, астрономическая. Плоскопараллельная пластинка (ППП) окулярного микрометра помещена перед сеткой нитей. ППП поворачивается вокруг вертикальной оси на $\pm 5^{\circ}$, что вызывает смещение визирного луча на $30''$, цена деления барабана окулярного микрометра $1''$. Сетка нитей состоит из биссектора с угловым расстоянием $36''$ и одиночного вертикального и горизонтального штрихов.

Горизонтальный и вертикальный круги имеют отдельное электроосвещение и различный цветовой фон. На кругах нанесены бифилярные штрихи через десятиминутные интервалы, оцифрованные через градус от 0 до 359° . Горизонтальный круг может перемещаться для установки требуемого отсчета.

Техническая характеристика Т05

Увеличение зрительной трубы	62; 50; 37
Длина главной трубы, мм	375
Фокусное расстояние объектива, мм	500
Диаметр свободного отверстия объектива, мм	64
Угол поля зрения	$0^{\circ}41'$
Разрешающая способность трубы	$2,2''$
Цена деления барабана окулярного микрометра	$1''$
Диаметр горизонтального круга, мм	180
Диаметр вертикального круга, мм	130
Наименьшее деление кругов	$10'$
Масса, кг:	
теодолит в собранном виде	19
укладочный ящик с нижней частью теодолита	20,8
укладочный ящик с верхней частью теодолита	15,4
Габариты, мм:	
высота теодолита до горизонтальной оси вращения	340
укладочный ящик для нижней части прибора	$330 \times 330 \times 467$
укладочный ящик для верхней части прибора (зрительные трубы и уровни)	$440 \times 427 \times 224$

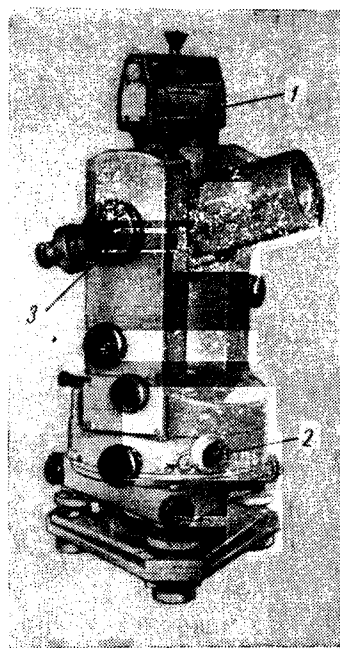
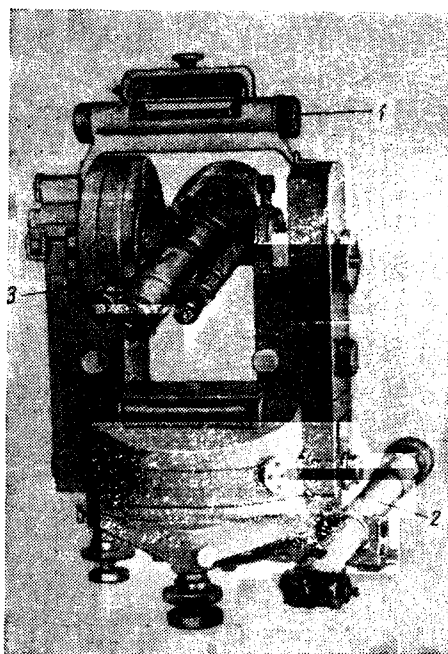


Рис. 138. Теодолит Т05:

1 — накладной уровень; 2 — поверительная труба; 3 — окулярный микрометр

Рис. 139. Теодолит Т1:

1 — накладной уровень; 2 — кремальера для перестановки лимба; 3 — барабан оптического микрометра

При работе с прибором могут использоваться три уровня: цилиндрический накладной с ценой деления $\tau=4''$, устанавливаемый на цапфы горизонтальной оси; цилиндрический уровень при алидаде горизонтального круга с $\tau=6-7''$ и цилиндрический контактный уровень при алидаде вертикального круга с $\tau=10-12''$.

Теодолит Т1 (рис. 139) имеет несъемную подставку, алидадную часть, связанную конструктивно с колонками, несущими горизонтальную осевую систему, и отсчетное устройство.

Оси цилиндрические, полые, жестко соединенные: вертикальная — с алидадной частью прибора, горизонтальная — с трубой.

Зрительная труба центральная, астрономическая со сменными окулярами на разное увеличение. Сетка состоит из биссектора с угловым расстоянием $40''$, штрихи сетки нанесены на плоскопараллельную пластинку. Труба имеет окулярный микрометр с ценой деления $1''$ и пределом измерений $30''$, изображение шкалы микрометра передается в поле зрения трубы.

Наименьшее деление круга 10', горизонтальный круг может перемещаться с помощью устройства для перестановки, вертикальный круг жестко соединен с горизонтальной осью прибора. В отсчетной системе использован клиновой микрометр с ценой деления шкалы 1", нанесенной на стекле. В конструкции теодолита использованы три уровня: накладной, при алидаде горизонтального круга и при алидаде вертикального круга.

Техническая характеристика Т1

Увеличение трубы	30; 40
Фокусное расстояние объектива, мм	350
Диаметр свободного отверстия объектива, мм	62
Угол поля зрения	1°30'
Разрешающая способность трубы	2,4"
Наименьшее расстояние визирования, м	5
Диаметр, мм:	
горизонтального круга	135
вертикального круга	90
Цена деления ампулы уровня на 2 мм:	
накладного	5"
при алидаде горизонтального круга	7"
при алидаде вертикального круга	12"
уровня типа Талькотта	4"
Масса, кг	11,8
Габариты, мм	370×200×190

§ 54. ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОШИБКИ ТЕОДОЛИТОВ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ

Исследования имеют целью установить инструментальные характеристики отдельных узлов геодезических приборов и приборов в целом, проверить правильность работы механизмов, оценить надежность, точность и стабильность измерительных качеств приборов. Любое исследование прибора требует тщательной подготовки и проведения достаточно точных измерений. Программа измерений должна обеспечить требуемую точность конечного результата исследований. Перед началом исследований производят поверки теодолита в последовательности и методике, указанных в инструкции по эксплуатации.

Основные технические параметры теодолитов должны соответствовать метрологическим характеристикам, представленным в табл. 11.

Исследование оптических теодолитов

До начала исследований и поверок теодолит и вспомогательное оборудование должны быть выдержаны на рабочих местах не менее 1 ч. Подготовка теодолита к измерениям должна производиться в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

1. При проведении внешнего осмотра должно быть установлено качество отделки прибора; наличие механических повреж-

дений на кожухе и оптических деталях; равномерность освещения и чистота поля зрения отсчетного микроскопа; полнота комплекта, правильность маркировки.

При проведении опробования должны быть установлены плавность и легкость вращения подвижных частей; работоспособность зажимных, наводящих и подъемных винтов; удобство расположения шкал и уровней; качество изображения сетки нитей и шкал оптических систем; удобство укладки теодолита и принадлежностей в футляр и т. п.

Т а б л и ц а 11

Метрологические характеристики теодолитов

№ п/п	Характеристика	Типы теодолитов					
		T05	T1	T2	T5	T15	T30
1	Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтального угла, с	0,5	1	2	5	15	20
2	Средняя квадратическая ошибка измерения вертикального угла, с	1	1,5	3	8	20	45
3	Ошибки диаметров горизонтального круга, с	1,0	1,2	1,5	2,5	6,0	10,0
4	Коэффициент нитяного дальномера, %	—	—	100±0,5	100±0,5	100±1	100±1
5	Цена деления окулярного микрометра, с	1± ±0,05	1± ±0,05	—	—	—	—
6	Рен отсчетного устройства горизонтального круга, с	0,5	0,7	1	3	6	—
7	Рен отсчетного устройства вертикального круга, с	2	2	2	3	6	—
8	Ошибка за ход фокусирующей линзы, с	2	2	2	3	6	30
9	Эксцентриситет вертикального круга, с	—	—	—	10	15	60
10	Коллимационная ошибка, с	—	—	5	15	30	60
11	Место нуля вертикального круга, с	—	—	10	15	60	120

2. Увеличение зрительной трубы определяют по формуле

$$\Gamma = D_{\text{вх}}/d_{\text{вых}}, \quad (9.8)$$

где $D_{\text{вх}}$ — диаметр входного отверстия трубы (практически диаметр объектива по стеклу), измеряемый штангенциркулем или

измерителем и масштабной линейкой с ошибкой не более 0,1 мм; $d_{\text{вых}}$ — диаметр изображения свободного (входного) отверстия за окуляром трубы, измеряемый динамометром с ошибкой не более 0,02 мм.

Перед измерением $D_{\text{вх}}$ и $d_{\text{вых}}$ окуляр следует установить на нуль диоптрий, а трубу отфокусировать на бесконечность.

3. Угол поля зрения 2ω трубы теодолита определяют как разность отсчетов по лимбу при наведении диаметральных краев поля зрения трубы на одну и ту же точку, расположенную на «бесконечности». Отсчеты выполняют с округлением до 1'.

4. Наименьшее расстояние s_{min} визирования зрительной трубы получают измерением рулеткой или нитяным дальнометром теодолита отрезка линии от вертикальной оси вращения теодолита до ближайшего к нему четко видимого в трубу предмета ($m_{s_{\text{min}}} \leq 0,1$ м).

5. Угловое расстояние β сетки между нитями вертикального биссектора вычисляют по разностям отсчетов горизонтального круга при последовательном наведении обеих нитей на четкую далеко расположенную визирную цель (т. е. труба должна быть наведена практически на «бесконечность»).

6. Коэффициент K нитяного дальномера определяют по формуле

$$K = \text{ctg } \psi, \quad (9.9)$$

где ψ — параллактический угол дальномера, измеряемый высокоточным коллиматором с ошибкой не более 1,5".

Допускается определять значение K в полевых условиях путем разбивки горизонтального базиса с помощью стальной ленты с последующим измерением отрезков базиса нитяным дальнометром по вертикальной рейке.

7. Предел разрешения зрительной трубы определяют по методике, изложенной в § 8.

Исследование инструментальных ошибок теодолитов

1. Изменения коллимационной ошибки C и места нуля MO (места зенита MZ) в зависимости от неправильного хода фокусирующей линзы зрительной трубы и внецентренности визирной оси. Изменения определяют по следующим формулам:

$$\Delta C_j = C_j - C_\infty, \\ \Delta MO = MO_j - MO_\infty,$$

где индексы при C и MO относятся к конечному (j) расстоянию до цели и к «бесконечности».

Для определения значений C и MO используют расстояние s , указанные ниже.

Типы теодолитов	T0,5 T1	T2, T5	T15, T30
Расстояние s , м	5, 10, ∞	2, 10, ∞	1,5; 5; 10; ∞

Визирные цели должны быть установлены на одной высоте в пределах $\pm 0,5^\circ$ с отклонениями от створа не более $\pm 3^\circ$.

Измерения производят в следующей последовательности:

а) наведение трубы на цели при круге лево и фокусировании трубы на каждую цель движением кольца фокусирующей линзы по ходу часовой стрелки, отсчитывание по кругу L_1 после каждого наведения;

б) то же, при фокусировании на цель движением кольца фокусирующей линзы против хода часовой стрелки и наблюдении визирных целей в обратной последовательности, сопровождаемой отсчетами L_2 круга;

в) перевод трубы через зенит, фокусировка трубы по подпункту «б», наблюдение визирных целей при круге право (отсчеты P_2);

г) выполнение операций при круге право по подпункту «а» (отсчеты P_1).

Описанные операции составляют одну серию определения значений C и MO ; таких серий должно быть выполнено не менее двух для теодолитов Т05, Т1 и Т2 и не менее четырех для теодолитов Т5, Т15 и Т30. Значения C и MO вычисляют по формулам, соответствующим тому или иному типу теодолита (см. §§ 51, 52).

Расхождения отдельных значений C и MO , относящихся к одним и тем же s , не должны быть более приведенных ниже.

Типы теодолитов	Т05,	Т1	Т2	Т5	Т15	Т30
Допустимые расхождения для C и MO , с	1,5	1,5	2,5	10	15	60

Правильность вращения алидады вокруг вертикальной оси определяют по отсчетам (L и P) шкалы уровня при алидаде горизонтального круга, если цена его деления не более $10''$ на 2 мм. В противном случае устанавливают дополнительный уровень, удовлетворяющий указанному условию (см. § 36).

2. Исследования влияния коллимационной ошибки и наклона оси вращения зрительной трубы. Коллимационная ошибка C возникает вследствие неперпендикулярности визирной оси трубы к горизонтальной оси вращения трубы tt_1 (рис. 140, а) и определяется при двух положениях круга (наведение при круге право — КП и круге лево — КЛ на одну и ту же точку M).

Обозначим через ε проекцию коллимационной ошибки C на плоскость лимба — отсчеты по лимбу будут в двух разных местах m_1 и m_2 . Из треугольников OMM_2 и Omm_2 найдем

$$\operatorname{tg} C = MM_2/OM, \quad \operatorname{tg} \varepsilon = mm_2/Om.$$

По построению $MM_2 = mm_2$, тогда

$$\operatorname{tg} C / \operatorname{tg} \varepsilon = Om/OM \approx C/\varepsilon.$$

Из треугольника $OM \cos v = Om/OM$, где v — угол наклона визирной оси. Следовательно,

$$\varepsilon = C / \cos v. \quad (9.10)$$

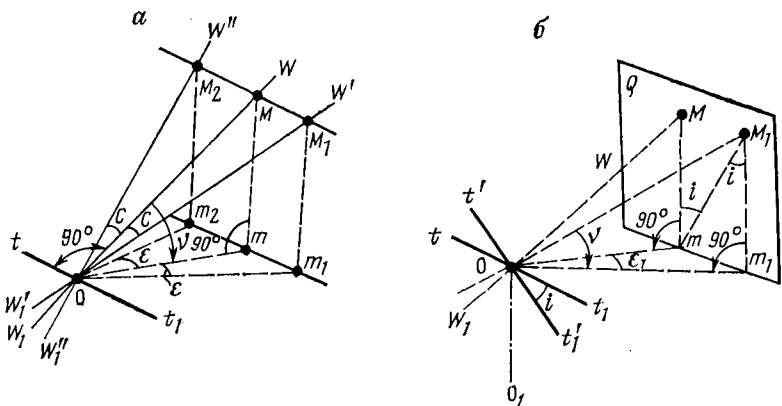


Рис. 140. Влияние коллимационной ошибки и наклона оси вращения зрительной трубы

Ошибка в угле, измеренном при одном положении круга, равна

$$\Delta C = C (1/\cos v_1 - 1/\cos v_2). \quad (9.11)$$

При $v_1 = v_2 = 0^\circ$ $\Delta C = 0$.

Значение ΔC , полученное при другом круге, будет иметь противоположный знак, поэтому среднее значение угла при двух кругах будет свободно от влияния коллимационной ошибки, пока C будет постоянной. Поэтому стремятся обеспечить равенство сторон, не меняя фокусировку трубы, чтобы сохранить $C = \text{const}$.

Наклон оси вращения зрительной трубы tt_1 возникает вследствие ее неперпендикулярности к вертикальной оси вращения теодолита OO_1 и ошибки установки последней в отвесное положение.

Если ось вращения трубы tt_1 не перпендикулярна к вертикальной оси OO_1 теодолита, то при отвесном положении последней коллимационная плоскость будет наклонена и в результатах измерения горизонтального угла появится ошибка ϵ_1 (рис. 140, б). На рис. 140: tt_1 — горизонтальное положение оси вращения зрительной трубы, $t't_1'$ — наклонное положение оси вращения зрительной трубы на угол i ; v — угол наклона визирной оси зрительной трубы к горизонту.

При горизонтальном положении оси tt_1 и угле наклона v визирная ось будет направлена на точку M , а точка m является ее горизонтальной проекцией. При наклонном положении $t't_1'$ труба будет наведена на точку M_1 , горизонтальной проекцией которой будет точка m_1 .

Из прямоугольных треугольников Omm_1 и M_1mm_1 найдем

$$\sin \epsilon_1 = mm_1/Om_1, \quad \text{tg } i = mm_1/M_1m_1,$$

откуда

$$\sin \varepsilon_1 / \operatorname{tg} i = M_1 m_1 / Om_1.$$

Из треугольника $OM_1 m_1$

$$\operatorname{tg} \nu = M_1 m_1 / Om_1.$$

Так как ε_1 и i малы, можно записать

$$\varepsilon_1 = i \operatorname{tg} \nu. \quad (9.12)$$

Ошибка в измерении угла Δi равна

$$\Delta i = i (\operatorname{tg} \nu_1 - \operatorname{tg} \nu_2). \quad (9.13)$$

Если $\nu_1 = \nu_2$, то $\Delta i = 0$, при $\nu_1 = -\nu_2$ $\Delta i = 2i \operatorname{tg} \nu$.

Например, при $\nu_1 = 6^\circ$, $\nu_2 = -6^\circ$, $i = 20''$

$$\Delta i = 2 \cdot 20 \cdot \operatorname{tg} 6^\circ = 4''.$$

Если ось вращения теодолита OO_1 отвесна, то среднее значение угла, полученного из двух полуприемов, будет свободно от этой ошибки.

Ошибка из-за наклона вертикальной оси вращения теодолита обусловлена неточной установкой теодолита по уровню на алидаде горизонтального круга. В горной местности для ослабления влияния этой ошибки необходимо тщательно нивелировать прибор.

При больших углах наклона линии визирования (например, при наблюдениях в астрономии) в отчет по горизонтальному кругу вводят поправку, вычисляемую по формуле

$$\Delta i' = i \operatorname{tg} \nu, \quad (9.14)$$

где i определяют при помощи точного накладного уровня.

Влияние наклона лимба возникает вследствие перпендикулярности плоскости нанесения штрихов лимба к вертикальной оси вращения теодолита. Наклон лимба к вертикальной оси вращения у оптических теодолитов обнаруживается по расфокусировке отчетного микроскопа на разных частях лимба при вращении верхней части теодолита. Простые рассуждения приводят к выводу, что значение угла будет свободно от влияния наклона лимба, если вертикальная ось теодолита установлена отвесно.

3. Определение средней квадратической ошибки совмещения штрихов лимба. Определение средней квадратической ошибки совмещения изображений противоположных штрихов лимба выполняется путем двойных измерений с последующим вычислением по формуле

$$m_{\text{совм}} = \sqrt{\frac{[d_i d_i]}{2n}}, \quad (9.15)$$

где d — разности отсчетов при двух совмещениях штрихов круга; n — число установок при перестановке круга через 15° , $n = 24$.

Если в разностях d содержится значительное остаточное систематическое влияние ($\Sigma d/n > 0,3''$), то вычисления производят по формуле

$$m_{\text{совм}} = \sqrt{\frac{[d'_i d'_i]}{2(n-1)}}, \quad (9.16)$$

где $d'_i = d_i - \frac{\Sigma d}{n}$.

Для теодолитов Т2, 2Т2 (ТБ-1, Theo-010) $m_{\text{совм}}$ для горизонтального круга не должна превышать $0,5''$, для вертикального круга — $0,6''$. С целью повышения качества наблюдений рекомендуется тщательно установить окуляр микроскопа по глазу наблюдателя и заканчивать совмещение штрихов верхнего и нижнего изображений вращением барабана оптического микрометра на ввинчивание. Грубыми следует считать результаты наблюдений, где разность $d_i > 2\sqrt{2}m_{\text{совм}}$, т. е. больше $2''$.

При определении средней квадратической ошибки совмещения штрихов вертикального круга у вышеназванных теодолитов наблюдения рекомендуется выполнять в секторе круга от 60 до 120° через каждые 5° .

4. Исследование рена шкалового микроскопа. В общем случае рен — несоответствие между действительной и номинальной ценой деления основной шкалы (круга).

Рен шкалового микроскопа — отклонение между действительной ценой деления горизонтального (вертикального) круга и определенной с помощью шкалового микроскопа.

Величину рена шкалового микроскопа вычисляют по формуле

$$r = \frac{1}{n} \sum_1^n (a - N), \quad (9.17)$$

где a — отсчет по шкале микроскопа при совмещении штриха круга со штрихом O шкалы; N — номинальное значение цены деления круга, равное $60'$; n — число установок.

Поправки за рен вычисляют по формуле

$$\delta_r = \frac{A}{N} r, \quad (9.18)$$

где A — отсчет по шкале микроскопа.

Рен шкалового микроскопа можно определить двумя способами. Первый способ состоит в непосредственном отсчитывании по шкаловому микроскопу относительно штриха $\varphi - 1^\circ$ лимба вблизи штриха 60 шкалы при совмещенных штрихах φ лимба и O шкалы.

Для определения другим способом необходимы образцовые приборы: коллиматор с окулярным микрометром либо высокоточный теодолит типа Т1. Зрительные трубы исследуемого тео-

долита и образцового прибора устанавливают на бесконечность и соосно объективами друг к другу. После совмещения штриха лимба со штрихом шкалы с помощью наводящих винтов делают отсчет a_1 по образцовому прибору, предварительно совместив сетки нитей обоих приборов. Аналогично получают отсчет a_2 после совмещения штриха $\varphi - 1^\circ$ лимба со штрихом 60 шкалы. Для каждой установки лимба вычисляют разность $(a_1 - a_2)$ отсчетов по образцовому прибору. Рен шкалового микроскопа определяют через 60° в прямом и обратном ходах, общее число установок 12, поэтому

$$r = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (a_1 - a_2)_i. \quad (9.19)$$

Этот способ позволяет определять значение r со средней квадратической ошибкой $1,0 - 2,0''$.

Пример определения рена шкалового микроскопа вертикального круга Т-15 в сравнении с эталонным прибором (Т05) приведен в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

φ	a_1	a_2	$a_1 - a_2$	φ	a_1	a_2	$a_1 - a_2$	Вычисления
354°	4,5"	1,0"	+3,5"	352°	12,2"	10,2"	+1,9"	$\Sigma v^2 = 159,74$ $\Sigma (a_1 - a_2) = +33,6''$
357	7,0	5,2	+1,8	355	8,0	5,4	+2,6	
9	5,4	2,1	+3,3	7	8,7	6,3	+2,4	
$r = +2,8''$			$\delta_r = +0,047''$			$m_r = 1,1''$		

5. Рен оптического микрометра теодолита Т2 (2Т2, ТБ-1, Theo-010). Рен оптического микрометра — разность между ценой деления лимба и величиной этого деления, измеренной микрометром.

При исследовании точных теодолитов с двусторонним оптическим микрометром установку алидады осуществляют последовательно по всему кругу по программе, указанной в инструкции по построению государственной геодезической сети СССР. Для теодолитов с ценой деления лимба $20'$ (Т2, 2Т2, ТБ-1, Theo-010) порядок установки алидады приведен в табл. 13.

На разных частях круга рен может быть различным из-за влияния эксцентриситета, ошибок делений круга и недостатков юстировки оптической системы отсчетного микроскопа. Оптические пути пучков лучей, проходящих через диаметрально противоположные штрихи лимба, различны; интервалы, видимые в нижней и верхней половинах большого окна поля зрения микроскопа, будут немного различаться, поэтому при исследованиях

определяют реи отдельно для верхнего и нижнего изображений штрихов лимба.

Согласно вышеприведенному определению можно записать

$$r_{\text{в}} = \frac{\lambda}{2} - n'_{\text{в}} \mu \quad \text{или} \quad r_{\text{в}} = \frac{\lambda}{2} - (b - a) \mu, \quad (9.20)$$

а для нижнего

$$r_{\text{н}} = \frac{\lambda}{2} - n'_{\text{н}} \mu \quad \text{или} \quad r_{\text{н}} = \frac{\lambda}{2} - (c - a) \mu, \quad (9.21)$$

где μ — цена деления оптического микрометра; λ — цена деления лимба ($\lambda = 20'$ для теодолитов типа Т2); $n'_{\text{в}}$ — число делений шкалы микрометра при измерении полуделения видимого

Т а б л и ц а 13

№ п/п	Установка в прямом ходе	№ п/п	Установка в обратном ходе
1	0°00'	16	22°20'
2	45 20	15	67 40
3	90 40	14	112 00
4	135 00	13	157 20
5	180 20	12	202 40
6	225 40	11	248 00
7	270 00	10	292 20
8	315 20	9	337 40

верхнего изображения лимба; $n'_{\text{н}}$ — то же, для нижнего изображения; a , b , c — отсчеты по шкале микрометра (рис. 141):

a — отсчет при совмещении штрихов A и $A + 180^\circ$; b — отсчет при совмещении штрихов $A - \lambda$ и $A + 180^\circ$; c — отсчет при совмещении штрихов A и $A + 180^\circ - \lambda$.

На каждой установке лимба выполняют следующие действия:

1. Вращением барабана устанавливают отсчет по шкале микрометра, равный $0'00''$ с отклонением $1-2''$.

2. Вращением ручки перестановки лимба совмещаются противоположные штрихи круга A и $A + 180^\circ$, где A — установка лимба согласно табл. 13.

3. Вращением наводящего винта алидады точно совмещаются штрихи круга A и $A + 180^\circ$.

4. Производится собственно измерение цены полуделения верхнего и нижнего изображений

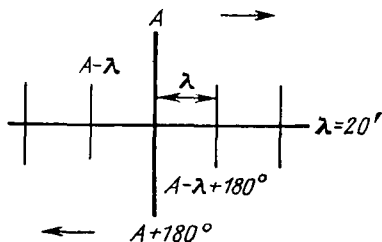


Рис. 141. Схема совмещения штрихов при исследовании реи оптического микрометра теодолита Т2

круга в делениях шкалы микрометра, для чего берутся отсчеты при двойных совмещениях соответствующих штрихов в положениях a, b, c , как указано выше.

При обработке результатов измерений сначала для каждой установки лимба вычисляют разности $(a_i - b_i)$ и $(a_i - c_i)$ — в прямом ходе, $(a'_i - b'_i)$ и $(a'_i - c'_i)$ — в обратном ходе, средние разности $(a_i - b_i)_{\text{ср}}$, $(a_i - c_i)_{\text{ср}}$, $(a'_i - b'_i)_{\text{ср}}$ и $(a'_i - c'_i)_{\text{ср}}$, затем средние значения $(a - b)_{\text{ср}}$ и $(a - c)_{\text{ср}}$ из прямого и обратного ходов. По вычисленным таким образом средним значениям всех наблюдений определяют рены верхнего $r_{\text{в}}$ и нижнего $r_{\text{н}}$ изображений, их разность Δr и средний рен r по формулам

$$r_{\text{в}} = (a - b) \mu + \frac{\lambda}{2}, \quad r_{\text{н}} = (a - c) \mu + \frac{\lambda}{2},$$

$$\Delta r = r_{\text{в}} - r_{\text{н}}, \quad r = 1/2 (r_{\text{в}} + r_{\text{н}}). \quad (9.22)$$

Значения среднего рена r и разности Δr не должны превышать установленных допусков (для Т2, 2Т2, ТБ-1, Theo-010 — 1" для горизонтального круга и 2" — для вертикального круга).

Если рен превышает допуск, в результаты измерений вводят поправки δ_i , определяемые по формуле

$$\delta_i = \frac{2r}{\lambda} N, \quad (9.23)$$

где r — среднее значение рена в секундах; λ — цена наименьшего деления лимба в секундах; N — отсчет по шкале оптического микрометра в секундах.

Значительная величина r или Δr (больше 3,5") свидетельствует о нарушениях оптических систем в микроскопах, вызванных, как правило, неаккуратной транспортировкой или небрежным обращением с прибором. Устранение рена является трудоемким делом. Юстировка выполняется в два приема: сначала устраняют Δr , а затем r .

Разность Δr устраняется перемещением линз моста круга, доступ к которым осуществляется через специальные люки, закрытые крышками. Перемещение обеих линз моста в одну сторону изменяет увеличение микроскопа только для нижнего изображения, но при этом нарушается фокусировка нижнего изображения. Четкость изображения восстанавливается перемещением только одной из этих линз, что снова может привести к появлению $\Delta r'$. Юстировка повторяется.

Средний рен r устраняется перемещением линз объектива круга (горизонтального или вертикального). Линзы объектива горизонтального круга находятся в колонке теодолита под крышкой, на которой нанесены марка и номер теодолита. Полезно помнить, что при положительном значении рена линзы приближают к плоскости круга (увеличение микроскопа ста-

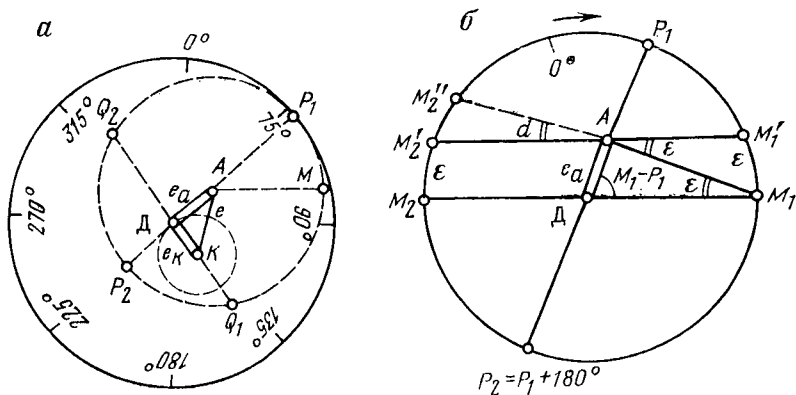


Рис. 142. Эксцентриситет алидады и лимба горизонтального круга

новится больше), если рен отрицательный, линзы удаляют от круга. После исправления рена линзы закрепляются.

6. Исследование эксцентриситета алидады и лимба горизонтального круга. Ось вращения A алидады (лимба), центр делений D лимба и ось вращения K горизонтального круга в теодолите должны совпадать. Несовпадение оси вращения алидады (лимба) с пересечением продолженных штрихов лимба называется эксцентриситетом алидады (лимба) (рис. 142, a). В современных точных оптических теодолитах линейный элемент эксцентриситета e , как правило, не превышает 5—10 мкм. При совмещении диаметрально противоположных штрихов влияние эксцентриситета на отсчет по кругу исключается, но значительная внецентренность может изменять величину рена на разных частях круга.

На рис. 142, b представлен общий случай, когда точки D и A не совпадают, а индекс в поле зрения микроскопа находится под углом α к диаметру совмещенных штрихов; разность отсчетов $v = M_2' - (M_1 + 180^\circ) = 2\varepsilon_i + \alpha$. В общем случае можно записать уравнение

$$\frac{\sin \varepsilon_i}{e} = \frac{\sin (M_i - P_i)}{R}, \quad (9.24)$$

где R — радиус круга.

Ввиду малости e $AM_i = r = DM$, тогда

$$\varepsilon_i = \frac{e}{R} (M_i - P_i). \quad (9.25)$$

Если $M_i - P_i = 90^\circ$, то

$$\varepsilon_{\max} = \frac{e}{r} \rho'' \quad \text{или} \quad e = \frac{\varepsilon_{\max} r}{\rho''}. \quad (9.26)$$

Таким образом, при исследовании эксцентриситета алидады горизонтального круга необходимо определить величины: α — постоянный угол, определяющий положение индекса по отношению к диаметру противоположных штрихов лимба; P — отсчет по лимбу, при котором влияние эксцентриситета на отсчет равно нулю; ϵ_{\max} — наибольшее влияние эксцентриситета на односторонний отсчет по лимбу; e — линейный элемент эксцентриситета.

Чтобы найти угловой элемент эксцентриситета ϵ_{\max} , требуется измерить разности $v_i = M_i' - M_i$ по всему кругу, равномерно переставляя алидаду через 30° . Здесь M_i' — односторонний отсчет по лимбу при совмещении штриха верхнего (нижнего) изображения с неподвижным индексом алидады (или со штрихом вертикального круга, при установке рукоятки переключателя круга под углом 45°); M_i — отсчет при совмещении диаметрально противоположных штрихов лимба, свободный от влияния эксцентриситета. Изменения разностей v_i будут характеризовать эксцентриситет алидады, так как $v_i = \epsilon_i + \alpha$, где α — постоянный угол, $\alpha = \sum v_i / n$, n — число установок лимба ($n = 12$ при перестановках через 30°).

Полная программа исследований эксцентриситета включает два хода: прямой ход $0, 30, \dots, 330^\circ$; обратный ход $330, 300, \dots, 0^\circ$.

При качественных наблюдениях колебания двух соседних величин v_i не должны превышать $15''$. Следует помнить, что при исследовании эксцентриситета алидады лимб остается неподвижным, а переставляется алидада; при исследовании эксцентриситета лимба последний переставляется (наблюдатель остается на месте — не перемещается у прибора).

Для отыскания величин P , d , ϵ_{\max} строится график (рис. 143). На графике по оси абсцисс откладываются установки лимба, а по оси ординат — значения v_i , полученные из наблюдений на каждой установке. Соединяя последовательно точки v_i в прямом ходе, получают ломаную линию прямого хода, такую же линию строят для обратного хода. Затем от руки проводят плавную сглаживающую кривую типа синусоиды, как среднюю между двумя ломаными линиями графика. Проводится ось симметрии синусоиды. На графике амплитуда синусоиды равна ϵ_{\max} (угловой элемент эксцентриситета), его величина не должна превосходить $20''$; отстояние оси симметрии синусоиды от оси абсцисс есть угол α . Пересечение восходящей ветви синусоиды с осью симметрии проектируется на ось абсцисс. Полученный отсчет по лимбу определяет односторонний отсчет P , при котором влияние эксцентриситета равно нулю, так же как и при отсчете по кругу, равном $P + 180^\circ$. Величина линейного элемента эксцентриситета определяется по формуле (9.26).

Кроме эксцентриситета алидады, в теодолите имеет место несовпадение оси вращения круга и центра делений круга, по-

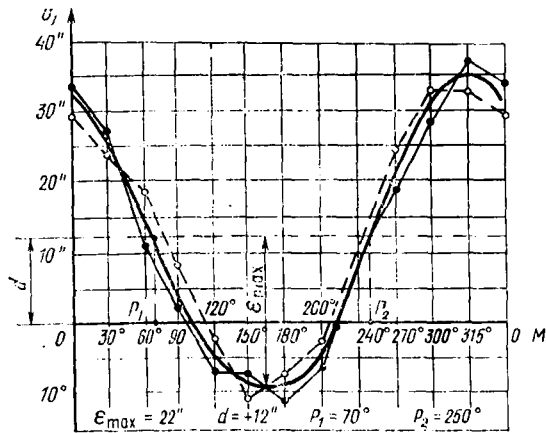


Рис. 143. График исследования эксцентриситета

этому суммарный допуск на величину углового элемента эксцентриситета

$$E_{\max} = \varepsilon_a + \varepsilon_l,$$

принимается $E_{\max} = 40''$. При исследовании эксцентриситета круга положение алидады остается неизменным, переставляется круг. Методика измерений и вычислений та же, что и для эксцентриситета алидады. Величина e_0 вычисляется по известным e_a , e_k , P_a и P_k :

$$e_0 = \sqrt{e_a^2 - 2e_a e_k \cos(P_a - P_k) + e_k^2}. \quad (9.27)$$

7. Определение эксцентриситета алидады и горизонтального круга теодолитов с односторонней системой отсчитывания. Для определения эксцентриситета ε_a алидады теодолит устанавливают на штативе, а вокруг него по окружности на расстоянии 30—50 м располагают 8 или 12 марок так, чтобы марки были примерно на одной высоте, а углы между ними были равны с точностью 2—3°.

После установки вертикальной оси в отвесное положение измеряют направление на марки в прямом направлении (вертикальный круг справа — КП) и в обратном (КЛ). В течение всех измерений горизонтальный круг должен оставаться неподвижным.

Далее вычисляют разности

$$v_i = \text{КП}_i - \text{КЛ}_i + 180^\circ.$$

По значениям v_i и величинам направлений на каждую марку строят график, проводят сглаживающую кривую и определяют элементы эксцентриситета так же, как и в теодолитах с двусторонней системой отсчитывания.

Эту же задачу можно решить аналитически. Для этого вначале надо решить уравнения

$$\left. \begin{aligned} y &= -2 \sum_{i=1}^{i=n} v_i \cos K\Pi_i/n; \\ x &= 2 \sum_{i=1}^{i=n} v_i \sin K\Pi_i/n, \end{aligned} \right\} \quad (9.28)$$

где n — число определявшихся направлений.

По Y и X вычисляют элементы эксцентриситета: направление эксцентриситета относительно нуля круга

$$\operatorname{tg} P_a = Y/X; \quad (9.29)$$

угловой элемент эксцентриситета

$$\epsilon_a = \pm \sqrt{X^2 + Y^2}/2; \quad (9.30)$$

линейный элемент эксцентриситета

$$e_a = \epsilon_a R / 2\rho, \quad (9.31)$$

где R — радиус круга.

Для определения эксцентриситета ϵ_k горизонтального круга по обе стороны от теодолита на одинаковом расстоянии (30—50 м) устанавливают две марки. Измеряют угол между этими марками при КП и КЛ с перестановкой горизонтального круга после каждого измерения на $360^\circ/n$ (обычно на 30 или 45°).

Используя полученные из измерений значения угла, составляют разности для каждой установки круга

$$v_i = \alpha_i - 180^\circ,$$

где α_i — величина измеренного угла.

Далее элементы эксцентриситета P_k , ϵ_k и e_k определяют так же, как и для алидады горизонтального круга. Эксцентриситет осевой системы определяют по ϵ_a и ϵ_k по формуле

$$\epsilon_{\text{осн}} = \sqrt{\epsilon_a^2 - 2\epsilon_a\epsilon_k \cos(P_a - P_k) + \epsilon_k^2}. \quad (9.32)$$

8. Эксцентриситет вертикального круга. Эксцентриситет вертикального круга является следствием несовпадения оси вращения трубы и центра делений вертикального круга и зависит не только от линейной величины эксцентриситета ϵ_v и его направления, но и от измеряемого вертикального угла α . Если отсчетывание производят по вертикальному кругу, то влияние эксцентриситета на угол α (измерения при одном положении круга) будет

$$\Delta\alpha'_e = \frac{\epsilon_v \rho}{R} \cos(\alpha - Q), \quad (9.33)$$

если отсчитывание производят по горизонтальному диаметру, то

$$\Delta\alpha'_e = \frac{\epsilon_{в\rho}}{R} \sin(\alpha - Q), \quad (9.34)$$

где R — радиус вертикального круга; Q — угол между направлениями эксцентриситета и визирной осью трубы; $\epsilon_{в}$ — линейная величина эксцентриситета. Значение угла, измеренного при двух положениях круга, не свободно от влияния эксцентриситета. Соответственно, для отсчитывания по вертикальному и горизонтальному диаметрам имеем

$$\Delta\alpha_e = \frac{\epsilon_{в\rho}}{R} \cos\alpha \cdot \cos Q, \quad (9.35)$$

$$\Delta\alpha_e = \frac{\epsilon_{в\rho}}{R} \cos\alpha \cdot \sin Q. \quad (9.36)$$

9. Определение ошибок диаметров лимба. Необходимость исследования ошибок диаметров лимба для теодолитов типа Т5, Т15 и Т30 возникает довольно редко, поэтому рассмотрим последовательность выполнения этого вида исследований для теодолитов типа Т2*. По результатам этих исследований можно судить о качестве нанесения штрихов лимба, периоде ошибок, что необходимо для построения оптимальной программы измерений. Ошибкой нанесения штрихов лимба называют отклонение действительного положения штрихов круга от номинального в угловой мере. У теодолитов типа Т2, как правило, определяют ошибки диаметров круга. Под ошибкой диаметров понимают полусумму ошибок положения штрихов, отстоящих один от другого на 180° . Полная ошибка диаметров кругов включает случайную и систематическую составляющие. Систематические ошибки носят периодический характер и подразделяются на длиннопериодические и короткопериодические.

Процесс исследования можно условно разделить на три этапа: 1) образование контрольного угла или нескольких контрольных углов; 2) измерение углов; 3) вычисление ошибок диаметров и оценка точности результатов.

Способы создания контрольного угла разнообразны; наибольшее распространение получили способы задания угла с помощью двух коллиматоров, располагаемых на одной высоте, и применение многогранной призмы, содержащей требуемый контрольный угол β . Призму закрепляют с помощью специального столика на верхней вращаемой части теодолита, а автоколлиматором фиксируют автоколлимационное изображение сетки от одной из граней многоугольника. Измерения выполняют методом калибровки или методом сличения. Подробное описание

* А. В. Рытов, А. И. Спиридонов. Геодезические приборы для крупномасштабных топографических съемок. М., Недра, 1977.

методов определения ошибок диаметров горизонтального круга приведено в ГОСТ 13424—68. Метод калибровки заключается в последовательном откладывании контрольного угла β на различных участках лимба от 0 до $180^\circ - \Delta\varphi$ через шаг $\Delta\varphi$. Измерения проводят рядами, число которых равно $\beta/\Delta\varphi$. Каждый ряд включает измерения на $180^\circ/\beta$ установках лимба, которые выполняют в прямом и обратном ходах. Для повышения точности используют сочетания результатов измерений двух или нескольких углов, подбираемых из соответствующих расчетов. Обработку измерений выполняют способом наименьших квадратов, способом Брунса, способом Елисеева, способом Вильда, способом Гейвелинка, способом Витоженца. Полные ошибки x_φ диаметров лимба у теодолитов типа Т2 определяют через интервал $\Delta\varphi = 5^\circ$. С этой целью на установках лимба $\varphi = 0, 5, \dots, 180^\circ$ измеряют по способу розетт два контрольных угла $\beta_1 = 40^\circ$ и $\beta_2 = 45^\circ$. Число розетт при измерении $\beta_1 = 40^\circ$ будет $K_1 = \frac{\beta_1}{2\Delta\varphi} = 4$. Установки φ при измерении $\beta_1 = 40^\circ$ будут (в каж-

дой розетте по $q_1 = 9$ установок, $q_1 = \frac{2\pi}{\beta_1} = \frac{2 \cdot 180^\circ}{\beta_1} = 9$):

1 розетта:	0, 40, 80,	320°;
2 розетта:	5, 45, 83,	325°;
3 розетта:	10, 50, 90,	330°;
4 розетта:	15, 55, 95,	335°.

При измерении $\beta_2 = 45^\circ$ $K_2 = \frac{\beta_2}{\Delta\varphi} = 9$, число установок в одной розетте $q_2 = \frac{180^\circ}{\beta_2} = 4$; установки имеют вид:

1 розетта:	0, 45, 90, 135°;
2 розетта:	5, 50, 95, 140°;
9 розетта:	40, 85, 130, 175°.

Измерения производят при одном положении круга в прямой и обратной последовательности:

Прямой ход	$\varphi_1, \varphi + \beta, \varphi + 2\beta, \dots, 180^\circ - \beta,$
Обратный ход	$180^\circ - \beta, 180^\circ - 2\beta, \dots, \varphi + \beta, \varphi.$

Если результат измерения B_1 в прямом ходе отличается от результата B_2 в обратном ходе не более, чем на $2,4''$, вычисляют $B_\varphi = \frac{1}{2}(B_1 + B_2)$.

Для каждой розетты подсчитывают среднюю величину угла

$$C_j = \frac{1}{q} \sum_1^q B_{\varphi_i} \quad (9.37)$$

и отклонения результатов измерений на установке φ_i от среднего для данной розетки

$$l_{\varphi_i} = B_{\varphi_i} - C_j, \quad (9.38)$$

где $i=1, 2, \dots, q; j=1, 2, \dots, k$.

Число значений l_{φ_i} должно быть равно числу исследуемых диаметров $n = 180^\circ/\varphi = 36$.

Общее число приемов измерений

$$z = 2(k_1q_1 + k_2q_2) = 144.$$

Значения l_{φ_i} , являющиеся свободными членами уравнений ошибок, используют для вычисления полных ошибок диаметров лимба x_φ .

Обработка измерений способом наименьших квадратов сводится к следующему: 1) проверка журналов; 2) вычисление свободных членов уравнений ошибок в виде отклонений измеренных углов на установках φ от среднего для j -го ряда измерений; 3) вычисление свободных членов нормальных уравнений по формуле

$$L_\varphi = l'_\varphi - l'_{\varphi+(180^\circ-\beta_1)} + l''_\varphi - l''_{\varphi+(180^\circ-\beta_2)}, \quad (9.39)$$

где l'_φ и l''_φ — свободные члены уравнений ошибок по результатам измерений контрольных углов β_1 и β_2 (при одном β_1 в правой части формулы остаются только два первых члена).

Ошибки диаметров вычисляют перемножением свободных членов нормальных уравнений на коэффициенты в соответствующих строках обратной матрицы:

$$x_\varphi = \sum f_{\varphi_{ik}} L_{\varphi_{ik}}, \quad (9.40)$$

где $f_{\varphi_{ik}}$ — коэффициент обратной матрицы в i -й строке и k -м столбце.

Ошибки определения значений x_φ можно рассчитать по формуле

$$m_{x_\varphi} = m_1 \sqrt{Q_{ii}}, \quad (9.41)$$

где Q_{ii} — обратный вес полной ошибки диаметров, принимаемый равным 0,37 при $\Delta\varphi = 5^\circ$;

$$m_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[dd]}{2n}},$$

где n — число исследуемых диаметров; $d = B_1 - B_2$.

Пример записи измерений в журнале исследования ошибок диаметров лимба приведен в табл. 14. Метод сличения ошибок диаметров в сравнении измеренных значений углов многогранной призмы между первой и i -й гранями с известными из аттестации величинами. Измерения проводят способом, аналогичным

измерению углов способом круговых приемов (см. ГОСТ 13424—68).

Поправки диаметров лимба с одинаковыми весами можно получить по способу Шрейбера. Этот способ основан на измерении углов между исследуемыми диаметрами лимба, взятыми во всех комбинациях попарно. Число комбинаций диаметров,

Т а б л и ц а 14

Дата: 10.05.83 г.

Теодолит: Т2 № 107125

Начало: 10—15

$T_H = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Конец: 10—45

$T_K = 20,7 \text{ } ^\circ\text{C}$

Отсчеты: в секундах

φ_i	Прямой ход				Обратный ход				d	B_{φ_i}	i_{φ_i}
	a_1	a_2	B'_1 B''_1	B_1	a_1	a_2	B'_2 B''_2	B_2			
90	14,2	19,6	05,4	05,7	16,2	23,3	07,1	06,9	-1,2	06,3	+0,7
	14,1	20,1	0,60		15,8	22,5	06,7				
				
140	15,0	22,6	07,6	07,2	15,0	20,4	05,4	06,2	+1,0	06,7	+1,1
	13,9	20,7	06,8		16,1	23,1	07,0				
$C_2 = 05,6$											0,0

а следовательно, и число углов, которые нужно измерить, определяется формулой

$$n = s(s-1)/2, \quad (9.42)$$

где s — число исследуемых диаметров.

Число постоянных углов определяется отношением $90^\circ/\sigma$, где σ — интервал между смежными исследуемыми диаметрами.

Вследствие громоздкости программы измерений способ Шрейбера применяется редко.

Способ Брунса имеет более простую программу. Из всех постоянных углов программы Шрейбера берутся лишь два-три угла, оказывающих наибольшее влияние на вес поправок диаметров. Например, при исследовании лимба через 5° вместо 18 постоянных углов используется только два угла.

В СССР в настоящее время находит применение способ С. В. Елисеева. Лимб исследуется через 1° , т. е. определяются поправки 180 диаметров. Программа измерений трех постоянных углов предусматривает 540 измерений углов.

Задачу выделения систематической части ошибок диаметров лимба можно решить, построив график полных поправок диаметров. По графику можно определить и период систематических ошибок.

Для уменьшения влияния систематических ошибок делений лимба на результат угловых измерений нужно иметь достаточное число приемов измерений, которые должны быть равномерно распределены в пределах полуокружности лимба.

Оценка надежности теодолитов

1. Надежность теодолитов характеризуют частотой отказов функционирования и отказов по параметру.

Отказы теодолитов выявляют путем испытаний на устойчивость к внешним воздействиям, создаваемым в камерах нагрева и охлаждения, на дождевальную и пылевую установки, на ударном стенде. Отказы функционирования приводят к невозможности измерений углов теодолитом.

2. Надежность работы теодолита в рабочем диапазоне температуры проверяют путем оценки технических характеристик прибора в камерах тепла и холода после его выдерживания в течение двух часов в режимах, указанных в табл. 15.

Отказами функционирования следует считать: затрудненную работу осей, тугой ход наводящих, подъемных винтов и других рабочих органов управления, изменение длины пузырька уровня до нерабочего состояния, ухудшение освещенности и загрязнение отсчетных шкал.

3. При испытании на пылепроницаемость теодолит помещают в герметичную камеру и обдувают просушенной пылевой смесью, содержащей 60—70 % песка, 15—20 % мела и 15—20 % каолина. Количество смеси должно составлять 0,1 % объема камеры. Размер частиц пылевой смеси не должен быть более 0,2 мм. Испытания производят в течение 1 ч при скорости воздушного потока не более 10—15 м/с. Отказом функционирования считают загрязнение шкал и поля зрения трубы, ухудшение освещенности, не позволяющие вести измерения углов.

4. Для испытаний на брызгозащищенность теодолиты в укладочных ящиках подвергают равномерному обрызгиванию водой в течение 1 ч с интенсивностью 5 мм в минуту при угле падения брызг примерно 45°. Температура воды и воздуха должна быть около 15±10°С. Попадание влаги внутрь прибора или футляра расценивается как отказ функционирования.

5. Испытания теодолитов на транспортную тряску проводят в соответствии с ГОСТ 13007—67.

Таблица 15

Типы теодолитов	Режимы, °С		
	1	2	3
T-05, T1	+20	-25	+50
T2, T5, T15, T30	+20	-40	+50

Типовые поверки теодолитов подробно изучаются студентами I и II курсов геодезических специальностей в курсе «Геодезия», их выполнение осваивается на лабораторных занятиях по курсу «Геодезия» и на летних учебных практиках, поэтому их рассмотрение в данном учебнике не представляется целесообразным.

§ 55. КОДОВЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

Наиболее перспективным направлением повышения производительности труда в топографо-геодезическом производстве является механизация и автоматизация измерительного процесса.

Механизация и автоматизация в геодезии является эффективной только в том случае, если она носит комплексный характер, т. е. включает весь измерительный процесс, обработку измерений и выдачу окончательной геодезической продукции (документацию). К сожалению, иногда ошибочно все надежды возлагаются на автоматизацию только камерально-вычислительных работ.

В настоящее время уже существуют приборы, представляющие результат измерений в такой форме, что их можно использовать прямо как входные данные в автоматизированную систему обработки данных и выдачи соответствующей геодезической документации. К такому типу геодезических приборов можно отнести кодовые теодолиты, в которых величина направления на цель фиксируется фоторегистрацией по специальным (кодовым) дискам (лимбам), а затем соответствующие величины, характеризующие данное направление на цель, переносятся преобразователями на перфоленгу и полученная информация обрабатывается в автоматических счетчиках.

В кодовых теодолитах наблюдатель осуществляет только визирование. Остальные операции автоматизированы. Однако следует отметить, что в последние годы появляются сообщения о таких системах, в которых выполняется и автоматическое слежение за целью, так что человек может выполнять только анализ и оценку [11].

В измерительных геодезических приборах оперируют числовыми отсчетами и поэтому в совокупности сигналов будут закодированы числа. Совокупности сигналов называются кодовыми знаками. Числовые коды можно реализовать на основе любой системы счисления и в соответствии с этим выделить соответствующий код. Числовые коды, как и системы счисления, можно разделить на символические и позиционные. Наиболее широкое распространение получил код, основанием которого является двоичная система счисления. Это объясняется тем, что двоичные цифры 0 и 1 можно легко реализовать физически: темно — светло, напряжение есть — нет и т. д. Для входящей и выходящей систем этот код не годится, так как мы привыкли выражать числа в десятичной системе счисления. Часто выгодным является двоично-десятичный код, заключающийся в коди-

ровании десятичных цифр двоичным кодом. Применяются и так называемые безопасные коды, в которых используется избыточная информация для контроля переданной информации (например, код «2 из 5», «5 из 10», «2 из 7»). Эти коды могут выявить, но не устранить ошибки. Для нахождения и исправления ошибок могут быть использованы сложные, так называемые корректирующие коды. При определении значения данного направления с помощью двоичной системы рабочая мера снабжается круговой или линейной системой концентрических круговых или параллельных прямых дорожек (каналов). Каждая дорожка выражает один разряд данного положения, причем внутри дорожки сигналы «да—нет» выражают величину соответствующего бита, т. е. для считывания используются кодовые деленные диски. При кодировании угол обозначается на лимбе сочетанием равных белых — прозрачных и черных — непрозрачных полос, соответствующих двум знакам двоичного кода (0 и 1). При просвечивании таких полей возникают только два сигнала, комбинации которых позволяют получить значение направления. Кодовое построение на лимбе позволяет обозначить направление с угловой ошибкой Δ . Эта ошибка определяется наименьшим интервалом деления окружности или ценой деления младшего разряда. В линейной мере интервал делений

$$\delta = \pi d/n,$$

где d — диаметр кольца кодовой дорожки.

Повышению разрешающей способности кодовых устройств способствует применение растровых построений, получивших название «муаровых».

Кодовые лимбы изготавливают на стеклянных дисках толщиной 6—8 мм, диаметром до 320 мм. При ширине кодовых дорожек 2 мм возможно нанесение кодовой маски из 16 разрядов с ценой деления младшего разряда 20".

Кодовый теодолит FLT3 фирмы «Феннель» является регистрирующим секундным теодолитом с кодированными данными разделенных дисков и предназначен для измерений в полигонометрии. Конструкция теодолита не позволяет визуально отсчитывать информацию, она фотографически регистрируется на 35-мм фотопленку, и затем ее изображение автоматически обрабатывается в вычислительном центре. Это имеет свои достоинства и недостатки.

Рабочий процесс с кодовым теодолитом складывается из двух принципиально разных частей.

Первая часть — полевые измерения, которые вследствие отсутствия визуального отсчитывания и записи менее трудоемки и значительно объективнее, чем процесс измерений с обычными теодолитами. Недостаток — исполнитель уходит с поля, не контролировав правильно измерения.

Вторая часть — электронная обработка измеренных величин — сложный, полностью запрограммированный процесс.

В СССР разработан фоторегистрирующий кодовый теодолит ТК*, отличающийся оригинальностью способа кодирования угловых величин и относительно низкой стоимостью. Кодовый теодолит ТК предназначен для измерения углов в теодолитных и тахеометрических ходах и при создании съемочных статей. Средняя квадратическая ошибка измерения угла одним приемом $15''$. В теодолите применены круги, на которых нанесены две штриховые кодовые дорожки — точного и грубого отсчета. На дорожке точного отсчета расположены 400 штрихов с интервалами в $1d$, а на дорожке грубого отсчета — 399 штрихов с интервалами $1d00^{\circ}25''$. Нулевые штрихи обеих дорожек расположены один над другим вдоль радиуса делительной окружности. Диаметрально противоположные штрихи при помощи оптического моста совмещаются. Совмещенные изображения рабочих участков круга с кодовой маской проецируются в фокальную плоскость фоторегистратора, в окне диафрагмы которого расположен масштабный элемент (тактовая дорожка), состоящий из чередующихся прозрачных и непрозрачных полос (в ТК их 400). Декодирование фотопленки с результатами измерений производится с использованием считывателя фильмов СФ-400 или вручную с помощью инструментального микроскопа. Масса прибора 8 кг. Применяется фотопленка типа «Микрат 300», размер фотокадра 12×12 мм, емкость кассеты 2,5 м.

В кодовом дальномерном теодолите фирмы «Керн» (Швейцария) имеется дальномерное устройство двойного изображения с параллактическим углом, складывающимся из постоянной части и переменной, определяемой поворотом оптических клиньев, поэтому в этом теодолите имеется большой информационный канал с цифровой и аналоговой записью параллактического угла.

Кодовый теодолит Ко-В1 фирмы «МОМ» (Венгрия) является секундным теодолитом. Измеренные им величины можно либо непосредственно перфорировать на ленту, либо зафиксировать в регистре, напечатать, либо передать в телеграфную сеть. Считывание обоих кругов производится автоматически. Средняя квадратическая ошибка однократно измеренного направления $0,7''$, вертикального угла — $1''$.

Увеличение зрительной трубы $36\times$ при $D_{вх}=55$ мм, масса теодолита 12,5 кг без транспортного ящика, общая масса всего комплекта с электронным блоком и штативом 49,7 кг.

§ 56. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

Использование лазеров позволяет заменить визирную ось оптических приборов видимым пучком световых лучей с определенными пространственно-временными и энергетическими па-

* В. Г. Шульц, А. И. Захаров. Кодовый теодолит ТК. — Сб. «Состояние и перспективы развития геодезической службы СССР», М., 1976, с. 192—194.

раметрами. Лазерные приборы и методы геодезических измерений в состоянии значительно упростить процесс геодезических работ, увеличить точность измерений, обеспечить автоматизацию измерительных процессов, свести съем необходимой информации непосредственно к объекту измерений. Последнее обстоятельство позволяет значительно увеличить производительность геодезических работ, а при инженерно-геодезическом обеспечении строительства сооружений ускорить темпы строительно-монтажных и пусконаладочных работ. Новые лазерные приборы не могут пока полностью заменить оптико-механические геодезические приборы, но дополняют их, расширяя круг решаемых геодезистами задач.

При создании лазерных геодезических приборов используются такие важные количественные и качественные особенности лазерного излучения, как большая спектральная яркость, узкая направленность, монохроматичность, пространственная и временная когерентность; лазерное излучение плоскополяризовано.

Конструкция и качество серийно выпускаемых лазеров непрерывно улучшаются. Если в 60-х годах срок их службы составлял 200 ч, то сегодня они уже могут работать 5000 ч и более.

В настоящее время разработаны и изготавливаются лазерные нивелиры, теодолиты, указатели направлений и т. п.

Лазерным называют теодолит, в котором параллельно визирной оси зрительной трубы или вдоль этой оси направлен узкий пучок лазерного излучения. Лазерные теодолиты можно классифицировать по конструктивным особенностям взаимосвязи лазерного излучателя с традиционными узлами серийных теодолитов.

Конструктивно лазерный теодолит представляет собой обычный теодолит, в котором зрительная труба заменена лазерным излучателем, имеющим возможность перевода через зенит. Габариты газовых лазеров часто превышают размеры зрительных труб, поэтому при использовании такого излучателя вместо перевода его через зенит обеспечивают перекладку горизонтальной оси вращения излучателя в лагерах.

Так, например, в лазерном теодолите ЛТ-75 применен лазер ЛГ-75 мощностью 30 мВт (использован теодолит ТТ 2"/6"). Лазерный излучатель съемный: на его место можно установить зрительную трубу теодолита ТТ 2"/6". Учитывая большую массу прибора, его можно использовать там, где требуется задать референтную прямую на большие расстояния, например, при производстве дноуглубительных работ, в гидротехническом строительстве для ограждения морских каналов и фарватеров, для производства промерных работ и т. п.

Лазерный теодолит ЛТ-56 имеет малогабаритный лазер ЛГ-56 мощностью 2 мВт, потребляемая мощность 60 Вт, может питаться от аккумулятора 12 В. Применяется для оперативных

разбивочных работ на строительных площадках, для контроля за движением проходческого щита при строительстве коллекторных тоннелей и т. п. Разработан на базе горного теодолита ТГ-1, излучатель переключается в лагерах [50].

Фирмой «Спектра-Физикс» (США) изготавливается лазерный теодолит ЛТЗ, коллиматор которого снабжен дополнительной насадкой с цилиндрической линзой, которая трансформирует луч в сектор плоскости. Диаметр лазерного пучка на выходе из коллиматора 16 мм, на расстоянии 300 м — 30 мм. При дальнейшем увеличении расстояния поперечное сечение увеличивается, достигая 125 мм на расстоянии 2000 мм. Прибор снабжен дополнительной ориентирной зрительной трубой с увеличением $10\times$ и соответствующими наводящими механизмами; к нему придается самостоятельное устройство — каретка для быстрой и точной установки в заданном створе.

Лазерные насадки к теодолитам конструктивно выполняют в виде съемных устройств. При этом сам теодолит не претерпевает каких-либо изменений.

В некоторых теодолитах насадку монтируют на зрительную трубу; в этом случае лазерный луч проходит параллельно визирной оси зрительной трубы теодолита. Такого типа насадки изготовлены для теодолитов «Вильд» Т1А, Т16, Т2 (Швейцария), «Слом СТМ» (Франция) и др.

Отечественная насадка ЛНОТ-02 выполнена по такому же принципу и рассчитана на эксплуатацию совместно с теодолитом ОТ-02. Источником света служит газовый лазер ЛГ-56; коллиматор представляет собой телескопическую систему с внутренней фокусировкой. Луч лазерной насадки проходит над визирной осью на расстоянии 10 см.

В ЦНИИГАиК разработана оригинальная схема лазерного теодолита (рис. 144), предназначенного для высокоточного обеспечения строительно-монтажных работ. Источник излучения (лазер 1) крепится на подставках теодолита таким образом, чтобы он не мешал вращению трубы на 360° . Лазерный луч системой зеркал 2, 4, 5, 7 и линзами 6 вводится в автоколлимационный

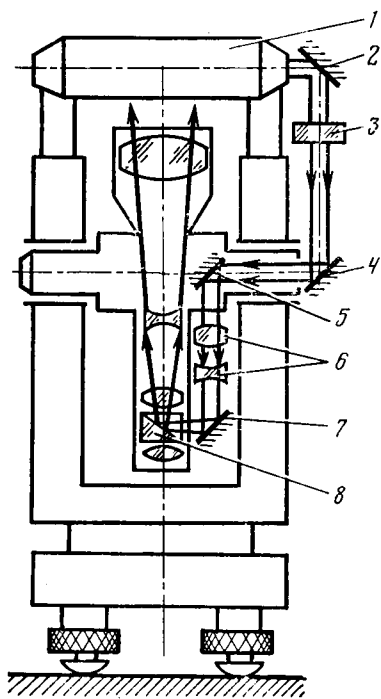


Рис. 144. Лазерный теодолит ЦНИИГАиК

окуляр Монченко 8 так, чтобы обеспечить засветку автоколлимационной сетки и вместе с тем использовать на передачу около 80 % площади объектива. Поляризационным фильтром 3 регулируется мощность светового пучка.

В приборе используется серийный теодолит Т2 и лазер ЛГ-66, который имеет достаточную мощность в одномодовом режиме. В разработанной конструкции прибор работает в трех режимах (визирном, проекционном и автоколлимационном) и сохранены все функциональные возможности прибора как теодолита.

§ 57. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ТЕОДОЛИТЫ АВТОНОМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

К методам автономного ориентирования можно отнести магнитный, астрономический, радиоастрономический и гироскопический методы.

Магнитный метод, т. е. ориентирование по магнитному меридиану с помощью буссоли, характеризуется невысокой точностью и обычно используется в качестве приближенного ориентирования.

Наиболее точным является астрономический метод, заключающийся в получении астрономического азимута на земной предмет на момент времени, когда измеряется горизонтальный угол между направлением на светило и ориентирным пунктом (ОРП). К недостаткам метода следует отнести его полную зависимость от метеорологических условий.

Определение азимута радиоастрономическим методом принципиально не отличается от астрономического. Ось антенны радиотеодолита [21] направляется на центр радиоизлучения Солнца или звезд, замеряются на данный момент времени высота или часовой угол светила и горизонтальный угол между направлением на светило и ОРП. Азимуты ориентирного направления вычисляются так же, как это делается в астрономическом методе. Использование данного метода не зависит от метеорологических условий. В настоящее время можно говорить лишь о принципиальной возможности ориентирования этим методом.

Задача автономного ориентирования, с достаточной для многих работ точностью (5—60"), успешно решается гироскопическим методом. Этот метод позволяет выполнить ориентирование в краткие сроки, независимо от времени года и суток, метеорологических условий и наличия исходной сети. Метод может использоваться как на земной поверхности, так и под землей.

Приборами, позволяющими реализовать данный метод, являются гиротеодолиты, гироскопы, гироскопы, гироскопы. Они образуют отдельную группу приборов геодезического назначения — гироскопические приборы для определения направления истинного меридиана.

В основе действия этих приборов лежит роторный гироскоп с тремя или двумя степенями свободы, используемый в качестве датчика направления.

Можно выделить два основных принципа построения схем гиротеодолитов:

1. Использование трехстепенного гироскопа и свойств вертикали места.

2. Использование реакции двухстепенного гироскопа на угловую скорость вращения Земли.

Наибольшее практическое применение при конструировании гиротеодолитов, особенно высокоточных, находит трехстепенной маятниковый гироскоп. Ось вращения ротора такого гироскопа расположена горизонтально, а центр тяжести смещен вниз относительно точки подвеса O (рис. 145), что является признаком физического маятника, главным свойством которого является слежение за вертикалью места.

В маятниковом гироскопе ротор может без всякого ограничения вращаться вокруг осей X и Z . Свобода вращения вокруг оси Y частично ограничена сопротивлением груза, поэтому иногда говорят, что маятниковый гироскоп имеет 2,5 степени свободы.

Благодаря ограничению одной степени свободы маятниковый гироскоп приобретает ориентирующее свойство, т. е. способность указывать направление меридиана. Практически оно проявляется в том, что главная ось гироскопа (ось вращения ротора) совершает относительно меридиана симметричные колебания. Северный конец главной оси при этом описывает в плоскости, параллельной плоскости первого вертикала точки стояния прибора, сильно вытянутый эллипс с малой осью, лежащей в плоскости меридиана (рис. 146).

Рассмотрим физическую сущность этого явления.

Угловая скорость суточного вращения Земли Ω может быть разложена на две составляющие: горизонтальную ω_r и вертикальную ω_b ;

$$\left. \begin{aligned} \omega_r &= \Omega \cos \varphi; \\ \omega_b &= \Omega \sin \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (9.43)$$

где φ — географическая широта точки земной поверхности.

Горизонтальная составляющая ω_r лежит в горизонтальной плоскости и указывает направление меридиана. Она зависит от угловой скорости вращения плоскости горизонта вокруг меридиана в данной точке. Наблюдателем, находящимся в этой точке, она воспринимается как изменение высоты Солнца и звезд над горизонтом, причем восточная часть плоскости горизонта всегда опускается.

Вертикальная составляющая ω_b направлена по вертикали места. Она показывает угловую скорость вращения плоскости горизонта вокруг отвесной линии в точке стояния наблюдателя и воспринимается им как изменение азимута небесных светил.

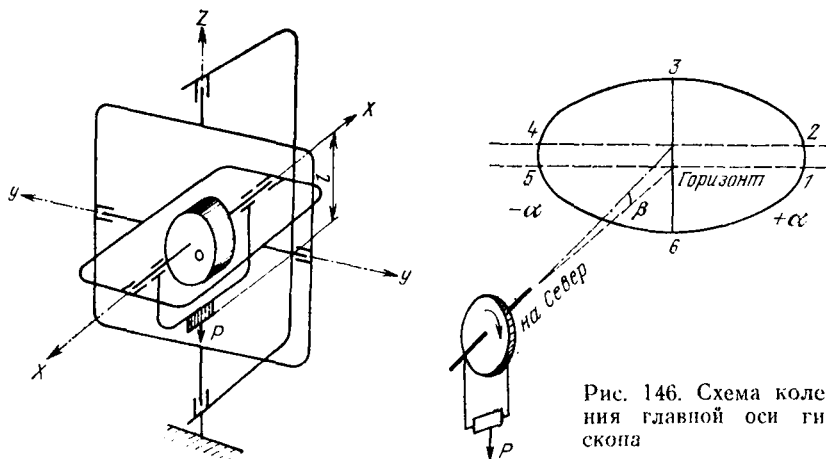


Рис. 145. Схема трехстепенного маятникового гироскопа

В свою очередь, горизонтальную составляющую суточного вращения Земли ω_{Γ} можно разложить на две составляющие: ω_1 — по направлению главной оси гироскопа (XX) и ω_2 — по направлению оси чувствительности (YY),

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \Omega \cos \varphi \cos \alpha, \\ \omega_2 &= \Omega \cos \varphi \sin \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (9.44)$$

где α — некоторый угол, который составляет с плоскостью меридиана главную ось маятникового гироскопа.

Составляющая ω_2 определяет угловую скорость вращения плоскости горизонта вокруг оси чувствительности (YY) и вызывает подъем северного конца оси гироскопа над плоскостью горизонта.

Составляющая ω_1 изменяет частоту вращения ротора гироскопа на очень малую величину и в нашем случае значения не имеет.

Пусть в начальный момент времени главная ось маятникового гироскопа занимает горизонтальное положение и отклонена к востоку от меридиана на угол α (точка 1, см. рис. 146). Так как Земля вращается, то северный конец оси гироскопа будет подниматься над горизонтом с угловой скоростью ω_2 . При этом центр тяжести смещается с вертикали, проходящей через точку подвеса, т. е. к главной оси гироскопа прикладывается внешний момент:

$$M = Pl \sin \beta, \quad (9.45)$$

где P — масса гироскопа; l — расстояние от точки подвеса до центра тяжести; β — угол подъема оси над плоскостью горизонта.

Под действием этого момента возникает прецессия главной оси гироскопа, ее северный конец начинает разворачиваться в сторону меридиана.

Величина угловой скорости прецессии ω находится в прямой зависимости от величины внешнего момента M :

$$\omega = \frac{M}{j\Omega} = \frac{Pl \sin \beta}{j\Omega}, \quad (9.46)$$

а следовательно, и от величины β .

Пока угол β мал, скорость прецессии не превосходит величины ω_v , поэтому, несмотря на прецессию оси к меридиану, угол между ними увеличивается (участок 1—2). Так продолжается до тех пор, пока β не будет равен некоторому β_0 , называемому компенсирующим углом. При $\beta = \beta_0$ $\omega = \omega_v$ и ось занимает неизменное положение относительно меридиана (точка 2). Однако подъем оси над горизонтом продолжается и ω становится больше ω_v . В результате ось начинает приближаться к меридиану, угол наклона ее к горизонту и угловая скорость прецессии ω продолжают возрастать (участок 2—3). В точке 3 главная ось гироскопа проходит плоскость меридиана, величины β и ω достигают максимума.

Пройдя плоскость меридиана, северный конец оси попадает в западную часть горизонта, где ω_2 имеет противоположное направление, поэтому угол наклона оси уменьшается и соответственно падает скорость прецессии (участок 3—4). В точке 4 $\beta = \beta_0$, а $\omega = \omega_2$, при этом ось достигает максимального отклонения от меридиана. При дальнейшем уменьшении β , а следовательно, и ω меридиан начинает «догонять» ось, поэтому угол отклонения ее от плоскости меридиана уменьшается (участок 4—5). В точке 5 $\omega = 0$, так как ось занимает горизонтальное положение.

Подъем западной половины горизонта продолжается, северный конец оси начинает уходить под плоскость горизонта. Возникает маятниковый момент обратного направления, вызывающий прецессию оси к меридиану с возрастающей скоростью ω . В точке 6 $\omega = \max$, $\beta = \max$. На участке 6—1 продолжается прецессирование с убывающей угловой скоростью ω . Это объясняется уменьшением маятникового момента по мере опускания восточной половины горизонта и соответствующего уменьшения угла наклона оси.

Прецессия на восток продолжается, пока ось не окажется в исходном положении (точка 1, см. рис. 146), после чего весь процесс повторяется.

Строгое математическое описание движения оси маятникового гироскопа можно получить на основе динамических уравнений Эйлера, известных из курса теоретической механики.

Рассмотренное движение оси справедливо для идеального маятникового гироскопа. У реального прибора всегда присут-

ствуют вредные моменты, которые вносят демпфирование и создают асимметрию колебаний оси гироскопа. Траектория движения реального маятникового гироскопа показана на рис. 147.

Крайние точки траектории 1, 2, 3 и 4, расположенные на большой оси эллипса, называются точками реверсии. Скорость прецессии в этих точках равна нулю. Если спроектировать эти точки на угломерный круг, то получим отсчеты n_1, n_2, n_3, n_4 , по которым можно вычислить отсчет по кругу, соответствующий направлению истинного меридиана.

Если объединить гироскоп с угломерным устройством, по которому будем брать отсчеты в моменты реверсий и производить визирование на земной предмет для передачи азимута, то получим новый прибор, который называют гиротеодолитом или гироскомпасом.

Данные термины равнозначны, их различие имеет ведомственный характер и не связано с точностью прибора.

Имея отсчеты n_1, n_2, n_3, n_4 , находят отсчет $N_{\text{ср}}$, соответствующий положению динамического равновесия чувствительного элемента (ЧЭ):

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_2 + n_3}{2} \right); \\ N_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{n_2 + n_3}{2} + \frac{n_3 + n_4}{2} \right); \\ N_{\text{ср}} &= \frac{1}{2} (N_1 + N_2). \end{aligned} \right\} \quad (9.47)$$

В реальных системах окончательное значение положения динамического равновесия вынужденных колебаний ЧЭ равно

$$N_0 = N_{\text{ср}} + \Delta N, \quad (9.48)$$

где $\Delta N = A_0 \cdot C$ — поправка за нуль-пункт.

Величина C называется широтным коэффициентом гиротеодолита, обычно указывается в паспорте прибора. При высокоточных работах широтный коэффициент определяется из специальных исследований.

Величину A_0 определяют из наблюдений точек реверсии свободных колебаний ЧЭ.

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_2 + a_3}{2} \right); \\ A_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_2 + a_3}{2} + \frac{a_3 + a_4}{2} \right); \\ A_0 &= \frac{1}{2} (A_1 + A_2). \end{aligned} \right\} \quad (9.49)$$

По конструктивным соображениям отсчетное устройство располагают под некоторым углом Δ по отношению к оси

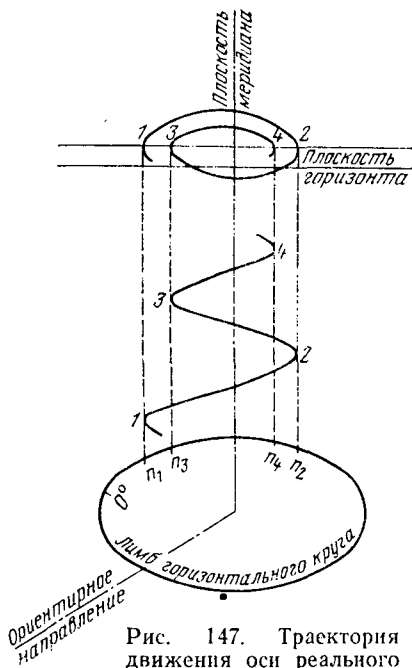


Рис. 147. Траектория движения оси реального маятникового гироскопа

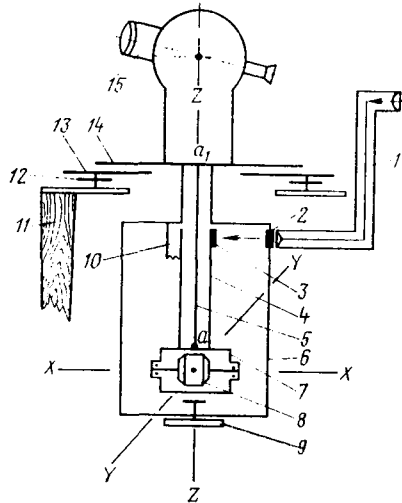


Рис. 148. Принципиальная схема гиротеодолита с торсионным подвесом

вращения ротора гироскопа, тогда место севера (MC) на горизонтальном круге можно определить по формуле

$$MC = N_0 - \Delta, \quad (9.50)$$

где Δ — постоянная поправка гиротеодолита, получаемая из эталонирования.

Астрономический азимут направления на ОРП можно определить по формуле

$$A = M - MC = M - N_0 + \Delta = a_{\text{гир}} + \Delta, \quad (9.51)$$

где M — отсчет по горизонтальному кругу при наведении трубы угломерного устройства на ОРП; $a_{\text{гир}}$ — гироскопический азимут ориентирного направления.

Азимуты, измеренные гиротеодолитами, будут астрономическими азимутами, отнесенными к мгновенному полюсу Земли.

Геодезический азимут A_g и дирекционный угол α определяются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_g &= a_{\text{гир}} + \Delta + \delta A; \\ \alpha &= a_{\text{гир}} + \Delta + \delta A - \gamma - \delta, \end{aligned} \right\} \quad (9.52)$$

где δA — поправка Лапласа, обычно находится по имеющимся на район работ схемам уклонений отвеса; γ — сближение меридианов в точке наблюдения; δ — поправка за приведение ори-

ентирного направления на плоскость проекции Гаусса (при длине стороны менее 1 км поправку можно не вводить).

Методика наблюдений при работе с гиротеодолитами во многом зависит от используемого прибора. Различают следующие основные способы: 1. Способ точек реверсии. 2. Амплитудные способы. 3. Способ прохождений.

Приведенные выше формулы для определения положения динамического равновесия ЧЭ относятся к способу точек реверсии.

Использование гироскопического метода ориентирования было бы невозможно без создания соответствующих приборов—гиротеодолитов.

Современный гиротеодолит представляет собой сложный оптико-механический и электронный прибор. Комплект такого прибора включает в себя гироблок, угломерную часть, блок питания и источник энергии.

Рассмотрим принципиальную схему гиротеодолита с торсионным подвесом (рис. 148). Буквами XX , YY , ZZ на рисунке соответственно показаны главная ось гироскопа, ось чувствительности и ось прецессии; a_1 — место крепления верхнего зажима торсиона; a — место крепления нижнего зажима торсиона.

Гиротеодолит состоит из угломерной части 15 и гироблока 6.

Угломерная часть, как правило, создается на базе серийных оптических теодолитов с некоторыми небольшими изменениями, связанными с необходимостью крепления гироблока и с устройством системы слежения за движением ЧЭ. Точность теодолита должна быть выше чувствительности гироблока и выбирается такой, чтобы ошибка угломерной части практически не влияла на точность определения азимута ориентирного направления.

Гироблок 6 состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), включающего гиромотор 8 в гирокамере 7 со штангой 4, подвешенных на торсионе 5, устройства арретирования 9, системы токоподвода 10 и корпуса гироблока с системой магнитной защиты.

Гиромотор 8 представляет собой в большинстве случаев трехфазный асинхронный двигатель, от стабильности его работы во многом зависит точность гиротеодолита.

Для уменьшения температурной разбалансировки ротора гиромотора гирокамеру 7 вакуумируют, это позволяет уменьшить нагрев гиромотора во время работы. Иногда гирокамеру заполняют гелием или водородом, которые обладают высокой теплопроводностью, что способствует быстрому отводу тепла от гиромотора.

Торсион 5, на котором подвешен ЧЭ, представляет собой металлическую ленточку с малой площадью поперечного сечения. Торсион должен обладать достаточной механической прочностью и малым моментом упругости. Поперечное сечение торсиона обычно прямоугольное, например $0,5 \times 0,05$ мм. Длина порядка 150 мм. В отдельных приборах находят применение сложные торсионы, состоящие из нескольких лент. К торсиону

предъявляется требование стабильности его упругих качеств в течение всего периода эксплуатации прибора.

Устройство арретирования 9 необходимо для надежного закрепления ЧЭ внутри гироблока в нерабочем состоянии. Для исключения случаев самопроизвольного разарретирования при транспортировке арретир обычно снабжается механизмом блокировки. Работа арретира должна быть плавной, без толчков и наклонов.

Токоподвод в гиротеодолитах с торсионным подвесом осуществляется, как правило, маломоментными токопроводами 10, представляющими собой тонкие металлические ленточки прямой, s-образной или спиральной формы.

Система магнитной защиты предохраняет ЧЭ от влияния внешних магнитных полей. Она представляет собой многослойный пермалловый экран, располагающийся на внутренней поверхности корпуса гироблока.

Гиротеодолит устанавливается на штативе 11. Подъемными винтами 12 лимб 13 приводится в горизонтальное положение.

Если при установившемся режиме работы гиromотора (~20 000 об/мин) разарретировать ЧЭ, то он начнет совершать гармонические колебания, закручивая торсион. Чтобы момент кручения не влиял на точность определения положения динамического равновесия, необходимо синхронно с движением ЧЭ поворачивать алидадную часть с укрепленным на ней верхним зажимом торсиона. Это так называемая ручная система слежения. В последних моделях гиротеодолитов применяется, главным образом, автоматическая следящая система, что освобождает наблюдателя от утомительного слежения за движением ЧЭ в период всего пуска.

Азимутальное положение ЧЭ определяется положением нормали к плоскому зеркалу 3, укрепленному на штанге ЧЭ и рассматриваемому на фоне шкалы 2. Его фиксация осуществляется автоколлимационным методом через ломаную трубу 1, жестко закрепленную с алидадной частью 14.

Моменты реверсии фиксируются через автоколлимационную трубу 1 и снимаются соответствующие им отсчеты по горизонтальному кругу.

В комплект прибора входят также источник питания, как правило, аккумуляторные батареи и блок питания, необходимый для преобразования постоянного тока батареи в переменный трехфазный ток с частотой 400—1000 Гц. Блоком питания осуществляется также стабилизация тока по напряжению и частоте, к которой предъявляются повышенные требования, так как асинхронные двигатели весьма чувствительны к изменению этих параметров.

У нас в стране пока нет закрепленной ГОСТом классификации гиротеодолитов по точности определения азимутов.

В венгерской классификации, которая получила распространение, имеется пять классов точности, указываемых буквой ла-

тинского алфавита в шифре прибора. По этой классификации высокоточные гиротеодолиты (литер А) должны обеспечивать определение азимутов одним пуском со средней квадратической ошибкой, не превышающей 5", точные (литер В) — 20", средней точности (литер С) — 40", малоточные (литер Д) — 1' и низкой точности (литер Е) — 3' [10].

В настоящее время имеется большое число различных моделей гиротеодолитов в разных странах. В СССР наибольшее применение нашли гиротеодолиты венгерского оптико-механического комбината (МОМ) Gi-B1 и Gi-B2.

Гиротеодолит Gi-B1 был разработан в 1962 г. в тесном сотрудничестве с советскими специалистами. Предназначен для автономного определения азимутов направлений как на земной поверхности, так и в шахте со средней квадратической ошибкой из одного пуска 15—20". Угломерная часть выполнена на базе односекундного теодолита Те-В1 (МОМ). Слежение за движением ЧЭ ручное. Электропитание осуществляется переменным трехфазным током напряжением $30 \text{ В} \pm 2 \text{ В}$ частотой 416 Гц. Время определения азимута ориентирного направления из одного пуска по полной программе наблюдений 40—50 мин. Масса гиротеодолита 21 кг, масса комплекта в рабочем состоянии (Gi-B1/Е), штатив с подставкой, установочное приспособление, комплект визирных целей, аккумуляторная батарея, соединительные кабели, секундомер, ЗИП, укладочные ящики.

Гиротеодолит Gi-B2 (рис. 149) представляет собой модернизированный вариант Gi-B1. Средняя квадратическая ошибка определения азимута направления одним пуском по полной программе наблюдений равна 10—15". Для слежения за движением ЧЭ применена фотоэлектрическая следящая система, обеспечивающая разворот места крепления торсиона вслед за ЧЭ.

Более усовершенствованным является гиротеодолит Gi-B3, серийно выпускаемый в настоящее время.

Наряду с указанными находят применение и другие гиротеодолиты и гиронасадки фирмы МОМ: Gi-D1 (средняя квадратическая ошибка 60"), Gi-D2

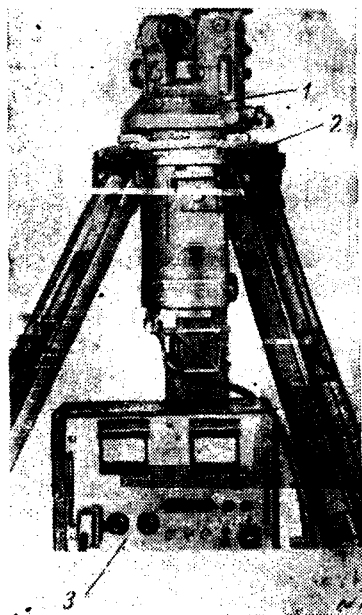


Рис. 149. Гиротеодолит Gi-B2:

1 — гиротеодолит; 2 — установочное приспособление на штативе; 3 — блок питания

(средняя квадратическая ошибка 20"), Gi-C1 (средняя квадратическая ошибка 30"), Gi-C2 (средняя квадратическая ошибка 20"), Gi-B21 (средняя квадратическая ошибка 5").

Первый отечественный гирокомпас М-1 был создан в 1950 г. Гирокомпас обеспечивал получение дирекционного угла со средней квадратической ошибкой 1—1,5'. Прибор был громоздкий и непродуцибельный (продолжительность определения азимута 5 ч). Комплект прибора размещался на специальной платформе, так как масса комплекта составляла 500 кг.

Прибор совершенствовался, и в последующие годы были созданы модели М-2, М-3, МУГ-2. Они, так же как и М-1, имели ЧЭ, погруженный в жидкость, центрирование электромагнитное.

В 1957 г. был создан гирокомпас МВ1. В нем впервые была применена цилиндрическая форма ЧЭ с жидкостным подвесом и центрированием на шпиле. Этим прибором можно было за один час определить азимут стороны со средней квадратической ошибкой 45". Масса комплекта 165 кг. Гирокомпас МВ1 был выполнен впервые в мировой практике во взрывобезопасном исполнении. Дальнейшим развитием этой модели явились гирокомпасы: МВ2 (средняя квадратическая ошибка 35"), МВ2М (средняя квадратическая ошибка 35", масса комплекта 55 кг), МВШЗ (средняя квадратическая ошибка 1,5', масса комплекта 34 кг).

В 1967 г. разработан гирокомпас МВТ2. ЧЭ этого гирокомпаса подвешен на торсионе в воздушной среде. Средняя квадратическая ошибка определения азимута стороны 20—30", продолжительность 20 мин. Масса комплекта 35 кг. Опыт эксплуатации этого прибора убедительно доказал его преимущества перед гирокомпасами с жидкостным подвесом.

В дальнейшем на базе МВТ2 был создан более совершенный гирокомпас МВТ4 (1970 г.). Средняя квадратическая ошибка определения азимута стороны 30", продолжительность 20 мин. Масса комплекта 28 кг. Отличительной особенностью прибора являются его компактность (гироблок, измерительный блок и блок питания объединены в одном приборе), а также наличие демпфирующего устройства, предназначенного для успокоения колебаний ЧЭ, вызванных действием на прибор ветра или вибрацией основания.

Гирокомпасы МВТ2 и МВТ4 широко используются маркшейдерской службой горной промышленности.

Большие работы по конструированию и созданию гиротеодолитов и гирокомпасов проводятся и в других странах. В первую очередь необходимо сказать о работах, проделанных по созданию гироскопических приборов геодезического назначения в ФРГ.

В конце 40-х годов здесь был разработан и построен первый прибор подобного типа — меридиануказатель MW1, выполненный на базе морского гирокомпаса «Аншютц». Дальнейшим раз-

витием этого прибора являются модели MW2, MW2B, MW3, MW4, MW4a. Эти приборы имели сферический ЧЭ с электромагнитным центрированием, были громоздки и непроезводительны. Так, MW2B обеспечивал точность определения азимута 60", время наблюдений составляло 4 ч, масса комплекта 640 кг.

Использование торсионного подвеса позволило уменьшить массу приборов и повысить их точность. Меридианоуказатель MW10 позволил определить азимут направления со средней квадратической ошибкой 20" за 45 мин при массе комплекта 75 кг (без источника питания и упаковочных ящиков). Прибор имел взрывобезопасное исполнение [41].

Меридианоуказатель MW50 построен по маятниковой схеме с торсионным подвесом ЧЭ. Конструктивная особенность — отсутствие маломоментных токопроводов к гиromотору, так как блок питания гиromотора помещен внутри ЧЭ. Отсутствие преобразователя тока повысило КПД системы почти в 10 раз.

Из других приборов группы меридианоуказателей можно назвать MW77, выпускаемый в настоящее время фирмой «Отто Феннель», и его усовершенствованный вариант «Гиromат».

В 1959 г. фирмой «Отто Феннель» стал выпускаться маркшейдерский гиротеодолит КТ-1 (средняя квадратическая ошибка 15", продолжительность 100 мин, масса 84 кг), а затем его модернизированный вариант КТ-2 (1966 г.). Из этой же серии можно назвать гиротеодолит КТ-1А (средняя квадратическая ошибка 20", продолжительность 150 мин, масса 70 кг), для которого не требовалось введения в результаты наблюдений инструментальной поправки, так как измерения выполнялись при двух положениях ротора [41].

Той же фирмой был сконструирован ряд образцов гироскопов к теодолитам: ТК-2, ТК-3, ТК-4, ТК-5 (средняя квадратическая ошибка 16", продолжительность 30 мин, масса 30 кг).

В США совместно с ФРГ был разработан гиротеодолит Lear LKM-604 (фирма «Лир-Зиглер», 1960 г.). Гиротеодолит имел автоматическую систему слежения за движением ЧЭ (точность отслеживания 1') и обеспечивал определение азимута стороны со средней квадратической ошибкой 10" за 45 мин. Масса прибора без источника питания и упаковки 32 кг.

Последние модели гиротеодолитов типа Lear выпускаются с автоматической системой ускоренного приведения оси гироскопа в плоскость меридиана. Эта система обеспечивает быстрое демпфирование колебаний ЧЭ путем приложения к нему демпфирующего момента, пропорционального скорости движения ЧЭ. Гиротеодолит ALINE (фирма «Лир-Зиглер») разработан в 1969 г. с использованием такой же системы. Для автоматической установки на север требуется 13—16 мин, общее время измерения составляет 20 мин, средняя квадратическая ошибка одного измерения по обычной методике 15", по более точной — 8".

Фирмой «Вильд» (Швейцария) выпускаются гиросприставка САК-1 (средняя квадратическая ошибка 30", продолжительность 20 мин, масса 30 кг) и гиротеодолит АРК-1.

Канадская фирма «Джимо» в 1975 г. модернизировала венгерский гиротеодолит Gi-B1 (Gi-B1A), автоматизировав снятие информации. Результаты измерений выдаются на цифropечатающее устройство [10].

В Японии фирмой «Сокиша» выпускается гиротеодолит GP1 (средняя квадратическая ошибка 20").

В настоящее время имеется большое разнообразие разработанных и выпускаемых гиротеодолитов. Максимальная точность, достигнутая современными приборами (определение азимута из одного пуска), равна 5". Применением соответствующих методик эту точность удается повысить до 3".

Интересны работы по созданию прибора, объединяющего гиротеодолит и лазерный дальномер. Следует указать на перспективность разработки гиротеодолитов с безроторными гироскопами: вибрационными, лазерными, ядерными и др.

Основными направлениями при конструировании гиротеодолитов остаются повышение их точности, снижение массы приборов, сокращение продолжительности измерений, а также их автоматизация.

Глава 10

НИВЕЛИРЫ

§ 58. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ТИПЫ НИВЕЛИРОВ

В развитии современных нивелиров, как и других геодезических приборов, в СССР и за рубежом наблюдаются следующие основные тенденции: сокращение количества типов, унификация отдельных узлов, выпуск приборов, имеющих зрительные трубы с прямым изображением.

Нивелиры с компенсаторами занимают доминирующее положение на производстве, особенно за рубежом. Вместе с тем зарубежными фирмами частично возобновляется выпуск нивелиров с уровнями там, где он был полностью прекращен. Все современные нивелиры с уровнями являются только глухими, с элевационными вшитами.

В СССР разработка и выпуск нивелиров определяются ГОСТ 10528—76. Этот комплексный ГОСТ устанавливает типы и основные параметры нивелиров, технические требования, методы испытаний, правила приемки, хранения приборов, их транспортировку и гарантийный срок.

В соответствии с ГОСТ 10528—76 в нашей стране предусматривается выпуск нивелиров высокоточных, точных и техни-

ческих и с уровнями, и с компенсаторами. В настоящее время отечественная промышленность изготавливает серийно высокоточный нивелир Н-05, точные нивелиры Н-3, НЗК и технические нивелиры 2Н-10Л и Н-10КЛ*.

Основные технические характеристики современных отечественных и отдельных типов зарубежных нивелиров, применяемых в СССР, приводятся в табл. 16.

§ 59. ВЫСОКОТОЧНЫЕ НИВЕЛИРЫ

Высокоточные нивелиры предназначены для нивелирования I и II классов и особо точных инженерных нивелирных работ. Средняя квадратическая ошибка суммы превышений на 1 км двойного хода, в соответствии с ГОСТ 10528—76, не должна превышать 0,5 мм. Такая высокая точность обеспечивается благодаря использованию точных контактных уровней с ценой деления 10" и порогом чувствительности 0,2" или компенсаторов с чувствительностью 0,2—0,3", зрительных труб с увеличением 40—45× и оптических микрометров с ценой деления 0,05 мм.

Нивелир Н-05 (рис. 150) с уровнем разработан в СССР в 1976—1978 гг. на базе нивелира Н2, выпускается серийно с 1979 г.

В нивелире Н-05 применена ахроматическая зрительная труба более мощная, чем в нивелире Н2. Рукоятки управления (фокусирования — 1, микрометра — 2, наведения — 3, элевационного винта — 4) расположены с одной стороны. Оптическая схема нивелира представлена на рис. 151. Визирный луч от рейки проходит съемную насадку 1, обеспечивающую визирование на 1 м, корректирующий клин 2 для юстировки угла i , плоскопараллельную пластинку 3, объектив 4, фокусирующую линзу 5. Телеобъектив строит изображение рейки в плоскости сетки нитей 8, которое рассматривается наблюдателем через окуляр 9.

Изображение концов пузырька уровня 17 передается лучами от зеркала 14 через защитное стекло 15, призмы 16, 18, 12, 10 и строится микрообъективом 11 в плоскости сетки 8.

Изображение шкалы 13 оптического микрометра передается через призму 6 и систему 7 также в пло-

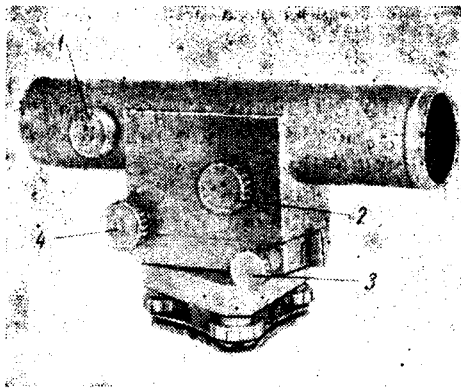


Рис. 150. Нивелир Н-05

* У нивелиров с компенсаторами и лимбами добавляются в шифре соответственно буквы «К» и «Л».

Технические характеристики	Нивелиры,						
	с уровнями						
	Н-1, СССР	Н-2, СССР	Н-05, СССР	Н-004, ГДР	Н-3, СССР	2Н-10Л, СССР	НЛ-3, СССР
Увеличение	46	40	42	44	30	23	31
Фокусное расстояние, мм	458	400	400		250	184	252
Предел разрешения, с		2,6	2,6	2	4	4,3	4,5
Угол поля:							
по вертикали	60'	55'	55'	60'	80'	1°30'	1°15'
по горизонтали	40	54	54	50	55		
Наименьшее расстояние визи- рования, м	4,2	2 и 1	2 и 1	3	2	1,5	2
Коэффициент светопропуска- ния, %		62	68		66	60	
Коэффициент светорассеяния, %		5,2	3,4		6	8	
Цена деления уровня:							
установочного, мин/2 мм	4	5	5	2	10	10	7—15
цилиндрического, с/2 мм	10	10	10	10	15	45	30
Диапазон действия компенса- тора, мин	—	—	—	—	—	—	—
Чувствительность компенса- тора, с	—	—	—	—	—	—	—
Недокомпенсация на 1 мин на- клона, с	—	—	—	—	—	—	—
Цена деления лимба	—	—	—	—	—	1°	—
Точность отсчета по лимбу	—	—	—	—	—	6'	—
Масса, кг	6,9	5,6	6,0	6,1	1,8	2,0	2,2
Средняя квадратическая ошиб- ка на 1 км двойного хода, мм	0,5	0,8	0,4	0,4	3	9	5

скость сетки нитей 8. Подробно схема устройства оптического микрометра и передача изображения шкалы показаны на рис. 152. Наклон плоскопараллельной пластинки 1 осуществляется до $17^{\circ}17'$ механизмом 3 через тягу 2. Вместе с тягой перемещается шкала 5, изображение которой передается на сетку 6 призмами 4, 7, 9 и строится микрообъективом 8. Отсчет по шкале производится по неподвижному индексу.

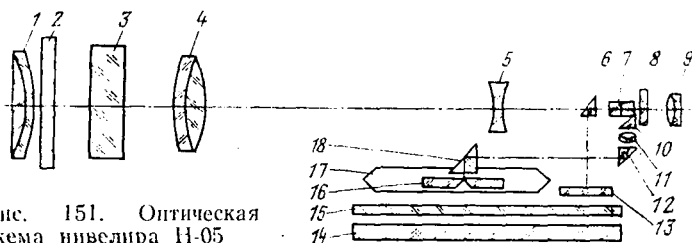


Рис. 151. Оптическая схема нивелира Н-05

страна-изготовитель								
с компенсаторами								
Ni-002, ГДР	Ni-A3, ВНР	Ni-007, ГДР	N-3K, СССР	HC4, СССР	Ni-025, ГДР	Ni-B6, ВНР	N-10KЛ, СССР	Ni-050 ГДР
40	30; 40; 50	31,5	30	30	25	28; 32	22	16—18
400	350		250	250			170	
2,4	2,2	3,5	4	4	3,5	3	4,5	
75'	64'	1°20'	1°20'	1°30'	1°40'	1°20'	1°20'	
45				1 30				
1,5	2	2,2	2	2	1,5	3	1,5	
40	40		68	45—50				
9	8—9		6	10				
8	5—6	8	10	15	8	8	10	25
—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	5—6	10	15	20—30	10		20	30
0,3	0,2	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	1	1
0,05	0,03—0,06		0,3	0,3				
—	—	1'	—	—	—	1	1°	1°
6,5	4,2	4,8	3	2—2,5	1,7	2,3	2	6'
0,2	0,3	0,8—2,0	3	3—4	2—3	2	9	1,0
								5

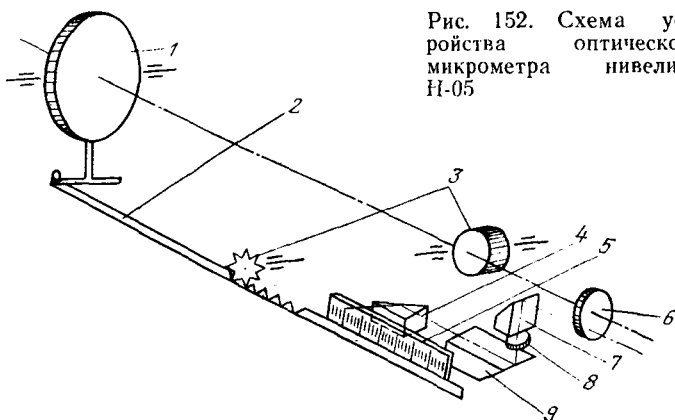


Рис. 152. Схема устройства оптического микрометра нивелира Н-05

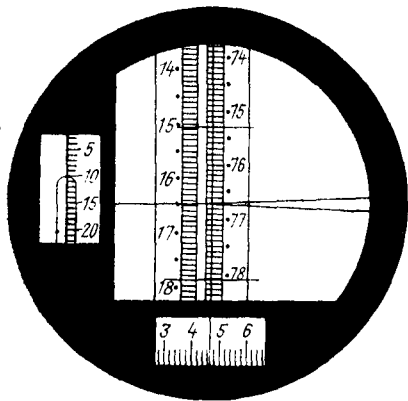


Рис. 153. Поле зрения трубы нивелира Н-05

Таким образом, в поле зрения трубы нивелира Н-05 (рис. 153) передаются изображения: рейки, концов пузырька цилиндрического контактного уровня с делениями ампулы и шкалы оптического микрометра. Все это, а также расположение рычагов управления в нивелире с одной стороны (справа от наблюдателя) создает определенные удобства при наблюдениях.

Проведенные исследования высокоточных нивелиров и производственный опыт их применения свидетельствуют о надежности конструкции и высокой точности приборов.

Нивелир Ni-002 с зеркальным компенсатором разработан и выпускается с 1974 г. в ГДР Народным предприятием «Карл Цейсс», Йена. Средняя квадратическая ошибка суммы превышений на 1 км двойного хода, проложенного нивелиром, составляет 0,2 мм.

На рис. 154 представлена оптическая схема зеркально-линзовой зрительной трубы, оптического микрометра и установочного уровня нивелира.

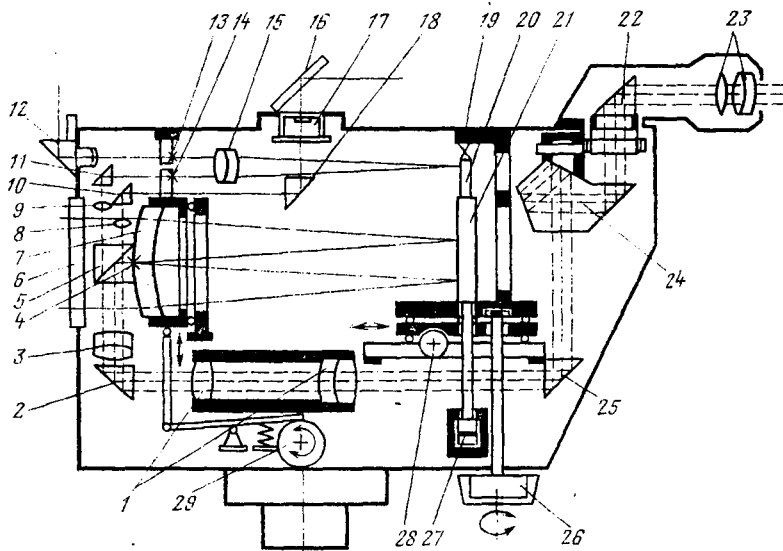


Рис. 154. Оптическая схема нивелира Ni-002

4 Объектив 7 зрительной трубы строит изображение предмета в плоскости сетки нитей 4, наклеенной на его внешней стороне, при этом пучок лучей отражается от качающегося поворотного зеркала 21 на подвеске 19, установленного от объектива на половине фокусного расстояния. Изображение рассматривается через вращающийся окуляр 23, систему призм 5, 2, 25, 24, 22, линзу 3 и телескопическую систему 1.

Зеркало 21, подвешенное к корпусу трубы, является основной подвижной частью компенсатора нивелира маятникового типа. Затухание колебаний зеркала-компенсатора осуществляется демпфером 27. Ошибки в юстировке компенсатора (в подвешивании зеркала) устраняются методикой измерений и вращением зеркала на 180° рукояткой 26. Например, если измерения по основным шкалам реек выполнить при первом положении зеркала, а измерения по дополнительным шкалам — при положении зеркала, повернутого на 180° , то средние превышения будут свободны от ошибок компенсатора. Кроме того, поворот зеркала на 180° позволяет не устанавливать тщательно на середину пузырек круглого уровня.

Фокусирование зрительной трубы нивелира осуществляется приближением или удалением зеркала 21 от объектива трубы вращением рукоятки винта 28, при этом имеется возможность для грубой и точной фокусировки.

Совмещение сетки нитей 4 с объективом 7 при наличии зеркала 21 исключает появление ошибок за перефокусировку трубы.

Точное измерение долей делений рейки в нивелире Ni-002 достигается оптическим микрометром оригинальной конструкции. Главной частью оптического микрометра является подвижный объектив трубы.

Перемещение в вертикальной плоскости (перпендикулярно к линии визирования) объектива 7 зрительной трубы вместе с сеткой нитей 4 и шкалой оптического микрометра 14 осуществляется вращением винта 29. Шкала микрометра 14 наглухо скреплена с объективом трубы и перемещается вместе с ним как единое целое. Световой луч, идущий через призму 12, неподвижный индекс 13, объектив микрометра 15, отражается от зеркала 20 (наглухо скрепленного с зеркалом 21 и вращающегося вместе с ним) и снова проходит через объектив 15, передавая изображение индекса на подвижную шкалу микрометра.

Так фиксируется отсчет по шкале микрометра, соответствующий доле деления рейки. Изображение шкалы и индекса рассматривается глазом наблюдателя через передающую оптическую систему 11, 9, 3, 2, 1, 25, 24, 22 и окуляр 23.

Диапазон действия микрометра равен 5 мм, т. е. 1 делению шкалы инварных реек. По особому заказу изготавливаются микрометры с диапазоном работы, равным 10 мм.

В нивелире Ni-002 аналитическая точка не лежит на оси вращения прибора, как это делается в обычных уровнежных

нивелирах, а совпадает с передней главной плоскостью объектива. Чтобы исключить из превышения ошибку за положение аналитической точки, которое изменяется с наклоном зрительной трубы, в конструкции Ni-002 смещается изображение индекса 13 относительно шкалы 14 автоматически через зеркало 20.

В поле зрения трубы нивелира, кроме изображения рейки, шкалы микрометра с индексом, передается изображение установочного (круглого) уровня. Луч света от зеркала 16 проходит через уровень 17, передающую систему 18, 10, 8, 3, 2, 1, 25, 24, 22 и окуляр 23.

Угол i в нивелире Ni-002 зависит от непараллельности отражающих плоскостей зеркала-компенсатора 21 и может быть уменьшен вращением специального клина b с малым преломляющим углом. Юстировочный клин b устанавливается перед объективом трубы в качестве защитного стекла.

Нанесение сетки нитей на объектив и практически малая возможность изменения взаимного положения отражающих поверхностей зеркала 21 гарантируют малую изменяемость угла i . Сама величина угла i составляет половину угла между отражающими гранями*, т. е. при выпуске с завода не превышает 3".

Конструкция высокоточного нивелира Ni-002 обеспечивает, наряду с высокой точностью, существенное повышение производительности труда.

§ 60. ТОЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НИВЕЛИРЫ

Точные нивелиры, предназначенные для определения превышений со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км двойного хода, являются наиболее распространенными из всех типов нивелиров.

Конструкции и оптические схемы точных нивелиров с уровнями (Н-3) и с компенсаторами (Н-ЗК) и им подобных приборов подробно описаны в учебнике по геодезии [35], в работах [17], [18], [25], [34], [42] и др., поэтому в данной книге приводить и описывать их нет необходимости.

Основные технические характеристики отечественных точных нивелиров Н-3, Н-ЗК, НС4 и наиболее распространенных в нашей стране зарубежных нивелиров Ni-007, Ni-025, Ni-B6 приведены в табл. 15.

В настоящее время известно много десятков точных компенсаторных нивелиров, число которых продолжает увеличиваться. Компенсаторы позволяют ускорить процесс наблюдений и повысить производительность труда в нивелировании III—IV классов на 15—25 %.

* По технологии изготовления зеркал угол непараллельности граней не превышает 6" [34].

Отметим, что наиболее перспективными конструкциями высокоточных и точных нивелиров с компенсаторами являются те, у которых максимально сближены между собой сетка нитей, объектив и ось вращения прибора. Тогда существенно уменьшается возможность появления всегда опасных ошибок за недокомпенсацию и изменение угла i в нивелире. В условиях точного нивелирования с повышенными вибрациями и интенсивным движением транспорта компенсаторные нивелиры уступают нивелирам с уровнями.

Технические нивелиры предназначены для определения превышений со средней квадратической ошибкой 10 мм на 1 км двойного хода или 15 мм на 1 км одинарного хода.

Нивелир 2Н-10Л выпускается взамен нивелира с шаровой пятой Н-10Л (НТ). Вместо шаровой пяты нивелир 2Н-10Л имеет обычные подъемные винты.

Оптическая схема нивелира (рис. 155) не отличается от предшествующих его моделей. Она включает оптическую схему зрительной трубы (объектив 1, фокусирующая линза 2, сетка нитей 3, окуляр 4) и передающую схему контактного уровня.

Особенность конструкции зрительной трубы заключается в том, что направляющие оправы фокусирующей линзы простираются на всю длину трубы, тем самым обеспечивается практическая неизменность положения визирной оси при перефокусировке трубы. Для технического нивелирования, где допускается значительное неравенство плеч, это очень важно.

Передающая система контактного уровня включает уровень 10, призмы 9, 8, 7, 5 и микрообъектив 6.

В поле зрения нивелира 2Н-10Л наблюдатель рассматривает изображение рейки и контактного уровня.

Нивелир Н-10КЛ — технический нивелир с компенсатором и лимбом разработан в СССР в начале 70-х годов и выпускается серийно.

Конструкция нивелира представлена на рис. 156. В зрительной трубе нивелира Н-10КЛ отсутствует фокусирующая линза,

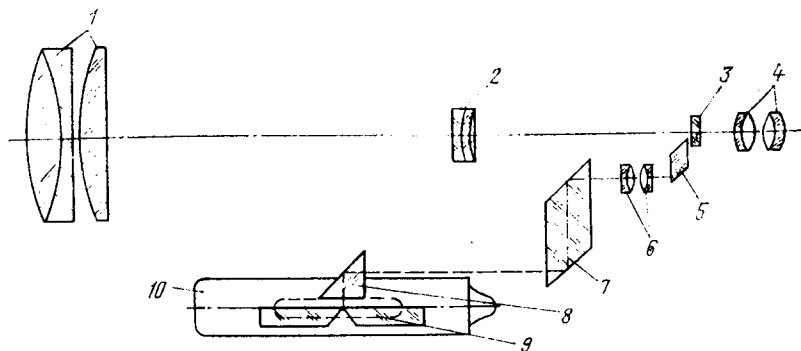


Рис. 155. Оптическая схема нивелира 2Н-10Л

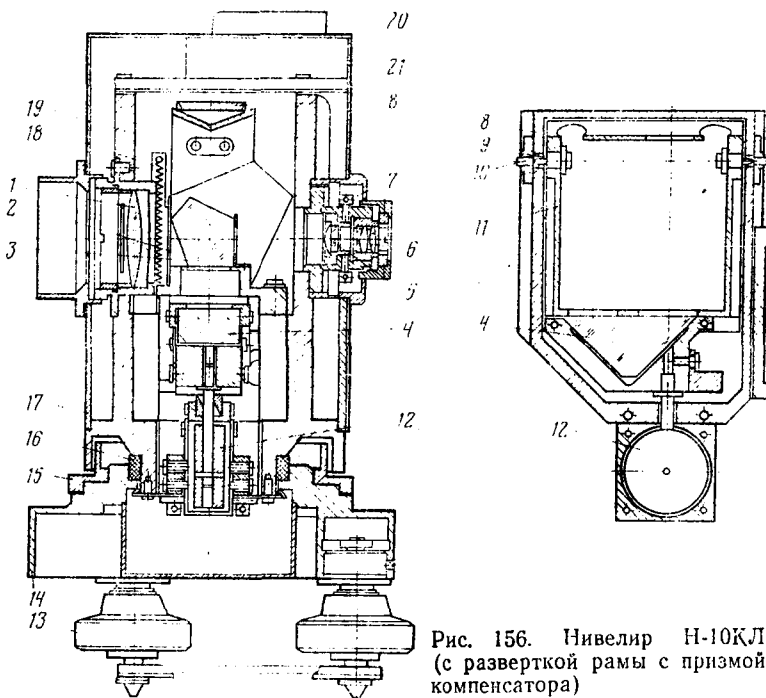


Рис. 156. Нивелир Н-10КЛ (с разверткой рамы с призмой компенсатора)

ее функции выполняет прямоугольная свободно подвешенная призма 4 — призма компенсатора маятникового типа. Призма 4 качается вместе с рамкой 11 на подшипниках 9 и оси 10 по направлению ее прямоугольного ребра. Затухание колебаний маятника обеспечивается воздушным демпфером 12. Неподвижной частью компенсатора являются две пентапризмы, скрепленные между собой общим основанием и наглухо установленные в корпусе прибора.

Как основной элемент фокусирующего устройства призма 4 перемещается вертикально по салазкам вместе с демпфером и рамкой 11 в общей раме 8 и удерживается в приданном положении пружиной 18.

При перефокусировке сохраняется постоянство оптических расстояний от задней главной точки объектива до призмы 4 (до точки *A* на рис. 157) и от перекрестия сетки нитей до призмы 4 (до точки *B* на рис. 157), тем самым обеспечивается неизменность положения визирной линии и не нарушается условие компенсации.

Оптическая схема зрительной трубы нивелира достаточно простая (рис. 157). Визирный луч от рейки проходит объектив 1, входную пентапризму 2, прямоугольную призму 4, выходную (малую) пентапризму 3 и достигает сетки нитей 5 с юстировочными винтами 7 (см. рис. 156). Ломаная зрительная труба

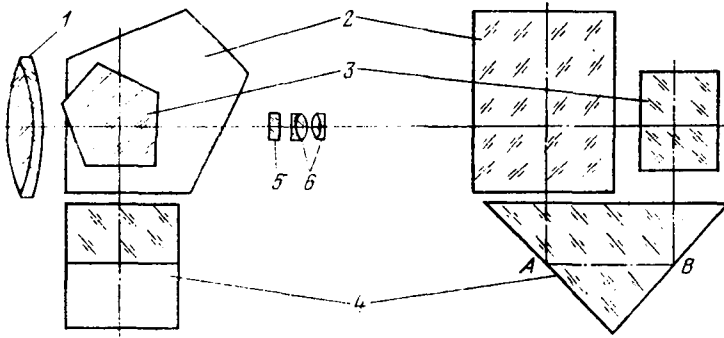


Рис. 157. Оптическая схема нивелира Н-10КЛ

72.17
29

нивелира Н-10КЛ обеспечивает земное изображение предметов, что достигается оборачивающей системой из двух пентапризм и прямоугольной призмы.

В нивелире имеются горизонтальный круг 15 (см. рис. 156) с ценой деления 1° , установочный круглый уровень 21 с зеркалом 20, подставка 14 с осью вращения 16 и подъемными винтами 13. Зрительная труба, корпус нивелира 19, все компоненты компенсатора и уровень заключены в специальный термоизоляционный кожух 17 и установлены на неподвижной подставке 14.

Подставка с лимбом и подъемными винтами крепится к штативу станovým винтом.

Юстировка положения оси круглого уровня в нивелире осуществляется обычными исправительными винтами уровня.

Разворот сетки устраняется вращением всей окулярной части 6 (см. рис. 156 и 157) после предварительного ослабления исправительных винтов.

Юстировка компенсатора может быть выполнена перемещением блока пентапризм вдоль линии визирования.

Нивелир Н-10КЛ с компенсатором маятникового типа на подшипниках является перспективным прибором. Такие компенсаторы обладают существенными достоинствами: надежностью и простотой конструкции при достаточной чувствительности, малыми габаритами, устойчивостью к колебаниям температуры и вибрациям, невысокой стоимостью и доступностью для ремонта.

§ 61. ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОВЕРКИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК НИВЕЛИРОВ

Исследования и поверки нивелиров определяются ГОСТ 10528—76, действующими инструкциями и наставлениями. Порядок производства проверок и исследований и их содержание

подробно рассматриваются в инструкциях, учебниках по геодезии и других работах, например, [15], [35], [37], [42]. Здесь ограничимся замечаниями по поверкам и исследованиям нивелиров.

В любом нивелире должно удовлетворяться главное условие — горизонтальность положения визирной линии в момент отсчета по рейке. Строгой горизонтальности положения визирной оси (линии визирования) или параллельности визирной оси и оси цилиндрического уровня практически добиться трудно по ряду причин, среди которых первостепенное значение имеет изменение температуры.

Известно также, что при нивелировании строго из середины не обязательно иметь $i=0$, достаточно, чтобы угол i был постоянным при визировании на заднюю и на переднюю рейки. Больше того, при постоянстве угла i устанавливаются допустимые величины неравенств плеч, поэтому в нормативных документах устанавливаются допустимые значения угла $i_{\text{доп}}$ и допустимые разности плеч на станции $(s_3 - s_n)_{\text{доп}}$, накопление их в секции и в ходе.

При заданной ошибке в превышениях $\Delta h_{\text{доп}}$ имеем

$$i_{\text{доп}} = \frac{\Delta h_{\text{доп}}}{(s_3 - s_n)_{\text{доп}}} \rho. \quad (10.1)$$

Расчет допустимой величины угла $i_{\text{доп}}$ выполним для высокоточного, точного и технического нивелиров.

Чтобы остаточное влияние угла i на превышения $\Delta h_{\text{доп}}$ было малым, примем $\Delta h_{\text{доп}}$ соответственно классам нивелирования равными: для I класса — 0,05 мм (цена деления оптического микрометра при $m_{\text{н.ст}} = 0,15 - 0,20$), для III класса — 0,5 мм (при $m_{\text{н.ст}} = 1,5$ мм) и для технического нивелирования — 1,5 мм при $m_{\text{н.ст}} = 4 - 5$ мм).

Принимая $(s_3 - s_n)_{\text{доп}}$ по нормативным документам равными соответственно: 0,5 м; 2 м; 10 м, получим: для высокоточного нивелира $i_{\text{доп}} = 20''$, для точного — $50''$, для технического — $30''$. Из расчетов следует, что в нивелировании III класса допуски на неравенство плеч на станции установлены излишне жесткие.

Если принять $i_{\text{доп. III кл.}} = 25''$, то вполне реально на станции допускать неравенство плеч не 2, а 4 м.

Установить угол i в пределах $20 - 30''$ при юстировке главного условия является не простым делом, так как при длине ампулы уровня, равной, например, 10 см, это соответствует перемещению одного из концов ампулы всего лишь на $10 - 15$ мкм — величины, граничащие с порогом чувствительности. Поэтому в инструкции по нивелированию предусматривается компенсация неравенств плеч в каждой секции и в ходе.

Чтобы величина угла i оставалась по возможности постоянной, ГОСТ устанавливает допустимые изменения угла i при изменении температуры на 1°C , равные, соответственно, типам

нивелиров: 0,5"; 0,8"; 1,5", принятые из опыта многочисленных исследований и практики нивелирования.

В высокоточных нивелирах с компенсаторами при значительных длинах зрительных труб возникает жесткое требование точной установки оси вращения нивелира в отвесное положение (до 0,4'), поэтому в конструкциях современных высокоточных нивелиров с компенсаторами стремятся максимально приблизить заднюю главную точку объектива к оси вращения нивелира. Тогда ошибки (2—3') в установке оси вращения нивелира по круглому уровню ($\tau=10'$) не вызовут ошибки в превышении за счет неравенства горизонтов инструмента при визировании на заднюю и переднюю рейки.

Высокая производительность труда и достаточная точность результатов нивелирования обеспечиваются, если в нивелире соблюдено правильное соотношение между увеличением зрительной трубы Γ и ценой деления уровня τ , равное

$$\Delta_{\text{гл}}/\Gamma = 0,15\tau, \quad (10.2)$$

где $\Delta_{\text{гл}}$ — разрешающая способность глаза; 0,15 τ — наименьший наклон оси уровня, при котором будет заметно смещение пузырька.

В современных зрительных трубах с просветленной оптикой, тонкими и четкими штрихами сетки нитей при отсчитывании по шашечной рейке можно принять $\Delta_{\text{гл}}=40''$, при методе совмещений $\Delta_{\text{гл}}=10''$.

Подставляя $\Delta_{\text{гл}}=40''$, для точных и технических нивелиров с неконтактными уровнями из уравнения (10.2) получим $\tau\Gamma=270$.

При наличии контактного уровня, имеющего чувствительность примерно в 2—3 раза выше и рассматриваемого под увеличением 2,5 \times , имеем $\tau\Gamma=1300$.

Для высокоточного нивелира ($\Delta_{\text{гл}}=10''$) получим

$$10/\Gamma = 0,03\tau \quad (10.3)$$

или

$$\Gamma\tau = 330. \quad (10.3')$$

При наличии контактного уровня, рассматриваемого без увеличения (через призму), для обычной шашечной рейки получим

$$40/\Gamma = 0,15\tau/2,5 \quad (10.4)$$

или

$$\tau\Gamma = 700. \quad (10.4')$$

Для нивелиров с компенсаторами справедливо потребовать, чтобы заметное в трубу смещение нити было равно чувствительности компенсатора $\Delta_{\text{к}}$, т. е.

$$\Delta_{\text{гл}}/\Gamma = \Delta_{\text{к}}. \quad (10.5)$$

Тогда для высокоточного нивелира с компенсатором ($\Gamma = 40-50\times$, $\Delta_{гд} = 10''$) получим необходимую чувствительность компенсатора, равную $\Delta_k = 10/50 = 0,2''$;
 для точного нивелира ($\Gamma = 30\times$, $\Delta_{гд} = 40''$) — $1,3''$;
 для технического нивелира ($\Gamma = 20\times$, $\Delta_{гд} = 40''$) — $2''$.

§ 62. НИВЕЛИРНЫЕ РЕЙКИ

В соответствии с действующим ГОСТ 11158—83 выпускают три типа реек: РН-05, РН-3 и РН-10. РН-05 — рейки нивелирные штриховые, трехметровые, с инварной полосой, имеющей основную и дополнительную шкалы с делениями 5 мм. Рейки РН-05 предназначены для нивелирования I и II классов. Рейки РН-3 и РН-10, соответственно, предназначены для нивелирования III и IV классов и технического. Они могут быть трех- или четырехметровыми, цельными или складными (в шифре складных реек добавляется буква «с»). Шашечные рейки РН-3 и РН-10 имеют сантиметровые деления.

Основные метрологические характеристики нивелирных реек по ГОСТ приводятся в табл. 17.

Т а б л и ц а 17

Метрологические характеристики реек

Характеристика	Нормальные величины для реек		
	РН-0,5	РН-3	РН-10
Допустимое отклонение от номинального значения длины наименьшего интервала, мм	$\pm 0,05$	$\pm 0,20$	$\pm 0,5$
Длина рейки, мм	3000	3000, 4000	4000
Допустимая разность между средней длиной метра пары реек комплекта, мм	0,15	0,8	1,5
Стрелка прогиба рейки на всю длину рейки, мм, не более	3	6	10

В работе [37] и в учебниках по геодезии приводится подробный перечень поверочных работ, указываются порядок и средства для проверок и исследований нивелирных реек.

Все типы реек подвергаются внешнему осмотру, определению нулей «пяток» реек, определению длины метровых и наименьших интервалов реек.

В качестве образцовой меры второго разряда, с которой производится непосредственное сличение (сравнение) шашечных реек, служат контрольные однометровые линейки, их длины должны быть известны с предельной ошибкой не более 0,015 мм. Длины инварных реек определяются на компараторах с более высокой точностью.

Лазерные нивелиры по праву занимают одно из ведущих мест среди геодезических лазерных приборов по массовости применения.

Можно выделить три вида лазерных нивелиров. Один из них — лазерные насадки на нивелиры уровенные и с компенсаторами угла наклона.

В другом виде лазер и зрительная труба располагаются в общем корпусе, при этом визирная ось трубы параллельна оси лазерного луча, но не совмещена с ней. Параллельное смещение визирной оси и оси светового пучка является одним из недостатков таких систем, так как необходимо учитывать и контролировать поправочные величины смещения, что приводит к появлению дополнительных ошибок.

В третьем виде приборов (приборы коллимационного типа) этот недостаток отсутствует. На рис. 158 приведен схематический чертеж лазерного нивелира, выпускаемого в ФРГ. Для наведения прибора на визирную цель в оптический канал вводится отклоняющее устройство, передающее изображение цели в поле зрения окуляра. Включение отклоняющего устройства осуществляется с помощью винта, находящегося в зацеплении с кареткой, на которой крепится блок отклоняющих призм. После визуального наблюдения на цель отклоняющее устройство выводится из оптического канала и луч лазера направляется объективом на цель. Для установки луча лазера в горизонтальное положение служит уровень.

Конструкция обладает достаточной мобильностью при создании визуального канала и необходимой опорной световой ли-

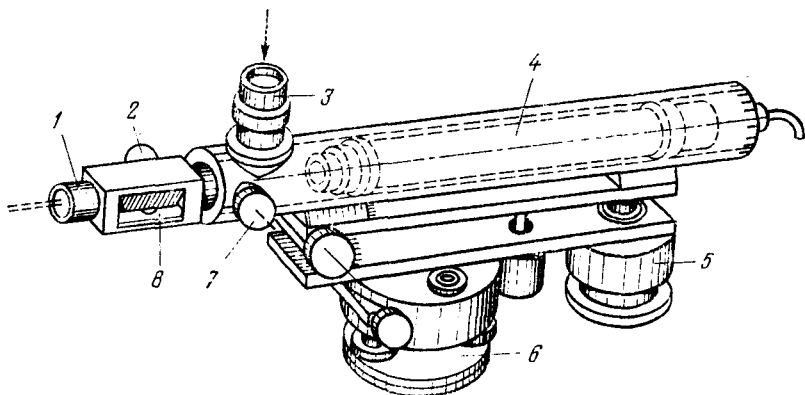


Рис. 158. Лазерный нивелир коллимационного типа:

1 — объектив коллиматора; 2 — головка винта фокусирующего устройства; 3 — окуляр; 4 — лазер; 5 — элевационное устройство; 6 — подставка с подъемными винтами; 7 — головка винта включения отклоняющего устройства; 8 — цилиндрический уровень

нии. В производственном варианте прибор снабжают рядом насадок, позволяющих направлять лазерный луч практически во всех направлениях.

Развитие лазерных измерительных средств выявило основной недостаток коллимационного метода — ограниченные возможности повышения точности измерений. В связи с этим стали разрабатываться разнообразные системы отсчитывания, позволяющие повысить точность измерений коллимационным методом. Среди них появились устройства, в которых стали совмещать коллимационный и автоколлимационный методы. Основой послужила высокая точность измерений, осуществляемых автоколлимационным методом.

Эти устройства различны по своему конструктивному строению. В качестве примера можно привести устройство, описанное в [45], схема которого показана на рис. 159. Газовый лазер 2 проектирует световой луч на отражатель 1, установленный в маятниковом подвесе с воздушным демпфером, что позволяет выдерживать плоскость отражателя 1 в вертикальном положении. Зеркала резонатора 5 пропускают часть отраженного от отражателя 1 света через лазер 2. Эта часть световой энергии попадает на фотоэлемент 4 и регистрируется прибором 3. Луч в горизонтальное положение устанавливают с помощью подъемных винтов лазера по максимальному сигналу, регистрируемому прибором 3.

Очевидно, что точность горизонтирования луча в данном случае зависит от точности приведения в вертикальное положение отражателя 1. При конструировании новых лазерных нивелиров находят применение явление поляризации лазерного луча. Использование естественной поляризации позволяет устранить влияние внешних условий освещенности, что в ряде случаев приводит к созданию помехоустойчивых измерительных систем. Действие таких устройств основано на том, что лазерный луч является линейно поляризованным.

Одним из направлений совершенствования лазерной геодезической техники является создание насадок на стандартные серийные образцы приборов. В этом случае возможны два конструктивных варианта: первый, когда носителем насадки служит визуальный геодезический оптический инструмент; второй, когда носителем оптической насадки является непосредственно лазер. Оба варианта в разрабатываемых приборах встречаются одинаково часто.

Недостатки первого варианта связаны с трудностями одновременного использования в процессе измерений визуального и лазерного каналов. Во втором — со сложностью обеспечения параллельности оси лазерного лучка и оптической оси визирной трубы. Одновременно эта система становится довольно громоздкой, так как неизбежно включает три элемента: лазер, оптическую коллимирующую насадку и наводящую зрительную трубу. В этом отношении первый вариант имеет преимущества,

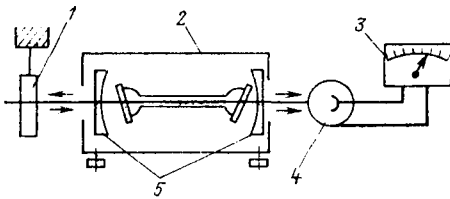


Рис. 159. Лазерный нивелир с зеркальным компенсатором

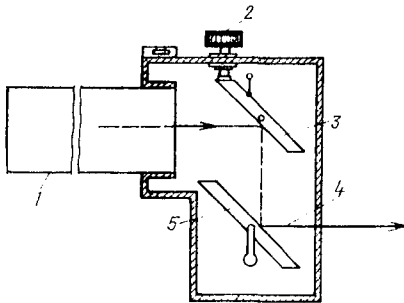


Рис. 160. Приставка для управления лазерным лучом

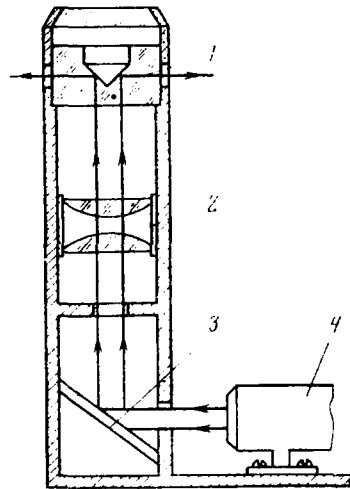


Рис. 161. Лазерный прибор с разверткой луча конической призмой

хотя и он требует точного совмещения осей лазерного пучка и зрительной трубы.

Так, например, приставка (рис. 160) позволяет осуществить управление лазерным лучом либо в другом варианте производить компенсацию угловых смещений прибора, т. е. задавать горизонтальное направление лучу.

Преимуществом этой приставки является то, что подвешенное качающееся зеркало 5, если смотреть от источника лазерного излучения 1, располагается по ходу луча после первого поворотного зеркала 3. В этом случае получают особенно простую реализацию требования, чтобы при наклоне всей приставки на угол α подвешенное зеркало для компенсации этого наклона повернулось на угол $\alpha/2$.

Необходимый наклон луча 4 можно непосредственно установить винтом 2, который проградуирован одновременно в градусах или уклонах (процентах).

Для развертки лазерного луча в плоскость нашли применение зеркальные и призмные сканирующие системы. Так, в устройствах лазерных нивелиров широко используется вращающаяся пентапризма, позволяющая получить лазерную плоскость. Системы с пентапризмой требуют большой точности исполнения, поэтому конструкторы не прекращают поисков новых систем развертки луча.

В этом отношении интересно устройство, в котором для развертки луча применяют коническую призму. При этом конструктивно призма может устанавливаться вне прибора, что исключает влияние ошибок, вызванных колебанием прибора и неточностью его установки.

Принцип работы прибора (рис. 161) состоит в следующем. Пучок света от лазера 4 поворотным зеркалом 3 направляется через блок линз 2 на коническую поверхность призмы 1, с помощью которой и создается лазерная плоскость.

Преимуществом данного устройства является отсутствие вращения деталей для создания световой плоскости и простота ее реализации. Существенный недостаток — довольно высокие требования к точности шлифовки конусной поверхности, в особенности в области, прилегающей к ее вершине, с тем, чтобы избежать значительных потерь энергии луча при отражении. Шлифовка указанной области призмы является трудоемкой и дорогостоящей.

При выполнении инженерно-геодезических работ возникает необходимость одновременного определения прямолинейности (соосности) и плоскостности технологического оборудования или строительно-монтажных конструкций. Кроме того, в ряде случаев полезно иметь одновременно и вертикальный луч для обеспечения поярусного строительства высотных сооружений, телебашен и т. п.

Принципиальная блок-схема такого прибора, условно названного «Лазерный горизонт» (ЛАГ), в модификациях ЛАГ-1, ЛАГ-2, ЛАГ-3 включает лазерный излучатель, оптическую систему, блок развертки лазерного луча в плоскость и визуальное или фотоэлектрическое регистрирующее устройство.

В одном из вариантов конструкции прибора ЛАГ, представленном на рис. 162, наряду с разверткой луча в плоскость *П* оптической системой 4 возможно формирование опорного горизонтального луча *Г* и вертикального луча *В* от одного и того же газового лазера типа ОКГ-13, ЛГ-56, ЛГ-78 и т. п. Оптическая система развертки представляет собой пентапризму с полупрозрачной верхней отражающей гранью, на которую наклеен оптический клин, дополняющий пентапризму по вертикали до плоскопараллельной пластины. Оптическая система 4 состоит из двух пентапризм, склеенных между собой по оси пучка и развернутых одна относительно другой на 180° .

Коллимирующая система состоит из двух зрительных труб 7 и 8, расположенных под углом 90° друг к другу, внутри которых предусмотрено светоделительное устройство 9 в виде кубпризмы или полупрозрачного зеркала. Вертикальная и горизонтальная зрительные трубы имеют общую сетку нитей и один общий окуляр 3, позволяющий рассматривать след лазерной плоскости и световое пятно опорного горизонтального луча. Для ослабления яркого фона, образующегося вследствие отражений от поверхностей элементов, передающих лазерный луч, оптиче-

ские каналы изолированы от визуальных приемных каналов с помощью трубчатых диафрагм. Лазер 12 однозначно устанавливается в переходнике 11 соосно с вертикальной осевой системой 10 подставки 1, на светоделительном устройстве со стороны окуляра визуальных трактов имеется круговая «светоловушка».

Юстировка достигается перемещением светоделительного устройства 9 юстировочными винтами (на рисунке не показаны) и всей коллимирующей системы элевационным винтом 2.

Опорный луч и лазерную плоскость приводят в горизонтальное положение (при этом луч B должен быть вертикальным) посредством двух цилиндрических контактных уровней от серийного нивелира НЗ, расположенных под углом 90° друг к другу и собранных в единый блок с общим окуляром. Нижняя часть прибора снабжена прецизионной осевой системой, к заплечикам цапфы которой крепится средняя часть, включающая блок уровней и коллимирующую оптическую систему. К корпусу коллимирующей системы прикреплена верхняя часть прибора — устройство развертки луча в плоскость, состоящее из оптической системы 4, осевой системы 6, гибкого привода 5 и электродвигателя постоянного тока на $6 \div 12$ В. Соответствующие юстировочные устройства коллимирующей системы, светоделительного блока и лазера позволяют после выполнения необходимых проверок добиться горизонтальности опорного луча Γ , параллельности плоскости развертки луча Π и горизонтального луча B в двух взаимно перпендикулярных направлениях, вертикальности луча B . Лазеры ЛГ-78, ОКГ-13 генерируют достаточно яркий луч в направлении,

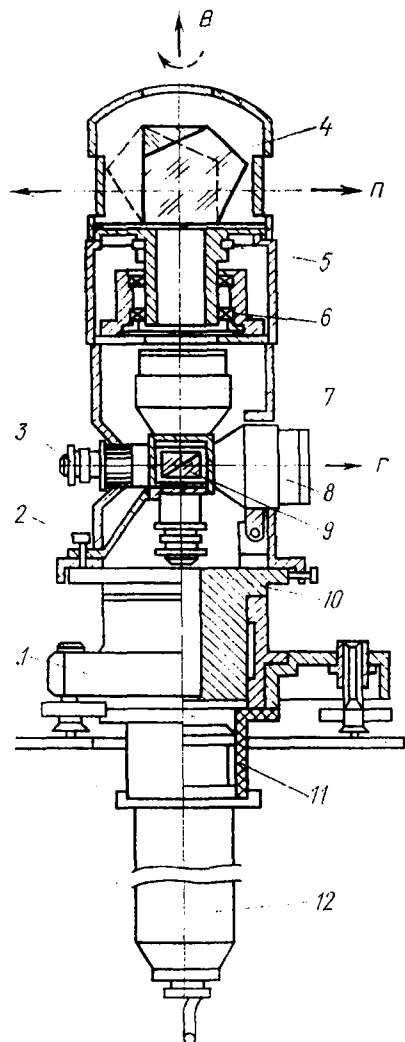


Рис. 162. Лазерный прибор многоцелевого назначения «ЛАГ»

противоположном основному лучу, что позволяет центрировать излучатель над заданной точкой. Это особенно важно при контроле прямолинейности и вертикальном проектировании.

Решение задачи полной автоматизации измерений приборными системами с уровнями затруднительно, поэтому в настоящее время разрабатываются конструкции приборов с самоустанавливающейся референтной плоскостью путем обеспечения самоустановки узла развертки луча, создания системы автоматического нивелирования прибора в целом или использования устройств для автоматического регулирования испускаемого лазерного луча.

Система автоматического нивелирования прибора в целом реализована в отечественном устройстве контроля плоскостности СКП-1, в котором излучатель с электрическим преобразователем подвешен на маятнике с двумя степенями свободы.

СКП-1 обеспечивает:

контроль планировки, выполняемой практически любым количеством машин (скреперов, грейдеров, планировщиков), работающих на площади радиусом до 500 м ($s=80$ га);

повышение производительности труда на 30 %;

возможность работы в любое время суток.

Система автоматического контроля состоит из трех функционально связанных между собой блоков: лазерного излучателя, неподвижно установленного в точке с известной высотной отметкой, фотоприемного устройства, закрепленного вертикально на строительной машине, и индикатора положения, установленного в кабине оператора машины.

Более точным является третий метод горизонтирования плоскости, основанный на применении серийных нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования. Примерами таких систем могут служить прибор КВ-6, насадка к нивелиру Ni-007 и др. Точность горизонтирования референтной плоскости достигает в угловой мере 0,3—0,5". Однако следует отметить, что подобные системы практически неприменимы при наличии вибраций.

§ 64. ПРИБОРЫ ГИДРОНИВЕЛИРОВАНИЯ

К этим приборам относят гидростатические, гидромеханические и гидродинамические нивелиры.

Гидростатические нивелиры применяют при высокоточном монтаже конструкций и наблюдениях за осадками. Работа их основана на свойстве жидкости устанавливаться в сообщающихся сосудах на одном уровне. Поверхность равновесного уровня жидкости можно принять в качестве поверхности относимости для контроля горизонтальности исследуемой плоскости или положения отдельных точек.

Приборы гидростатического нивелирования бывают переносными и стационарными. В переносных приборах наиболее ча-

сто применяют сообщающиеся измерительные сосуды с визуальным и контактно-визуальным отсчитыванием. В приборах с визуальным отсчитыванием уровень жидкости в стеклянных сосудах определяют по мениску на глаз относительно вертикальной шкалы.

В техническом шланговом нивелире НШТ-1 сообщающиеся сосуды выполнены в виде стеклянных цилиндров в металлической оправе. Внутри каждого сосуда плавает кольцевой поплавок с нанесенной на нем кольцевой риской. Положение поплавка относительно шкалы, нарезанной на стеклянном цилиндре, определяют на глаз. Сосуды нивелира можно устанавливать на нивелируемые поверхности или подвешивать на стенные реперы. Средняя квадратическая ошибка измерения превышения до 200 мм составляет 0,5 мм.

В контактно-визуальных гидростатических нивелирах определяют момент касания острием измерительного штока 3 уровня жидкости (рис. 163). Отсчеты производят по шкале 2 микрометренного винта 1. При применении зеркала 4 при вращении микрометренного винта наблюдается картина сближения двух остриев штока, действительного и его изображения. На контактно-визуальном принципе основаны конструкции гидростатических нивелиров УГС (модель 115) (СССР) и Мейссера (ГДР). В них при диапазоне измеряемых превышений соответственно 25 и 100 мм достигается средняя квадратическая ошибка измерений 0,01—0,02 мм.

В стационарных приборах гидростатического нивелирования применяют преимущественно различные фотоэлектрические и электроконтактные датчики регистрации уровня жидкости [9]. Из фотоэлектрических датчиков наиболее распространена конструкция, изображенная на рис. 164. Свет от электролампы 7 попадает в световод 1, заточенный под углом полного внутреннего отражения света. Под уровнем жидкости установлен фотоприемник 8. Движение световода в направлении к уровню жидкости осуществляется электродвигателем 5. Датчик перемещений световода выполнен на базе индикатора часового типа 4 и состоит из электролампы 2, кодирующего диска 3 и фотоприемника 6. При движении световода в направлении к уровню жидкости датчик перемещений генерирует счетные импульсы, транслируемые по кабелю на вход пересчетной схемы. В момент касания концом световода уровня жидкости образуется мениск, при этом часть света попадает в жидкость и засвечивает фотоприемник, расположенный в дне сосуда. Передним фронтом стопового импульса, генерируемого этим фотоприемником, останавливается счет импульсов в пересчетной схеме. Цена одного импульса составляет 0,01—0,02 мм. Ошибка измерения превышения двух точек, расположенных друг от друга на расстоянии до 100 м, составляет около 0,05 мм при диапазоне измеряемых превышений до 25 мм. В одну систему может входить до 30—50 измерительных датчиков.

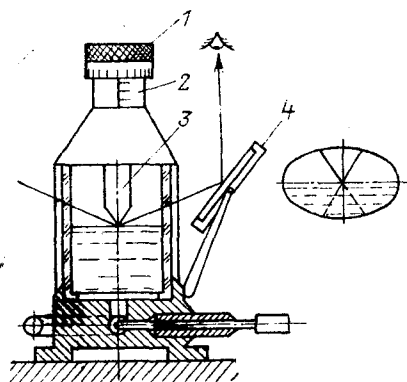


Рис. 163. Контактно-визуальный гидростатический нивелир

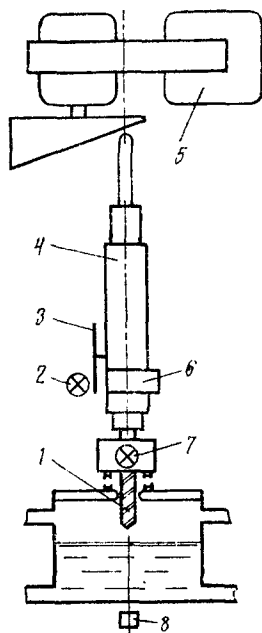


Рис. 164. Фотоэлектрический датчик гидростатического нивелира

В гидростатических приборах электроконтактного типа вместо световода установлен подвижный электрод. В момент контакта электрода с уровнем жидкости замыкается электрическая цепь, что служит исполнительным стоповым сигналом. Электроконтактные датчики проще в изготовлении и надежнее в работе, чем фотоэлектрические, при той же точности измерений.

В гидростатических нивелирах применяют также датчики емкостного, индуктивного и частотного типов. Их преимущество заключается в отсутствии подвижных элементов, но точность их может быть несколько ниже по сравнению с описанными выше фотоэлектрическими и электроконтактными датчиками при том же диапазоне измеряемых превышений. Наибольшее распространение из этих нивелиров в настоящее время получила конструкция измерителя высотных деформаций (ИВД) (рис. 165).

Сосуды 2 ИВД герметичны и соединены между собой трубками 7 и 8. В каждом сосуде на струне 4 подвешен груз 3, частично погруженный в жидкость 1. При измерении уровня жидкости изменяется натяжение струны из-за другой величины выталкивающей силы, действующей на груз. Соответственно меняется частота колебаний струны, которую определяют с помощью частотомера 6.

По изменению частоты определяют изменение уровня жидкости, а следовательно, и изменение превышения между нивелируемыми точками. Частотомер устанавливают на пульте уп-

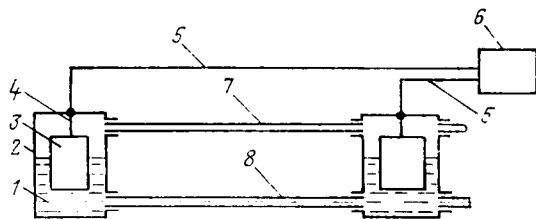


Рис. 165. Конструкция ИВД

равления и соединяют с группой гидростатических сосудов с помощью кабеля 5.

Существуют три варианта такого нивелира: ИВД-30, ИВД-100 и ИВД-300 для измерений превышений соответственно до 30, 100 и 300 мм. Инструментальная ошибка измерения осадки равна примерно 1 : 200 от ее величины.

Гидромеханические нивелиры применяют при геодезических изысканиях трасс дорог, линий электропередач, текущем контроле объемов земляных работ, высотном обосновании геофизических и геологических съемок и т. д.

Для определения превышения между двумя точками на одной из них устанавливают датчик давления гидромеханического нивелира, на другой — соединенный с ним посредством шланга компенсатор. При этом определяют превышение как функцию избыточного давления, создаваемого столбом жидкости, соответствующим измеряемому превышению, при нивелировании по схеме: датчик давления 1 ниже компенсатора 2 (рис. 166, а)

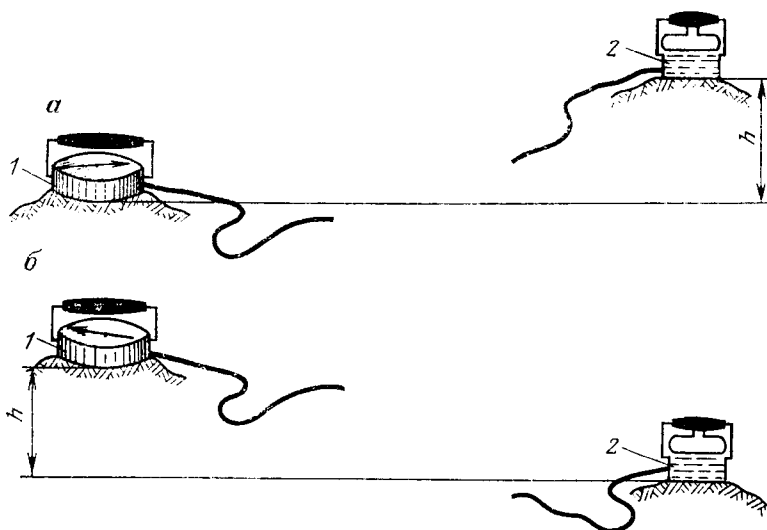


Рис. 166. Принципиальная схема гидромеханического нивелира

или разрежения — при нивелировании по схеме: датчик давления 1 выше компенсатора 2 (рис. 166, б).

В качестве датчика давления жидкости могут быть использованы ртутные и пружинные манометры, барометры-анероиды, микробарометры и т. д. Наибольшее распространение получили манометрические первичные преобразователи в виде мембраны, мембранной коробки, сильфона, одновитковой трубчатой пружины (пружины Бурдона), многовитковой или спиральной трубчатой пружины (пружины Бойса). При деформации первичного преобразователя под действием изменения давления жидкости происходит поворот стрелки прибора.

В качестве соединительного шланга могут быть использованы полиэтиленовые полупрозрачные трубки длиной 50 м в пересеченной местности и 100 м в равнинной и открытой.

Компенсационная камера служит для исключения влияния изменения плотности жидкости, находящейся в горизонтальной части шланга, и изменения длины и диаметра шланга под действием температуры или натяжения и представляет собой сосуд большого диаметра (100 мм и более).

В производстве применяют также двусторонние гидромеханические нивелиры, имеющие датчики давления на обоих концах системы.

Диапазон измерения превышений гидромеханическими нивелирами до ± 10 м, средняя квадратическая ошибка определения превышений составляет 2—5 см. Скорость нивелирования до 1 км/ч.

Гидродинамические нивелиры применяют только в стационарном варианте при наблюдениях за осадками различных конструкций. В них отсчетной является поверхность движущейся по определенному закону жидкости [8]. Измерения производят в процессе непрерывного изменения уровня жидкости в сообщающихся сосудах.

На нивелируемых точках устанавливают одинаковые сообщающиеся сосуды 1, i , n , связанные с общим измерительным сосудом u (рис. 167). В каждом сосуде имеется шток-сигнализатор J . Диаметр измерительного сосуда D во много раз больше диаметров D_1 сосудов с электродами.

В измерительном сосуде с момента $t=0$ производится непрерывный равномерный подъем уровня жидкости, вследствие чего жидкость начинает двигаться по трубопроводам. При этом информация о положении уровня жидкости в сосуде u в каждый последующий момент поступает на пульт управления ПУ.

Вначале изменения уровня жидкости в сосудах носят колебательный характер, но с определенного времени t_0 (через 50—100 с после начала подъема уровня жидкости в сосуде u) процесс становится стабильным и между уровнями в сосудах создается постоянная разность высот Δh , Δh_i , Δh_n . При $t_i > t_0$ наступает момент, когда в одном из сосудов произойдет контакт жидкости с концом штока, что послужит сигналом для регист-

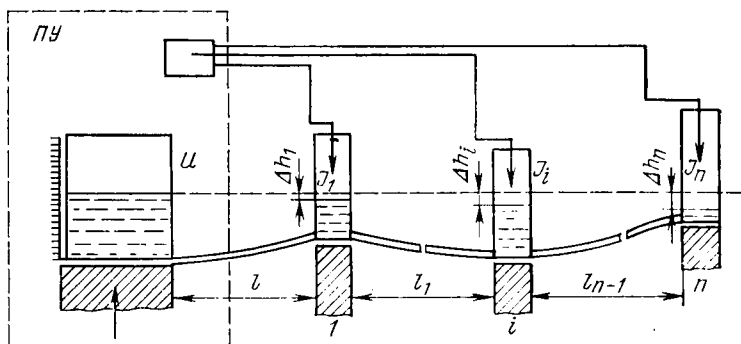


Рис. 167. Система гидродинамического нивелирования

рации положения уровня в сосуде u , и так далее. После опроса всех сигнализаторов процесс измерения заканчивается и система должна быть возвращена в исходное состояние. Значения величин t_0 и Δh_i могут быть найдены для каждой конкретной системы с определенными значениями D , D_1 , l_i также экспериментально.

Если в процессе измерений какой-нибудь из сосудов со штоком-сигнализатором изменит свое положение по высоте, например опустится, то замыкание штока жидкостью произойдет раньше, чем в предыдущем цикле. Величину изменения положения сосуда можно легко определить по показаниям пульта управления.

Разработана система гидродинамического нивелирования СГДН-10Д, содержащая 10 датчиков. Средняя квадратическая ошибка измерения превышения составляет в зависимости от условий измерений 0,05—0,5 мм при диапазоне превышений 100 мм. Время одного цикла измерений 60 мин.

§ 65. МИКРОБАРОМЕТРЫ

Барометрическое нивелирование основано на определении разности высот точек земной поверхности путем сравнения величин атмосферного давления в этих точках. При барометрическом нивелировании кроме давления измеряют температуру воздуха и время наблюдения.

На производстве до настоящего времени применяли микробарометры МБНП, МБ-63, ОМБ-1, ОМБ-3П. Их конструкции подробно рассмотрены в учебной литературе по геодезии. Наибольшее распространение получил микробаронивелир пружинный МБНП. Однако выпуск всех перечисленных микробаронивелиров давно прекращен.

Сейчас отечественная промышленность выпускает лишь один тип микробарометра — М-111, выполненный на базе МБ-63 и обладающий такими же техническими характеристиками.

Принцип работы микробарометра М-111 основан на зависимости упругих деформаций мембран анероидных блоков и изменений атмосферного давления.

Микробарометр М-111 содержит два анероидных блока (рис. 168). Верхний блок 12 соединен с диском 9, нижний блок 1 — со стойкой 2. Диск 9 и стойка 2 закреплены в стакане 8. Передаточно-множительным механизмом служат ленточные цилиндрические пружины 3 и 7 с противоположной навивкой и расположенное между ними зеркало 4, плоскость отражающей поверхности которого совмещена с осью пружин. Концы пружин жестко связаны с центрами анероидных блоков. К фланцу 13, соединенному со стаканом 8, крепится шкала, выполненная на фотопленке. По контуру шкалы имеется окно с матовой поверхностью для подсвета, производимого семью электролампами, равномерно расположенными по дуге.

В верхней части прибор имеет штуцер 11 для подключения к контрольной установке при тарировании.

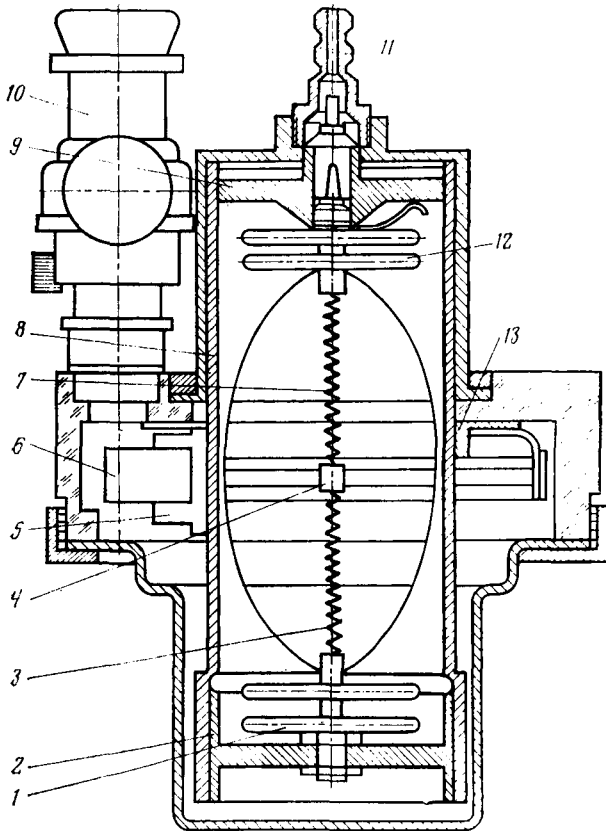


Рис. 168. Конструкция микробарометра М-111

К стакану 8 крепится оправа 5 с объективом и стойкой с трехгранной призмой 6. Отсчет по шкале производится с помощью оптического микрометра 10.

Для измерения температуры в центре чувствительных узлов прибора установлено термосопротивление.

Перед началом наблюдений микробарометр устанавливают в вертикальное положение и включают электроподсвет шкалы. Окулярном микрометра 10 фокусируют по глазу изображение биссектора и шкал в поле зрения микрометра. Анероидные блоки, воспринимая изменение атмосферного давления и деформируясь, вызывают перемещение концов ленточных пружин и поворот зеркала. При этом отсчет по шкале изменяется.

Диапазон работы микробарометра: 63×10^3 — 103×10^3 Па (470÷770 мм рт. ст.) в условиях умеренного климата при температурах от 0 до 40°C и относительной влажности воздуха до 90%. Средняя квадратическая ошибка определения разности давления прибором — 4 Па. Габаритные размеры прибора 190×210×300 мм, масса 4,5 кг.

Глава 11

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

§ 66. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

В геодезической практике широко используют такие традиционные приборы, как рулетки, мерные ленты и проволоки, основанные на принципе откладывания рабочей меры на местности.

Металлические рулетки изготавливают согласно ГОСТ 7502—80 длиной 10 (РВ-10, РТ-10), 20 (РВ-20, РЛ-20), 30 (РВ-30) и 50 м (РВ-50, РК-50). Рулетки изготавливают из стали 65Г. Рулетки РК изготавливают из углеродистой или нержавеющей стали с открытым корпусом в виде крестовины с ручьями. Рулетки РВ такие же, как и РК, но наматываются на открытый корпус в виде вилки. Рулетки РЛ в отличие от РВ имеют на конце груз (лот) цилиндрической формы с миллиметровой шкалой для определения положения грунтовых вод в буровых скважинах, уровня жидкости в резервуарах и т. п. Рулетки РТ — тесьмяные.

Изготавливают два типа землемерных лент: ЛЗ, имеющую штрихи, отверстия, латунные шайбы и пластины, обозначающие дециметровые, полуметровые и метровые интервалы; ЛЗШ, имеющую только миллиметровые и сантиметровые деления на концах на одной стороне ленты. В комплект входят кольцо с проушинами для наматывания ленты и 6 или 11 металличе-

ских шпилек. Относительная ошибка измерения линий лентой в зависимости от условий составляет 1 : 1000—1 : 3000.

Для линейных измерений с относительной ошибкой 1 : 25 000 и точнее применяют базисный прибор БП-2М. В комплект прибора входят 4 инварные проволоки длиной 24 м со шкалами на концах; рулетки с инварной измерительной лентой длиной 12 и 6 м для домера остатков измеряемых линий; вспомогательное оборудование, включающее базисные штативы с целиками, натяжные устройства, термометры-пращи и др. Для хранения проволоки наматывают на алюминиевые барабаны с температурным компенсатором.

Используя специальные прецизионные блоки, стеклянные шкалы, микроскопы для отсчитывания, можно получить относительную ошибку измерения отдельных линий 1 : 800 000—1 : 1 000 000.

В последние годы в ряде производственных организаций успешно применяют длиномеры АД-1М и ДА-2.

Длиномер АД-1М предназначен для измерения длин линий в полигонометрических ходах 1 и 2 разрядов, в теодолитных ходах. В комплект прибора входят 2 стальные проволоки длиной до 500 м, которые натягивают между двумя фиксированными точками линии, и прокатываемая по проволоке измерительная головка, в корпусе которой размещены мерный диск, счетный механизм, два направляющих ролика и тормозное устройство. Точность отсчета — 1 мм, средняя относительная ошибка измерения расстояния 1 : 20 000.

Длиномер ДА-2 — маркшейдерский прибор, предназначенный для автоматического измерения главным образом глубины шахт до 1000 м со средней относительной ошибкой 1 : 20 000. В комплект прибора входят ручная лебедка с храповым устройством и барабаном, на который наматывают стальную проволоку длиной 1500 м с грузом на конце; свободно насаженный на одной оси с барабаном мерный диск со шкалой на реборде, позволяющий делать отсчеты до 1 мм; счетчик оборотов мерного диска; устройство для укладки проволоки при намотке на барабан.

Кроме стали и инвара для рулеток и поволок начинают применять другие материалы, например капроновые мерные приборы. В Норвегии используют мерные ленты из стекловолокна.

§ 67. НИТЯНЫЙ ДАЛЬНОМЕР ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

К простейшим видам оптических дальномеров относят нитяный дальномер. В нитяных дальномерях зрительной трубы с внутренней фокусировкой в процессе фокусирования фокусирующий компонент перемещают, поэтому фокусное расстояние условной эквивалентной линзы, образованной объективом трубы и фокусирующим компонентом, переменна. Тогда при определе-

нии расстояний можно использовать удобную формулу

$$D = lk + P,$$

где D — искомое расстояние; k — коэффициент; l — дальномерный отсчет по рейке; P — поправка.

Приняв $k = 100$, получим $D = 100l + P$.

Поправка P — величина переменная. Ее значение определяют опытным путем на горизонтальном базисе длиной до 150 м с отрезками по 10 м и вычисляют по формуле

$$P_i = s_i - l_i k,$$

где s_i — величины, полученные непосредственным измерением расстояний лентой или рулеткой с относительной ошибкой 1 : 3000.

Точность измерения расстояний нитяным дальномером с учетом поправки P в зависимости от условий составляет 1 : 200—1 : 600. Для уменьшения влияния вертикальной рефракции применяют горизонтальные рейки, при этом дальномерные нити на сетке трубы располагают горизонтально. В измеренное нитяным дальномером расстояние следует вводить соответствующую поправку за приведение линии к горизонту

$$\Delta S = D \sin^2 \nu,$$

где ν — угол наклона линии с горизонтом.

§ 68. ДАЛЬНОМЕРЫ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Оптические дальномеры двойного изображения делят на два типа: с постоянным и переменным параллактическим углом.

Общий принцип работы оптического дальномера двойного изображения с переменным параллактическим углом ясен из рис. 169. В дальномере перед объективом зрительной трубы 1 геодезического прибора, центрированного над точкой A , помещена тонкостенная длиннофокусная линза 2. При совпадении визирной оси трубы и оптической оси линзы изображение точки M рейки в поле зрения трубы расположится на перекрестии сетки нитей m . При перемещении линзы 2 на величину Δ относительно оси зрительной трубы луч mqM изменит свое положение, отклонившись в точке q на угол β , и пойдет по пути mqM' . Если линзу 2 разрезать по диаметру на две половины, одна из которых неподвижна, а другая имеет возможность перемещаться вдоль линии разреза, то в поле зрения трубы можно увидеть два изображения рейки R , на которой нанесены две марки M и M' на расстоянии b друг от друга. Линзу 2 перемещают до тех пор, пока изображения марок M и M' не совместятся, при этом с помощью шкалы измеряют величину Δ смещения линзы 2. Таким образом, величина b в дальномере по-

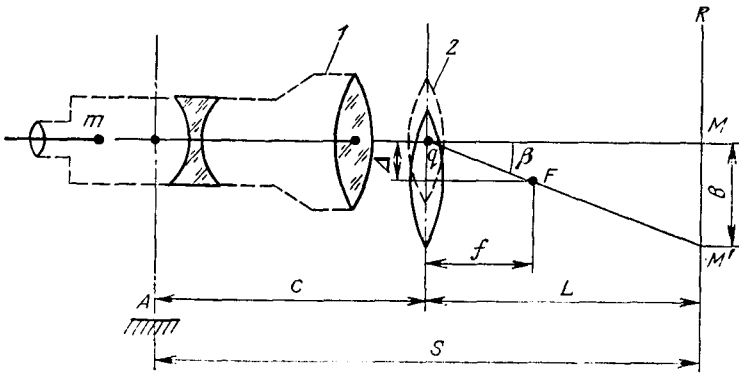


Рис. 169. Принципиальная схема оптического дальномера двойного изображения с переменным параллактическим углом

стоянна, а величины Δ и β переменны в зависимости от расстояния от прибора до рейки. По рис. 169

$$\beta'' = \frac{\Delta}{f} \rho'' = \Delta k',$$

где f — переднее фокусное расстояние линзы 2; $k' = \rho''/f$ — коэффициент перехода от отсчета Δ к величине угла β'' .

Можно записать

$$S = L + c; \quad L = \frac{b\rho''}{\beta''},$$

где c — постоянная поправка дальномера.

Окончательно

$$S = b \frac{\rho''}{\Delta k'} + c = \frac{1}{\Delta} k + c.$$

Коэффициент k определяют на базе.

В оптическом дальномере двойного изображения с постоянным параллактическим углом перед объективом зрительной трубы геодезического прибора помещен оптический клин, закрывающий половину поля зрения. Точка M рейки в одной половине поля зрения остается на месте, а в другой, закрытой клином, переместится в положение точки M' . Таким образом, в поле зрения зрительной трубы наблюдатель будет видеть два изображения, накладывающиеся одно на другое со смещением на величину b . В дальномере угол β постоянен, величина b — переменная и зависит от расстояния L . Величина b подлежит измерению. Тогда

$$S = L + c = b \operatorname{ctg} \beta + c.$$

Для удобства вычислений параметры оптического клина выбирают такими, чтобы $\beta = 34,38'$ и $\text{ctg } \beta = 100$. Тогда $S = 100b + c$.

ГОСТом 22549—77 предусмотрен выпуск оптических дальномеров двойного изображения Д-2, ДНР-5 и ДН-8, основные технические характеристики которых даны в табл. 18.

Дальномер Д-2 с переменным параллактическим углом предназначен для измерения длин линий в полигонометрических ходах 2 разряда, в теодолитных ходах и аналитических сетях с относительной ошибкой не более 1 : 5000.

Т а б л и ц а 18

Характеристика	Тип дальномера		
	Д-2	ДНР-5 (насадка на теодолит)	ДН-8 (насадка на теодолит)
Диапазон измеряемых расстояний, м	40—400	20—120	50—700
Средняя квадратическая ошибка измерения на 100 м, см	2	5	8
Предельные углы наклона измеряемых расстояний, градус	± 20	± 20	± 30
Диапазон автоматического редуцирования расстояний, градус	—	± 10	—
Посадочный диаметр насадки, мм	—	46	46
Увеличение зрительной трубы	25	—	—
Длина рейки, м	2,2	1,5	1,2
Масса, кг	4	0,6	0,6

Дальномерная редуцирующая насадка на теодолит ДНР-5 с постоянным параллактическим углом предназначена для измерения горизонтальных проложений в теодолитных ходах с относительной ошибкой 1 : 1000—1 : 2000, а также для горизонтальной съемки застроенных территорий.

Дальномерная насадка на теодолит ДН-8 с переменным параллактическим углом предназначена для измерения линий в теодолитных ходах и аналитических сетях с относительной ошибкой не более 1 : 1000.

Аналогами этих приборов по техническим характеристикам и конструктивному исполнению являются для Д-2 — ОТД, для ДНР-5 — ДНР-06, для ДН-8 — ДН-08. Их технические характеристики даны в табл. 19.

Оптический дальномер ОТД. Дальномер ОТД (рис. 170) относится к дальномерам двойного изображения с переменным параллактическим углом. Дальномер в зависимости от условий местности может работать с горизонтальной и вертикальной рейкой. Он снабжен оптическим центриром и приспособлен для измерений по трехштативной системе.

Комбинированный компенсатор содержит перекидной оптический клин, попеременно включаемый в верхнюю и нижнюю

части дальномера, измерительную линзовую часть из отрицательной и положительной полулинз, связанную с дальномерной шкалой, установочную линзовую часть из положительной и отрицательной полулинз.

Отрицательные полулинзы, как и положительные, изготовлены из одной линзы, разрезанной пополам. Входные отверстия дальномера закрыты защитными стеклами. Компенсатор уста-

Т а б л и ц а 19

Характеристика	Типы дальномерных насадок		
	ОТД	ДНР-06	ДН-08
Диапазон измеряемых расстояний, м	35—400	20—200	50—700
Относительная ошибка измерения расстояния	1 : 6000	1 : 2000	1 : 1500
Предельные углы наклона измеряемых расстояний, градус	±22	±20	±30
Посадочный диаметр насадки, мм	—	46	46
Увеличение зрительной трубы	31	—	—
Угол поля зрения, градус	1,3	—	—
Минимальный предел фокусирования, м	16	—	—
Цена деления вертикального круга, мин	10	—	—
Ошибка отсчитывания по вертикальному кругу, мин	1	—	—
Число делений на дальномерной шкале, штук	120	—	120
Ошибка отсчитывания по дальномерной шкале, дел.	0,01	—	0,01
Установка рейки	Горизонт., вертикально	Верти- кально	Горизонт.
Длина рейки, м	2,2	2,5	1,2
Базы между марками первой стороны рейки, м	0,404—2,020	—	1,02; 0,55
Базы между марками второй стороны рейки, м	0,4—2,00	—	—
Масса комплекта, кг	23	11	23

новлен перед зрительной трубой, содержащей объектив, фокусирующую линзу, бипризму, окуляр и щелевую диафрагму. Щелевая диафрагма, надетая на окуляр, и бипризма образуют разделительное устройство дальномера, которое разделяет два изображения предмета, срезаая нижнюю часть одного изображения и верхнюю часть другого. На верхней грани бипризмы нанесена отсчетная шкала микроскопа с делениями. Отсчетный микроскоп имеет линзы объектива и призму.

Перекидной оптический клин дальномера отклоняет луч на постоянный угол, который образует постоянную составляющую часть параллактического угла β_1 (2300"). Переменную составляющую β_2 измеряют при помощи линзовой части компенса-

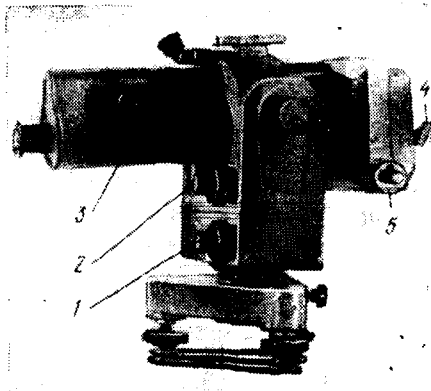


Рис. 170. Дальномер ОТД:

1 — наводящий и закрепительный винты азимутального поворота; 2 — наводящий и закрепительный винты вертикального поворота; 3 — кремальера; 4 — рычаг перекидного клина; 5 — наводящий винт измерительной части компенсатора

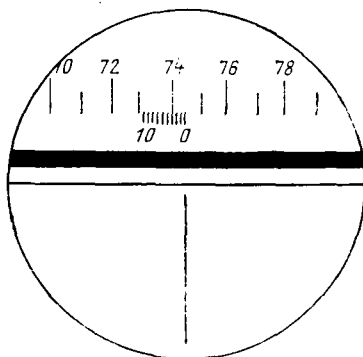


Рис. 171. Поле зрения отсчетного микроскопа ОТД: $n=74,30$

тора. Тогда измеряемый параллактический угол $\beta_0 = \beta_1 \pm \beta_2$. При этом $\beta_2 \ll \beta_1$. Благодаря наличию перекидного клина при расстояниях, близких к 300 м, требуется совсем незначительное перемещение полулинз компенсатора.

Дальномерная рейка ОТД содержит дюралюминиевый каркас с марками в виде желтых пластин с черной полосой. Рейка снабжена круглыми уровнями с взаимно перпендикулярными осями, термометром, вмонтированным в верхней трубе каркаса, и оптическим визиром для установки рейки перпендикулярно к измеряемой линии. Подставка рейки имеет оптический центрир. Втулка служит для установки рейки в подставке вертикально. На одной стороне рейки расстояние между осями марок составляет 400 мм, на другой 404 мм, т. е. разность между расстояниями составляет 1 %.

При измерениях дальномер и рейку центрируют над точками и взаимно ориентируют. Рычаг перекидного клина поворачивают вверх. Тогда перекидной клин находится внизу. Наводящим винтом измерительной линзовой части комбинированного компенсатора совмещают изображение марок, после чего снимают отсчет n_1 (рис. 171) по дальномерной шкале и разность N_1 между номерами совмещенных марок. Перекинув клин в верхнее положение рычагом, наводящим винтом совмещают изображение марок, после чего снимают отсчет n_2 по дальномерной шкале и разность N_2 между номерами совмещенных марок. Разность отсчетов определяет значение переменной части параллактического угла: $\beta_2 = n_2 - n_1$.

Измерение выполняют 6—12 приемами. Перед каждым приемом наводящим винтом, связанным с установочной линзовой частью компенсатора, «сбивают» отсчет.

Предельное расхождение в значениях между приемами не должно превышать 1,5 деления шкалы микроскопа. За окончательное значение принимают среднее арифметическое из всех измерений переменной части параллактического угла.

Количество использованных малых баз при измерении данного параллактического угла $N = (N_1 + N_2) / 2$. Следует стремиться к тому, чтобы $N_1 = N_2$, когда совмещение изображений производится точно в центре поля зрения трубы прибора.

После измерений по первой стороне рейки ее переворачивают на 180° и производят измерение по второй стороне. Переменную часть параллактического угла, измеренного по второй стороне, приводят к масштабу первой стороны:

$$\beta_{2пр} = \beta_2' + 0,01\beta_2'$$

Расхождение между средними значениями переменной части параллактического угла, измеренного по двум сторонам рейки, не должно превышать 1,5 деления шкалы микроскопа.

При переходе от работы с горизонтальной рейкой к работе с вертикальной рейкой трубу дальномера поворачивают вокруг визирной оси на 90° , предварительно вывинтив упор и оттянув фиксатор, расположенный в колонке трубы. Поворот осуществляют до щелчка фиксатора. После этого винт упора затягивают.

Дальномерная редуцирующая насадка на теодолит ДНР-06. Дальномерный комплект ДНР-06 состоит из дальномерной насадки на объектив зрительной трубы теодолита (типа Т2, Т5, Т15 и др.), противовеса, двух вертикальных реек с приставками, бипризмы, чехла для реек и футляра для насадки.

ДНР-06 — дальномер с постоянным параллактическим углом, автоматически преобразующий измеренные наклонные расстояния в горизонтальные проложения, что достигается за счет применения компенсатора со свободно висящим оптическим клином.

Дальномерная насадка содержит оптический компенсатор и телескопическую линзу в корпусе 5 (рис. 172, вид сверху). Компенсатор состоит из неподвижного оптического клина 1 и качающегося редуцирующего клина 4, закрывающих левую половину поля зрения. Телескопическая линза 3 и плоскопараллельная пластина 7 закрывают правую половину поля зрения. Неподвижный клин склеен с телескопической линзой и закреплен в одной оправе. Наклоняя эту оправу при помощи юстировочных винтов 2, можно изменять значение коэффициента дальномера. Редуцирующий клин склеен по торцу с плоскопараллельной пластиной и закреплен с ней в одной оправе 6, подвешенной на двух полуосях, расположенных выше центра тяжести и соединенных с оправой при помощи высокоточных шарикоподшипников. Во время наклона зрительной трубы, оставаясь в отвесном положении, редуцирующий клин изменяет отсчет по дальномерной рейке, автоматически вводя поправку за наклон

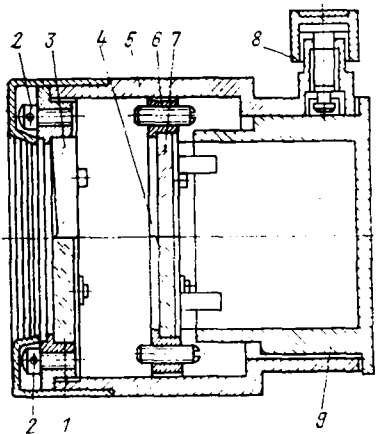


Рис. 172. Дальномерная насадка ДНР-06 (разрез, вид сверху)

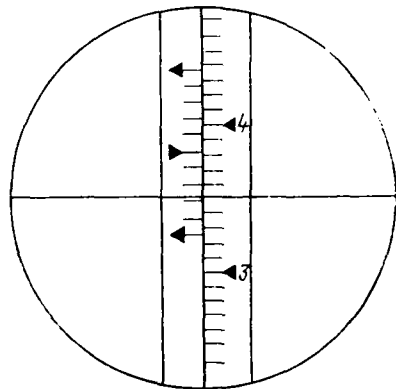


Рис. 173. Поле зрения трубы. Отсчет по рейке ДНР-06

измеряемой линии. Положение редуцирующего клина при юстировке можно регулировать балансировочными винтами.

Закрепление насадки на зрительной трубе теодолита надежно обеспечивается зажимным винтом 8 специальной конструкции. В нерабочем состоянии посадочное отверстие насадки закрывается крышкой 9. Насадка имеет разделительное устройство, состоящее из бипризмы, устанавливаемой на место сетки нитей зрительной трубы, и щелевой диафрагмы, навинчиваемой на окуляр трубы.

Двусторонняя дальномерная рейка со шкалами из инварных полос располагается при измерениях вертикально. Шкалы снабжены нониусами с десятью делениями. Нулевые штрихи нониусов расположены сверху.

На контрольной стороне рейки нониус сдвинут на величину 11,111 м.

На рис. 173 дано поле зрения трубы. Отсчет по рейке 32, 322 получают следующим образом: 32 — число делений основной шкалы до нулевого штриха нониуса; 3 — номер совмещенного штриха нониуса со штрихом основной шкалы; 2 — число делений нониуса до горизонтальной нити сетки; 2 — доля интервала нониуса, отсеченная нитью сетки.

Дальномерная насадка на теодолит ДН-08. Дальномерная насадка с переменным параллактическим углом ДН-08 работает в комплекте с теодолитами типа Т5, Т15 и др. В комплект также входят горизонтальные рейки, бипризма и щелевая диафрагма.

Таким образом, оптическая схема дальномерной насадки ДН-08 фактически отличается от оптической схемы дальномера ОТД отсутствием перекидного оптического клина.

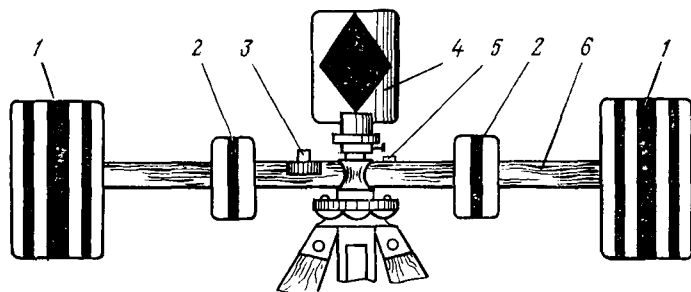


Рис. 174. Рейка дальномерного комплекта ДН-08

Рейка имеет две базы: между большими марками 1 — 102 см и между малыми 2 — 55 см (рис. 174). По большой базе измеряют расстояния от 180 до 700 м, по малой — от 100 до 180 м. При расстояниях до 100 м по малой базе измеряют половину параллактического угла.

Марки рейки укреплены на штанге 6 из дюралюминия. В подставку рейки устанавливают марку 4 для измерения горизонтальных углов. Рейка снабжена круглым уровнем 3 для установки в горизонтальное положение, визиром 5 для установки в положение, перпендикулярное к измеряемой линии, и термометром, помещенным внутри штанги.

При измерении половины параллактического угла рукояткой установочной части компенсатора устанавливают отсчет по дальномерной шкале вблизи 60. Затем рукояткой измерительной части компенсатора совмещают изображение марок, как показано на рис. 175, а, и берут по дальномерной шкале отсчет n_1 . Рукояткой измерительной части компенсатора совмещают изображения марок, как показано на рис. 175, б, и берут отсчет по дальномерной шкале n_2 . По разности этих отсчетов определяют значение половины параллактического угла. Таких приемов обычно делают 4—6. Перед каждым приемом рукояткой установочной части компенсатора «сбивают» отсчет. Расхождение между значениями угла, определенными в разных приемах, не должно превышать 0,15 деления дальномерной шкалы.

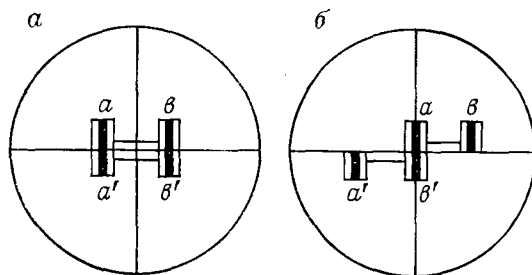


Рис. 175. Схема измерения половины параллактического угла дальномерной насадкой ДН-08

§ 69. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И ВИДЫ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Измерение линий светодальномерами основано на определении времени распространения электромагнитных волн видимого или инфракрасного участков спектра источника излучения.

Светодальномером измеряют расстояние D от приемопередатчика до отражателя (пассивного или активного). Тогда расстояние (D) между точками A и B , над которыми соответственно центрируют приемопередатчик и отражатель, можно определить по формуле

$$(D) = D + c = D + c_1 + c_2,$$

где $c = c_1 + c_2$ — постоянная светодальномера.

Определение времени прохождения электромагнитными волнами измеряемого расстояния производится импульсным и фазовым методами (или их комбинацией). Исходя из этого светодальномеры подразделяют на импульсные и фазовые.

В импульсных светодальномерах измеряется время τ прохождения светового сигнала от приемопередатчика до отражателя и обратно

$$D = c\tau/2n,$$

где c — скорость распространения света в вакууме; n — показатель преломления реальной среды, являющийся функцией ее магнитной проницаемости μ и диэлектрической постоянной ϵ , причем величины μ и ϵ зависят от влажности и температуры.

Счет времени ведется посредством счета импульсов генератора с момента запуска сигнала на дистанцию до момента приема отраженного сигнала. В импульсных светодальномерах большая ошибка возникает за крутизну (длительность) переднего фронта сигнала. Точность измерения времени составляет обычно 1—10 нс (1 нс = 10^{-9} с).

Ошибка измерения расстояний импульсными светодальномерами от 1 до 10 м. Светодальномер фирмы «Женераль Электрик» (США) дает ошибку 0,3 м на 15 км расстояния. Повысить точность измерения можно путем замены применяемых генераторов с наносекундными импульсами генераторами с пикосекундными импульсами (1 пс = 10^{-12} с).

В фазовых светодальномерах вместо индикатора времени применен индикатор разности фаз. Существуют два типа фазовых светодальномеров: с плавно изменяющейся и с фиксированной частотой.

В фазовых светодальномерах первого типа частоту модуляции света f изменяют до тех пор, пока в двойном расстоянии от приемопередатчика до отражателя не уложится целое число волн или полуволн:

$$D = \frac{1}{2} \lambda N,$$

где N — число волн, уложившихся в двойном расстоянии; λ — длина волны,

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad D = \frac{1}{2} \frac{vN}{f},$$

где v — скорость распространения света в среде измерения.

Однако в этом случае неизвестно число волн N . Для разрешения неоднозначности частоту изменяют так, чтобы число уложившихся волн изменилось точно на n , например, на 1. Тогда

$$n = N_2 - N_1; \quad (11.1)$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{2Df_1}{v}; \\ N_2 &= \frac{2Df_2}{v}; \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

$$N_2 - N_1 = n = \frac{2D}{v} (f_2 - f_1); \quad (11.3)$$

$$\frac{2D}{v} = \frac{n}{f_2 - f_1}.$$

Но на основании (11.1) и (11.2)

$$\frac{2D}{v} = \frac{N_1}{f_1}; \quad \frac{2D}{v} = \frac{N_2}{f_2}.$$

Учитывая (11.3), получим

$$N_1 = \frac{f_1 n}{f_2 - f_1}; \quad N_2 = \frac{f_2 n}{f_2 - f_1}$$

и

$$D_1 = \frac{1}{2} \frac{vN_1}{f_1}, \quad D_2 = \frac{1}{2} \frac{vN_2}{f_2}, \quad D = \frac{D_1 + D_2}{2}.$$

По описанному принципу работают светодаальномеры серии СТ, разработанные В. Д. Большаковым и А. И. Демушкиным. В них факт уложения целого числа волн на трассе фиксируется визуально по методу светового минимума, когда наблюдатель, плавно изменяя частоту модуляции света, визуально фиксирует момент уменьшения до минимума светового потока, идущего от отражателя в визирную трубу.

Блок-схема прибора СТ-65 изображена на рис. 176. Свет от источника b в виде лампы накаливания СГ-2 с точечным телом накала, расположенного в приемеопередатчике, проходит через конденсор 5 , поляризатор 4 и фокусируется в центре межэлектродного пространства конденсатора Керра 3 . Поляризатор 4 и конденсатор Керра 3 являются модуляторами света. Межэлектродный зазор конденсатора Керра, установленного в фокусе

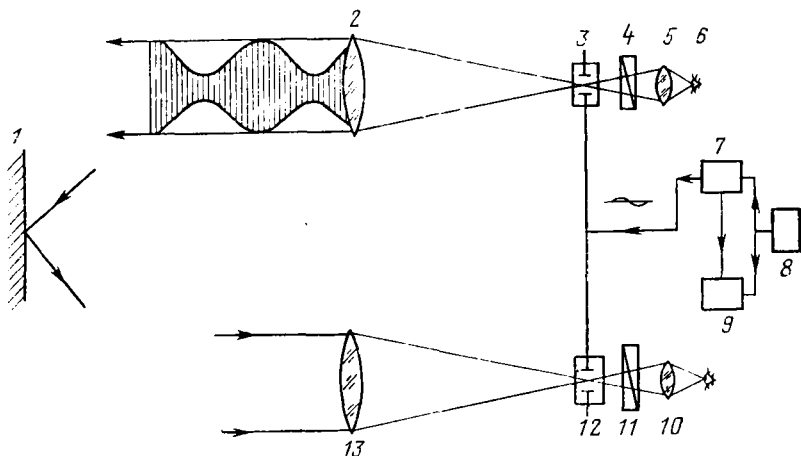


Рис. 176. Блок-схема светодальномера СТ-65

объектива 2, занимает горизонтальное положение. Плоскость поляризации поляризатора устанавливается под углом $45 \pm 1^\circ$ по отношению к направлению электрических силовых линий конденсатора Керра.

Модулированный световой поток при помощи объектива 2 передающей телескопической трубы направляется на отражатель 1, далее поступает в светоприемную трубу приемопередатчика и фокусируется объективом 13 в центре межэлектродного пространства конденсатора Керра 12. Конденсатор Керра 12 и анализатор 11 являются демодуляторами света. Конденсатор 12 установлен в фокусе объектива 13 так, что его межэлектродный зазор занимает вертикальное положение, перпендикулярное к межэлектродному зазору конденсатора Керра 3 модулятора. С выхода конденсатора Керра 12 световой поток через анализатор 11 и окуляр 10 поступает в глаз наблюдателя. Анализатор 11, установленный в окулярной части светоприемной трубы, может поворачиваться на угол $90^\circ \pm 3^\circ$.

В приборе использована схема работы модулятора и демодулятора, при которой минимумы светового потока получают наиболее остро.

С генератора высокой частоты 7 на конденсаторы Керра 3, 12 подаются электрические колебания высокой частоты (23,8—26,8 МГц). Через окуляр 10 наблюдатель производит наведение приемопередатчика на отражатель и рассматривает отсчетное устройство светодальномера, состоящее из верньера и шкалы генератора с оцифровкой от 1 до 1000. Электрическая часть приемопередатчика, кроме генератора высокой частоты, содержит калибратор частоты 9 и преобразователь напряжения. Калибратор частоты 9 состоит из двух кварцевых генераторов на 100 и 110 кГц, смесителя-детектора и усилителя низкой частоты

с телефоном и служит для калибровки шкалы генератора высокой частоты и изменения частоты модуляции светового потока.

Сравнение частот генератора высокой частоты (ГВЧ) производится в смесителе с n -ми гармониками кварцевого генератора 100 кГц или с m -ми гармониками кварцевого генератора 110 кГц [35]. Равенство частот $f_{ГВЧ} = nf_{100}$ и $f_{ГВЧ} = mf_{110}$ фиксируется на слух с помощью телефонов.

На шкале ГВЧ имеются три кварцевые поверочные точки, в которых частоты гармоник кварцевых генераторов на 100 и 110 кГц совпадают ($nf_{100} = mf_{110}$). В паспорте светодалномера даны значения частот поверочных точек и отсчеты по шкале генератора, соответствующие им.

Измерение частоты модуляции производится путем сравнения в смесителе-детекторе частоты генератора с k -й гармоникой разностной частоты $\Delta f_{кв} = 10$ кГц генераторов, для чего используют калибровочные точки шкалы, следующие через 10 кГц [35]. Равенство $f_{ГВЧ} = k\Delta f_{кв}$ определяют по точкам нулевых биений на слух с помощью телефонов.

Блок питания 8 состоит из аккумуляторной батареи и зарядного выпрямителя.

В геодезической практике наибольшее распространение получили фазовые светодалномеры с фиксированной частотой, работа которых основана на определении фазового сдвига частоты, модулирующей световой поток, проходящий расстояние от приемопередатчика до отражателя и обратно. В двойном расстоянии от приемопередатчика до отражателя укладывается целое число длин волн и дробная часть:

$$D = \frac{\lambda}{2} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{1}{2} N\lambda + \frac{1}{2} \Delta N\lambda, \quad (11.4)$$

где λ — среднее значение длины волны модулирующей частоты для реальных атмосферных условий; N — число полных фазовых циклов (число полных длин волн); $\Delta\varphi/2\pi$ — дробная часть фазового цикла (дробная часть длины волны). Причем $0 < \Delta\varphi < 2\pi$.

По формуле (11.4) определить D нельзя, так как неизвестно значение N . Для разрешения неоднозначности измерения производят на разных (обычно на трех) частотах.

К светодалномерам с фиксированной частотой относятся 2СМ2, 3СМ2, СМ-02, ЭОК-2000, ЭОТ-2000, МСД-1, «Кварц», СГ-3 и др.

В качестве источника излучения применяют лампы накаливания (для измерения небольших расстояний), газоразрядные лампы, светодиоды и оптические квантовые генераторы.

В качестве модуляторов света применяют ячейки Керра, кристаллические модуляторы с кварцевыми резонаторами, ультразвуковые и др. Реже применяют механические модуляторы, в которых модуляция света осуществляется вращением диска с растром.

Согласно ГОСТ 19223—73 светодальномеры, выпускаемые в СССР, подразделяют на четыре типа:

Светодальномер СМ-5 предназначен для измерения линий длиной до 500 м со средней квадратической ошибкой не более 5 см.

Светодальномер СМ-2 предназначен для измерения линий длиной до 2 км со средней квадратической ошибкой не более 2 см во всем диапазоне измерений. Светодальномер СМ-2 относится к приборам массового применения. Он выдает результаты измерений автоматически в цифровом виде на световое табло. К этой серии светодальномеров относятся 2СМ2, 3СМ2.

Высокоточный светодальномер СМ-02 предназначен для измерения малых расстояний (до 300 м) со средней квадратической ошибкой не более 2 мм во всем диапазоне измерений.

Высокоточный большой светодальномер СБ-6 предназначен для измерения больших расстояний (до 50 км ночью и до 30 км днем) со средней квадратической ошибкой не более $m = 1 + D \cdot 10^{-6}$ см, т. е. 6 см на 50 км.

В табл. 20 приведен перечень основных типов светодальномеров, выпускаемых в различных странах, а также основные их характеристики.

Светодальномер 2СМ-2. В комплект светодальномера 2СМ2 входят приемопередатчик, электронный блок, два источника питания, два трипельпризменных отражателя, два оптических двусторонних отвеса, термометр-пращ, барометр, три штатива и запчасти. Светодальномер позволяет измерять расстояния в дневное и ночное время. Он является электронно-оптической системой, в которой используется фазовый метод измерения расстояний.

Приемопередатчик светодальномера состоит из головки 3, колонок 4 и подставки 1 (рис. 177). Головка 3 содержит детали и узлы передающего, приемного и визирного каналов, рукоятку включения оптического короткого замыкания (ОКЗ) (слева от наблюдателя), ручку для регулирования уровня сигнала (справа от наблюдателя) и контрольный прибор 2 со стороны окуляра, служащий средством индикации уровня принимаемого сигнала. В верхней части головки имеется коллиматорный визир, служащий для предварительного наведения прибора на отражатель. Сетки зрительной трубы и визира снабжены электроподсветкой для работы в ночное время.

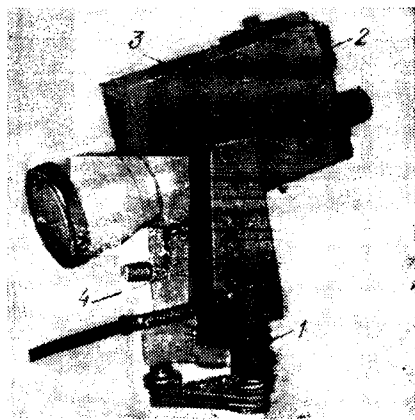


Рис. 177. Светодальномер 2СМ2

Прибор	Страна-изготовитель	Пределы измерения, м	Напряжение источника питания, В	Средняя квадратическая ошибка измерения, мм
Свето				
ДК-001	СССР	0,5—300	15	$(0,8+1,5 \cdot 10^{-6} D)$
МСД-1	СССР	1—300	15	$(1+10 \cdot 10^{-6} D)$
МСД-1М	СССР	До 500	15	$(2+5 \cdot 10^{-6} D)$
2СМ2	СССР	2—2000	12	20
СМ5	СССР	5—500	85	50
СТ65	СССР	100—2000	12	$(14+3 \cdot 10^{-6} D)$
СМ3	СССР	20—2000	15	30
ЕОК-2000	ГДР	0,3—2000	12	10
Теллуrometer МА-100	Великобритания	3000	—	$(1,5+2 \cdot 10^{-6} D)$
НР3800 и его модификация	США	3000	—	$(6+10 \cdot 10^{-6} D)$
Мекометр МЕ-3000	Швейцария	3000	—	$(1 \cdot 10^{-6} D)$
Керн ДМ-1000	Швейцария	2500	—	4 мм до 1 км
Елди (Eldi)	ФРГ	3000 (1500)	—	$(10+2 \cdot 10^{-6} D)$
Геодиметр, модель 6В	Швеция	15—2500	12	$(10+1 \cdot 10^{-6} D)$
Светодаальномерные				
ДНК-02	СССР	20—400	12	$(20+20 \cdot 10^{-6} D)$
Дистомат	Швейцария	1000	—	$(5+5 \cdot 10^{-6} D)$
Керн ДМ500 (501)	Швейцария	500 (2000)	—	До 6 $(5+5 \cdot 10^{-6} D)$
Геодиметр 12	Швеция	0,8—1700 (5000, 18 призм)	6	$(5+10 \cdot 10^{-6} D)$
Геодиметр 10	Швеция	1000 (2000, 8 призм)	6	$(5+10 \cdot 10^{-6} D)$
Акклирангер	Канада	1200	—	До 6
СД-6	Великобритания	2000	—	$(5+5 \cdot 10^{-6} D)$
Телеметр DN1	Польша	2000	—	10—20
Дистомат (DI) 10	Швейцария	2000	—	До 10
Дистомат (DI) 3	Швейцария	300	—	$(5+5 \cdot 10^{-6} D)$
Елди (Eldi) 1	ФРГ	5000	—	5—20
Елди (Eldi) 2	ФРГ	3000	—	7—20
Елди (Eldi) 3	ФРГ	1500	—	10—20
НР 3820А	США	3000—5000	—	$(5+1 \cdot 10^{-6} D)$

Примечания: ЛН — лампа накаливания, ОКГ — оптический квант

Колонка 4 содержит оптический центр, наводящие и закрепительные винты, ручку регулирования напряжения на ФЭУ и кабель, соединяющий приемопередатчик с электронным блоком. Наличие съёмной подставки обеспечивает возможность применения трехштативной системы измерения линий и углов.

На рис. 178 представлена оптическая схема приемопередатчика. Инфракрасные лучи, идущие от излучателя 13, проходя конденсорную линзу 12, отражаются от спектроразделительной

Таблица 20

Продолжительность измерения, мин	Потребляемая мощность, Вт	Источник излучения	Масса комплекта без упаковки (в упаковке), кг	Диапазон допустимых углов наклона, градус	Температурный диапазон работы, °С
дальномеры					
10	20	СД	— (20)	—40 — +90	—20 — +40
8	3,5	СД	27 (34)	—45 — +90	—10 — +40
8	2,5	СД	27 (35)	—45 — +90	—10 — +40
2	20	СД	22 (58)	±25	—40 — +40
10	5	СД	7 (7,5)	±25	—30 — +40
15	35	ЛН	70 (80)	±20	—20 — +40
10	8	СД	27 (—)	±15	—40 — +50
2	8	СД	16 (80)	±40	—25 — +45
2	13	СД	16 (—)	—	—
2—8	12	СД	8 (—)	—30 — +45	—
3	16	КИЛ	12 (—)	—	—
0,25	—	СД	12 (—)	—	—
0,15	4	СД	4 (—)	—	—
1	26	ОКГ	15 (—)	—	—
насадки на теодолит					
10	3,5	СД	36 (50)	—	—40 — +50
0,15	10	СД	7 (—)	—	—
0,15	—	СД	2 (—)	—	—
(0,1)	—	СД	4,4 (—)	±45	—
0,25	17	СД	2,8 (—)	±30	—20 — +50
0,15	—	СД	2,5 (—)	±30	—
0,02	—	СД	—	—	—
—	12	СД	2,5 (—)	—	—
2	—	СД	2 (—)	—	—
0,25	15	СД	2 (—)	±40	—20 — +50
—	—	СД	5,5 (—)	—	—
0,1	—	СД	8,0 (—)	—	—
0,1	—	СД	4,2 (—)	±45	—
0,1	—	СД	3,8 (—)	±45	—
0,03	—	СД	— (9,5)	±30	—10 — +40

овый генератор, СД — светодиод, КИЛ — ксеноновая импульсная лампа.

пластины 9. Пройдя через отверстие в зеркале 8, объектив 2 и отразившись от отражателя, лучи фокусируются объективом 8 на диафрагме 7, изменив направление на 90° зеркалом 8. Диафрагма 7 служит для ограничения фоновых засветок. Изображение диафрагмы с помощью объектива 6 через интерференционный светофильтр 5, служащий для выделения полезного сигнала путем снижения уровня помех принятого излучения, проектируется на фотокатод фотоэлектронного умножителя 4

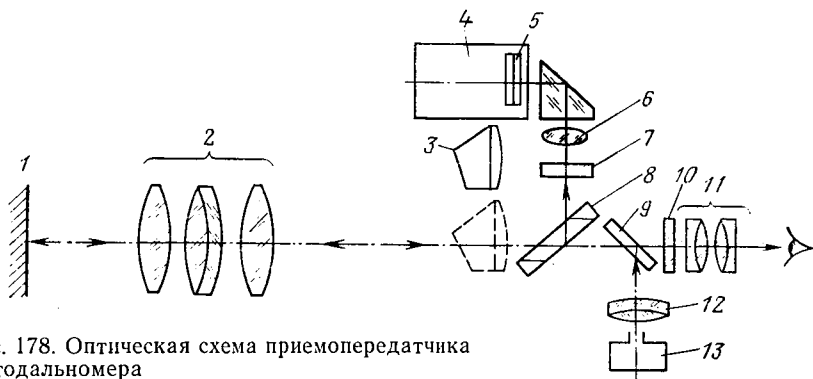


Рис. 178. Оптическая схема приемопередатчика светодальномера

(ФЭУ). Для учета влияния фазовых задержек в электронной схеме прибора в оптическую систему периодически вводят блок оптического короткого замыкания (ОКЗ) 3 в виде трипель-призмы и положительной линзы, фокус которой находится в плоскости диафрагмы 7.

Так как спектроделительная пластина отражает только инфракрасные (невидимые) лучи и пропускает видимые, одновременно с измерением можно рассматривать глазом отражатель 1 по визирному тракту: окуляр 11 — сетка нитей 10 — объектив 2. Благодаря наличию спектроделительной пластины 9 и зеркала 8 с отверстием в приборе совмещены передающий, приемный и визуальный тракты, что обеспечивает его малые габариты.

Электронный блок светодальномера служит для создания высокостабильных масштабных и гетеродинных частот, обработки принятого сигнала и выдачи результатов измерения на цифровое табло. На лицевой панели электронного блока расположены выключатели режимов работы и прибор, служащий для контроля работоспособности отдельных блоков, электронных цепей и светодальномера в целом.

Излучение полупроводникового люминесцентного светодиода на арсениде галлия, модулированное генератором масштабной частоты (ГМЧ), направляется на трипельпризменный отражатель. Одновременно напряжения ГМЧ и генератора гетероидной частоты (Г) подаются на смеситель (СМ), откуда напряжение разностной частоты через формирователь опорного канала подается в счетный узел в виде сформированной последовательности опорных импульсов. Отраженный световой сигнал попадает на фотоприемник (фотоэлектронный умножитель — ФЭУ), где преобразуется в электрический, гетеродинируется и усиливается. Этот преобразованный сигнал с ФЭУ через узкополосный фильтр и фазовращатель поступит в счетный узел. Фазовращатель в сигнальном канале служит для при-

ведения показания цифрового табло в режиме оптического короткого замыкания (ОКЗ) к нулю для сокращения объема вычислений при обработке результатов.

В счетном узле измеряется фазовый сдвиг между излучаемым (опорным) и принимаемым с дистанции сигналами. Результат измерения просчитывается счетчиками и высвечивается на цифровом табло.

Для разрешения неоднозначности измерение расстояний происходит на трех масштабных частотах модуляции: $f_1 = 149,85$ кГц, $f_2 = 1498,5$ кГц, $f_3 = 14985$ кГц. f_1 и f_2 получают с помощью делителя частоты, f_3 вырабатывается термостатированным кварцевым генератором. Выбранная сетка частот позволяет получать результаты измерения в метрической системе без дополнительных вычислений. Разрешение неоднозначности на трех масштабных частотах осуществляется автоматически.

Характерной особенностью светодальномера 2СМ2 является прекращение счета при появлении в створе измеряемой линии препятствий. После устранения препятствия (дыма, пыли, движущихся предметов и т. д.) счет продолжается. Это обстоятельство позволяет эффективно использовать указанный светодальномер в условиях строительно-монтажной площадки.

Отражатель содержит блоки с трипльпризмами. В зависимости от длины линии может быть использовано разное число блоков. Отражатель устанавливается на подставку и имеет для ориентирования круглый уровень и визир.

При измерении линии отражатель и приемопередатчик центрируют над закрепляющими ее точками. Затем осуществляют необходимые подключения в приборе. Отражатель при помощи визира направляют на приемопередатчик. Приемопередатчик по сетке нитей наводят на отражатель. Точное наведение можно осуществлять по максимальному уровню сигнала контрольного прибора приемопередатчика.

Светодальномер «Блеск» (3СМ2). Светодальномер 3СМ2 отличается от светодальномера 2СМ2 тем, что в нем приемопередатчик и электронный блок совмещены. Специальное устройство автоматически производит измерение в режиме ОКЗ. Кроме того, прибор снабжен звуковой индикацией, сигнализирующей о наведении светодальномера на отражатель и об окончании процесса счета. Светодальномер может быть снят со своего основания и укреплен на теодолите 2Т2, 2Т5К, 2Т2П, 2Т5КП и других на месте ручки переноски. В этом случае теодолит используется как электронный тахеометр.

В комплект прибора входят два отражателя с семью призмами и один с одной. Отражатели могут быть установлены на штативе или специальной вехе, входящей в комплект подставки.

Диапазон измерения расстояний 0,2—3000 м, при применении отражателя с 18 призмами можно измерять расстояния до 5000 м.

Средняя квадратическая ошибка измерения расстояния $(10+5 \cdot 10^{-6} D)$ мм. Предельные углы наклона измеряемых линий $\pm 20^\circ$. Средняя потребляемая мощность 5 Вт. Увеличение зрительной трубы прямого изображения $12\times$, поле зрения 3° . Масса светодальномера с основанием 4,5 кг, снятого с основания для установки на теодолит 3,8 кг, отражателя с одной призмой 0,4 кг, с семью — 2 кг. Масса штатива 5,5 кг, источника питания 3,8 кг, веши 1 кг.

Светодальномер СМ5. В комплект светодальномера СМ5 входят приемопередатчик с подставкой, два трипельпризменных отражателя с подставками, два источника питания, два оптических двусторонних отвеса, три штатива, термометр-пращ, зарядное и разрядное устройства, две вешки и запчасти. Напряжение источника питания светодальномера 8,5 В, потребляемая мощность 5 Вт. Масса комплекта с упаковкой 25 кг. Диапазон допустимых углов наклона $\pm 25^\circ$, температур $-30^\circ \div +40^\circ \text{C}$. Увеличение зрительной трубы $4,4\times$, угол поля зрения 6° , минимальное расстояние визирования 15 м.

Приемопередатчик имеет головку 5, колонки 2, скрепленные ручкой 4, и основание 1 (рис. 179). В головке расположены приемопередающая оптическая система, светодиод, ФЭУ, переключатель «дистанция — ОКЗ», электронные схемы. На крышке головки закреплена зрительная труба 3. На лицевой панели со стороны наблюдателя расположены рабочие рукоятки, стрелочный прибор и цифровое табло. На колонке расположены наводящее и закрепительное устройства, микротелефон и разъем для подключения кабеля от источника питания. На основании укреплены оптический центрир и цилиндрический уровень.

В светодальномере использован импульсный метод измерения расстояний. На рис. 180 представлена оптическая схема светодальномера. Свет от полупроводникового светодиода 12 на основе арсенида галлия проходит через отверстия 11 и 9 диафрагмы 10 переключателя «дистанция — ОКЗ» и призмой 8 через объектив 1 направляется на отражатель (на чертеже не показан). Отраженный световой сигнал фокусируется объективом 1 в плоскости полевой диафрагмы 3

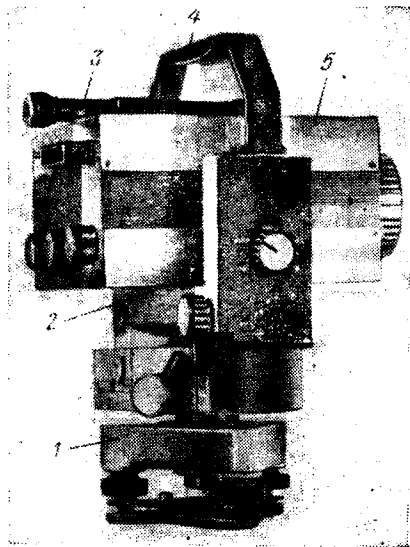


Рис. 179. Приемопередатчик светодальномера СМ5

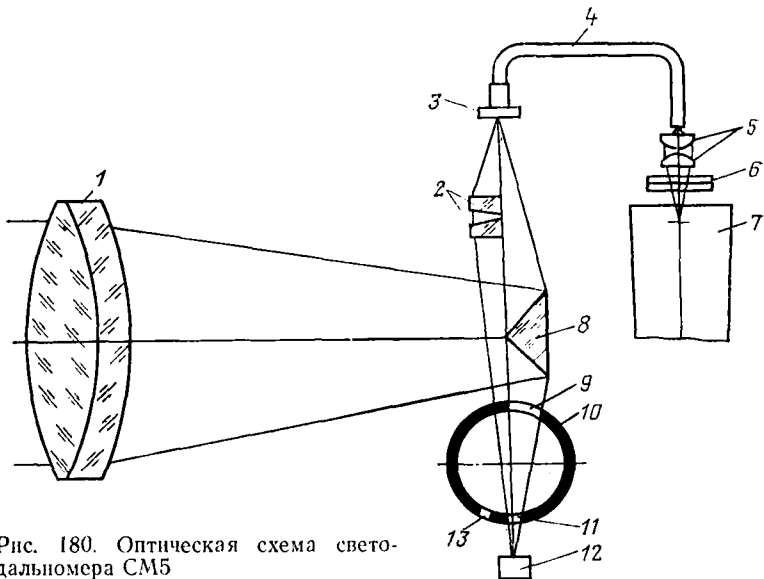


Рис. 180. Оптическая схема светодальномера СМ5

и после прохождения световода 4 фокусируется микрообъективом 5 в плоскости фотокатода ФЭУ 7, пройдя через интерференционный фильтр 6, служащий для уменьшения уровня фоновой засветки ФЭУ.

В режиме ОКЗ диафрагма переключателя «дистанция — ОКЗ» поворачивается так, что излучение в направлении отражателя перекрывается, а через отверстия 13 и 9 фокусируется блоком 2 ОКЗ в плоскости полевой диафрагмы и далее попадает на фотокатод ФЭУ.

В режиме «дистанция — ОКЗ» принятый в ФЭУ сигнал детектируется и с помощью подаваемого на фотокатод ФЭУ напряжения вспомогательного генератора преобразуется в низкочастотный сигнал. Напряжение с выхода ФЭУ проходит фильтр низких частот (ФНЧ), усилитель и усилитель-ограничитель и далее через ключ подается на счетный узел в виде сигнальных импульсов. Одновременно с сигнальными на счетный узел через коммутатор поступают опорные импульсы, частота следования которых в режиме «грубо» 14,9855 Гц, в режиме «точно» — 1498,55 Гц. Интервал времени между каждым опорным и следующим за ним сигнальным импульсом пропорционален измеряемому расстоянию. Этот интервал измеряется в счетном узле методом подсчета импульсов заполнения, следующих с частотой 1498,55 кГц.

В режиме «грубо» отсчет высвечивается на пяти индикаторах табло в сантиметрах, в режиме «точно» — на первых четырех индикаторах табло в миллиметрах. Каждый высвечиваемый отсчет представляет собой разность отсчетов в режиме «дистан-

ция» — $D_{\text{дист}}$ и «ОКЗ» — $D_{\text{ОКЗ}}$. Начало высвечивания отсчета ($D_{\text{дист}} - D_{\text{ОКЗ}}$) сопровождается звуковым сигналом. Для получения окончательного значения измеряемого расстояния отсчет в режиме «грубо» уточняют по среднему арифметическому значению в режиме «точно» и вносят поправки за температуру воздуха в районе измерений, которая должна быть известна с ошибкой до 1°C , и атмосферное давление, которое должно быть известно с ошибкой до $1,35$ кПа (10 мм рт. ст.).

Приемопередатчик светодальномера СМ5 может быть укреплен на теодолитах серии 2Т на месте ручки переноски.

Светодальномер МСД-1. В маркшейдерском светодальномере МСД-1 (рис. 181) расстояние измеряется на двух частотах модуляции компенсационным способом (нулевое показание стрелочного индикатора β) при помощи оптической линии задержки. Длина линии должна быть предварительно известна с ошибкой 50 м.

Светодальномер МСД-1 чувствителен к посторонним засветкам, повышенной влажности и отрицательным температурам. В светодальномере МСД-1М создана более совершенная схема питания полупроводникового источника излучения повышенной мощности, благодаря чему удалось повысить дальность действия прибора. Светофильтр, служащий для ограничения фоновых засветок, установлен в съемной светозащитной бленде так, что при неблагоприятных условиях видимости бленду можно снять. Для того чтобы при разрешении неоднозначности предварительно не определять длину измеряемой линии, введена третья масштабная частота, позволяющая получать искомое расстояние однозначно. Для измерения углов наклона измеряемых линий в пределах 3° введено устройство 1, состоящее из уровня с ценой деления $10''$, закрепленного на электронно-оптической блоке 2, и шкалы на механизме вертикальной наводки.

Светодальномером МСД-1 можно измерять расстояния от 1 до 300 м с ошибкой $(1 + 10 \cdot 10^{-6} D)$ мм, а светодальномером МСД-1М — от 1 до 500 м с ошибкой $(2 + 5 \cdot 10^{-6} D)$ мм. Светодальномер не рекомендуется использовать при температуре ниже -10°C .

Светодальномер ДК 001. В комплект светодальномера ДК 001 входят приемопередатчик, электронный блок, два блока источников питания, два трипельпризменных отражателя (отражатель состоит из одной трипельпризмы), три оптических центрира, психрометр аспирационный, барометр и др.

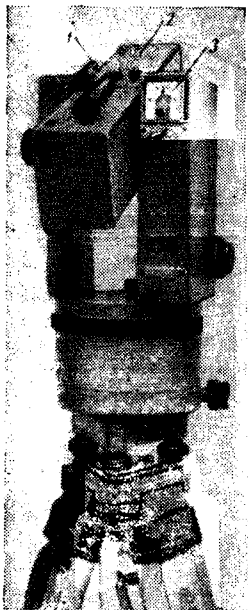


Рис. 181. Маркшейдерский светодальномер МСД-1

Светодалномер предназначен для высокоточных измерений в инженерной геодезии, эталонирования базисов, геодезических измерений малых смещений и деформаций при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Увеличение визирной системы $16\times$. Ошибка измерения линий одним приемом $(0,8 + 1,5 \times 10^{-6} D)$ мм.

В светодалномере ДК-001 использован фазовый метод измерения расстояния на низкой промежуточной частоте. Особенностью светодалномера, позволяющей обеспечить высокую точность измерений, является амплитудная модуляция излучения полупроводникового светодиода с частотой 750 МГц.

Приемопередатчик светодалномера служит для излучения и приема отраженного от отражателя модулированного сигнала. Он состоит из зрительной трубы и колонки. На зрительной трубе установлен визир для грубой наводки зрительной трубы на отражатель. Точное наведение зрительной трубы производится наводящими винтами. На лицевой панели приемопередатчика расположены также переключатель режимов «грубо—точно», рукоятка для перемещения фильтра переменной плотности, рукоятка для переключения блока оптического короткого замыкания ОКЗ, индикаторный прибор для определения уровня сигнала, ручка установки напряжения фотоэлектронного умножителя ФЭУ.

На рис. 182 представлена оптическая схема приемопередатчика. Свет от светодиода 7 через цилиндрическую линзу 8, отразившись от зеркала 15, проходит через объектив 14 на дистанцию. Отразившись от трипельпризменного отражателя 13, свет проходит через объектив и направляется зеркалом 15 и призмой 9 через фильтр переменной плотности 6, отрицательную линзу 5, интерференционный фильтр 4, полевую диафрагму 3, световод 2 на приемник излучения 1 ФЭУ. В ФЭУ осуществляется преобразование высокой частоты модуляции в низкую промежуточную, на которой производится измерение фазы.

Одновременно с измерением можно рассматривать глазом отражатель 13 по визирному тракту: окуляр 18 — сетка нитей 17 — фокусирующая линза 16 — объектив 14.

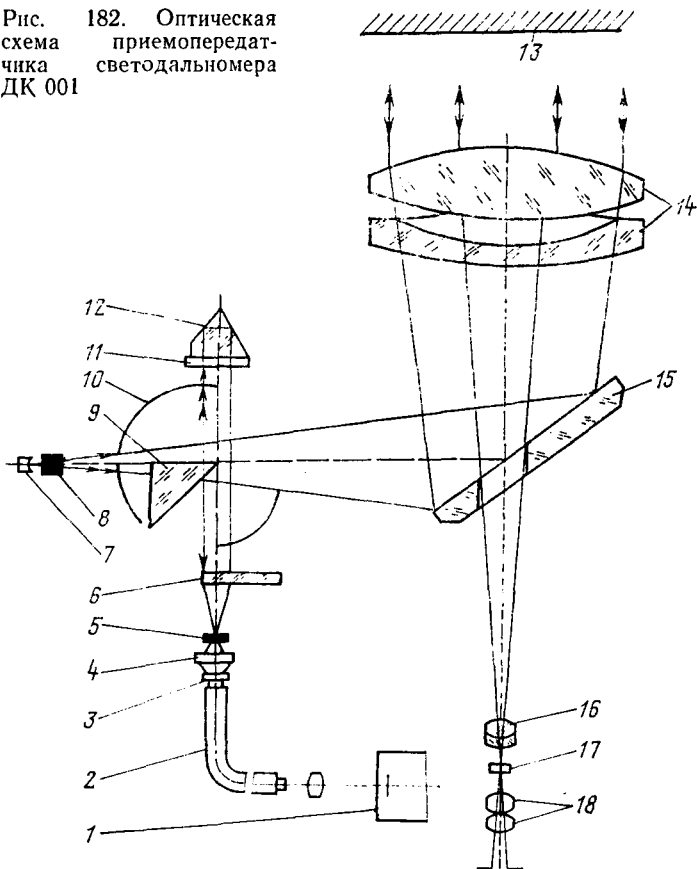
Для исключения влияния изменяющихся во времени задержек сигналов в светодалномере применяется калибровка по внутренней оптической линии задержки, т. е. в режиме оптического короткого замыкания. Для этого с помощью поворотной шторки 10 производится переключение блока ОКЗ, состоящего из трипельпризмы 12 и фокусирующей линзы 11.

Оптическая схема светодалномера ДК 001 отличается от оптической схемы светодалномера 2СМ2 компоновкой элементов и отсутствием спектрорделительной пластины.

Электронный блок аналогичен электронному блоку светодалномера 2СМ2.

Для разрешения неоднозначности измерения расстояний в светодалномере применена сетка масштабных частот, полу-

Рис. 182. Оптическая схема приемопередатчика светодальномера ДК 001



чаемых от опорного сигнала, который вырабатывается термостатированным кварцевым генератором: $f_4 = 749,250$ мГц, $f_3 = 14985$ кГц, $f_2 = 1498,5$ кГц, $f_1 = 149,85$ кГц.

Выбранные частоты позволяют получать результаты измерений в метрической системе без дополнительных преобразований.

Фазовый сдвиг между опорным и принимаемым с дистанции сигналами в счетном узле преобразуется во временной интервал, который заполняется счетными импульсами с частотой 15 мГц.

Для уменьшения ошибок измерений в счетном узле в течение 2 с производится усреднение результатов измерений. Усредненный результат высвечивается на электронно-цифровом табло электронного блока.

Светодальномер ДК 001 при измерении расстояния между двумя фиксированными точками может работать в режиме грубых и в режиме точных измерений. Режим грубых измерений позволяет однозначно определять расстояния в пределах до

1000 м со средней квадратической ошибкой 2—3 см. Режим точных измерений применяется для измерения расстояний с паспортной номинальной повышенной точностью. Переключение режима работы светодальномера производится переключателем «грубо—точно».

При высокоточных измерениях в инженерно-геодезических целях центрирование светодальномера над отверстием диаметром 25,4 мм производится при помощи специального устройства жесткого принудительного центрирования, входящего в комплект прибора.

Проверки светодальномеров

Пригодность светодальномеров к использованию определяют в процессе проверок, которые проводят перед вводом в эксплуатацию, после хранения на складе, после длительной транспортировки, нахождения в особо неблагоприятных условиях и периодически при эксплуатации. Проверки различных светодальномеров могут несколько отличаться друг от друга. У некоторых светодальномеров могут предусматриваться особые проверки, обусловленные спецификой конструкции. Но в общем проводят следующий комплекс проверок светодальномеров:

1. Внешний осмотр прибора. Здесь обращают внимание на плавность вращения трубы, наводящих винтов, надежность работы крепежных винтов и др.

2. Проверки установочных уровней и центрировочных устройств. Уровни и центрировочные устройства проверяют и юстируют теми же известными методами, что и других геодезических приборов.

3. Проверка правильности показаний контрольных приборов. Выполняется с использованием контрольных источников питания, вольтметров и др.

4. Проверка масштабной частоты. Осуществляется при помощи стандартного частотомера. Порядок проверки определен в техническом описании конкретного светодальномера.

5. Определение постоянной поправки светодальномера. Выполняется на базисе с известной длиной. Так как величина поправки не зависит от измеряемой линии, целесообразно определять ее на возможно более коротком базисе в благоприятных для измерения условиях.

6. Определение ошибки измерения расстояний одним приемом. Выполняется на контрольных базисах различной длины в пределах рабочего диапазона работы прибора.

Для различных светодальномеров в результаты измерения вводят поправки за температуру, давление, влажность и др. Они, как правило, определяются из номограмм и таблиц в паспорте или из технического описания прибора.

§ 70. РАДИОДАЛЬНОМЕРЫ

Радиодальномерами называют дальномерные устройства, использующие при измерениях линий ультракороткие радиоволны (сантиметровые и даже миллиметровые). При использовании ультракоротких радиоволн не удается получить такой узконаправленный луч, как для света в светодальномерах. Поэтому в радиодальномерах значительная часть излучаемой энергии рассеивается в окружающее пространство, и радиолуч, касаясь подстилающей поверхности, отражается от нее. В приемное устройство попадают радиоволны, прошедшие над подстилающей поверхностью и отраженные от нее, вследствие чего точность радиодальномерных измерений по сравнению со светодальномерными несколько ниже.

Для уменьшения влияния указанного явления в радиодальномерах вместо пассивных отражателей (применяемых в светодальномерах) используют ретрансляторы, что несколько усложняет их блок-схему по сравнению с блок-схемой светодальномеров.

Ретранслятор, называемый «ведомой» станцией, устанавливают в точке B измеряемой линии. Приемопередатчик, называемый «ведущей» станцией, устанавливают в точке A измеряемой линии. В современных радиодальномерах обе станции делают идентичными. Каждая из них содержит источник несущих колебаний (СВЧ-генератор), модулятор, генератор масштабной частоты и параболическую антенную систему и способна работать в режиме «ведущей» и «ведомой» станции.

СВЧ-генератор в каждой станции радиодальномера является одновременно источником несущих колебаний и модулятором. Генератор «ведущей» станции A является источником электромагнитных колебаний с частотой ω_1 , а «ведомой» B — с частотой ω_2 , причем генератор станции B играет роль гетеродина (вспомогательного генератора, с частотой которого сравнивается измеряемая частота).

Измеряемые антенными системами колебания поступают на вход приемника-смесителя удаленной станции и на вход собственного приемника-смесителя. В приемниках-смесителях станций A и B колебания, прошедшие измеряемое расстояние, смешиваются с колебаниями от местного генератора, вследствие чего образуются колебания с разностной частотой $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ [12]. Снимаемые с выхода приемника-смесителя станции B колебания разностной частоты Ω с помощью вспомогательных передатчика и приемника передаются на станцию A , где с помощью фазоизмерительного устройства измеряется разность фаз низкочастотных колебаний, поступающих с выхода приемника-смесителя и от вспомогательного приемника.

Таким образом, в геодезических радиодальномерах применяют низкочастотный метод фазовых измерений, отличный от фазовых методов, применяемых в светодальномерах. Особенно

стями этого метода при схеме дальномера, состоящего из двух станций *A* и *B*, устанавливаемых на концах измеряемой линии, являются следующие [12]:

1. Фазоизмерительное устройство работает на разностной частоте Ω , а измеряемая разность фаз равна разности фаз колебаний частоты ω_1 генератора станции *A*, т. е. той станции, на которой разность фаз измеряется.

2. Измеряемая разность фаз не зависит от частоты генератора станции *B* и от начальных фаз колебаний, возбуждаемых генераторами обеих станций.

3. Единицей измеряемого расстояния является длина волны электромагнитных колебаний, определяемая частотой ω_1 генератора станции *A*. Поэтому частота генератора станции *A*, как правило, должна иметь большую стабильность, чем частота генератора станции *B*.

По сравнению со светодальномерами, радиодальномеры можно с успехом применять при плохой видимости (туман, дымка).

В СССР разработаны фазовые радиодальномеры РДГ, РДГВ и «Луч». РДГ и РДГВ работают в десятисантиметровом диапазоне радиоволн. В радиодальномере РДГ «ведущая» и «ведомая» станции различны по конструкции. Радиодальномер РДГВ — более совершенный прибор. Станции его имеют одинаковую конструкцию, каждая из них может работать в режимах «ведущей» и «ведомой».

Наиболее совершенным прибором является радиодальномер «Луч», работающий в трехсантиметровом диапазоне, что позволяет по сравнению с радиодальномерами РДГ и РДГВ уменьшить влияние радиоволн, отраженных от подстилающей поверхности, на точность измерений.

В радиодальномере «Луч» приемопередатчик каждой станции отделен от индикаторного блока. Это позволяет поднимать приемопередатчик на мачту высотой до 25 м и выполнять, таким образом, измерения без постройки геодезических сигналов. Для ориентирования антенны вдоль измеряемой линии и для измерения нескольких линий без разборки мачты приемопередатчик снабжен поворотным механизмом, приводимым в движение реверсионным электродвигателем по команде оператора. Все органы управления станцией расположены на лицевой панели индикаторного блока. Место расположения индикаторного блока не оказывает влияния на результаты измерений, поэтому при ненастной погоде его можно расположить в палатке или автомобиле. В комплект радиодальномера входят три взаимозаменяемые станции.

Принципиальная схема «ведущей» и «ведомой» станций радиодальномера «Луч» представлена на рис. 183.

В качестве источника колебаний масштабной частоты служит кварцевый генератор 12, а несущей частоты — клистронный генератор 11, работающий в диапазоне 8800—8900 МГц.

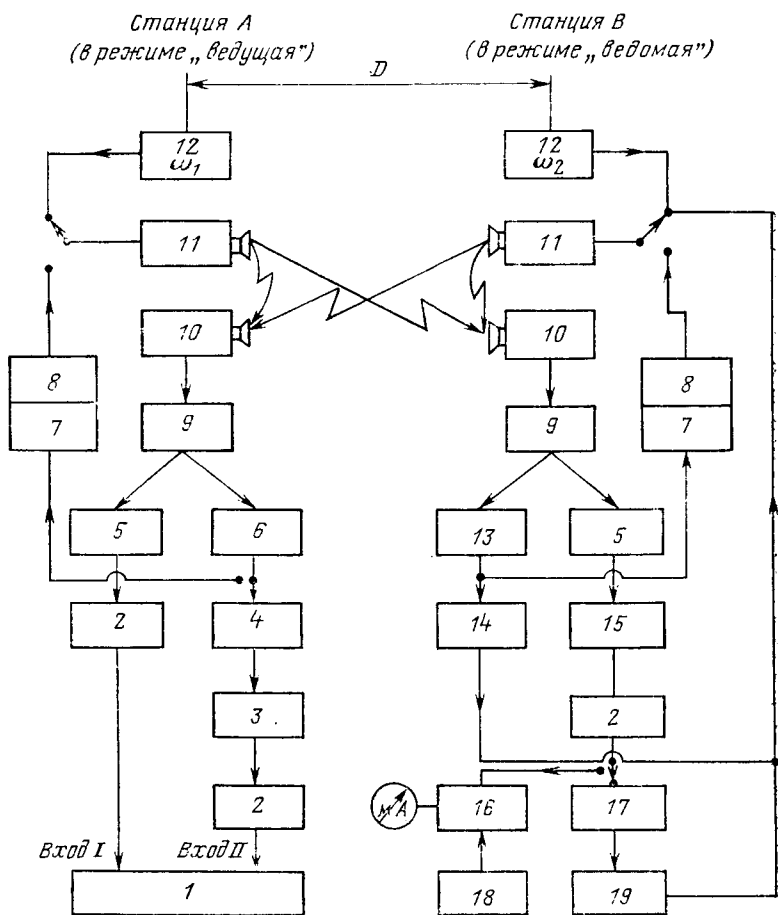


Рис. 183. Принципиальная схема радиодальномера «Луч»

Частота кварцевых генераторов «ведущей» и «ведомой» станций в процессе работы радиодальномера отличается на 1 кГц, а частота клистронного генератора «ведомой» станции на 33 МГц выше частоты клистронного генератора «ведущей» станции. Колебания СВЧ-диапазона излучаются в направлении удаленной станции и частично попадают на вход смесителя 10 собственного приемного устройства. Колебания после прохождения измеряемого расстояния через приемную антенную систему также попадают на вход смесителя 10. На выходе смесителя «ведущей» и «ведомой» станций выделяются колебания с промежуточной частотой, равной разности несущих частот клистронных генераторов. Колебания промежуточной частоты подвергаются усилению с помощью усилителя промежуточной частоты

(УПЧ) 9 и подаются на амплитудный детектор 5 для выделения сигнала с частотой $\Omega = \omega_1 - \omega_2$. Этот низкочастотный синусоидальный сигнал с выхода амплитудного детектора 5 «ведомой» станции поступает в фазоинверсионный каскад 15, в котором фаза сигнала меняется на 180° , и после усиления с помощью усилителя низкой частоты (УНЧ) 2 попадает в частотный модулятор 17, являющийся составной частью вспомогательного генератора 19, генерирующего синусоидальные колебания с частотой 83 кГц.

При воздействии низкочастотным сигналом на частотный модулятор 17 вспомогательного генератора 19 возникают колебания вспомогательной частоты, поступающие в клистронный генератор 11 «ведомой» станции, где происходит вторичная частотная модуляция.

На выходе УПЧ 9 «ведущей» станции параллельно с амплитудным детектором 5 включен первый частотный детектор 6, с которого снимаются частотно-модулированные колебания вспомогательной частоты. Первый частотный детектор 6 через усилитель 4 связан со вторым частотным детектором 3, с которого снимаются низкочастотные синусоидальные колебания с частотой 1 кГц. Эти колебания через УНЧ 2 попадают на вход II фазоизмерительного устройства 1. На вход I фазоизмерительного устройства через УНЧ 2 поступают колебания с выхода амплитудного детектора 5 «ведущей» станции.

Фазоизмерительное устройство содержит фазовый детектор со стрелочным прибором, которые используются в качестве индикаторного устройства, и фазовращатель, со шкалы которого считывается разность фаз.

Для уменьшения влияния относительной нестабильности частоты клистронных генераторов в схему «ведомой» станции введена система автоматической подстройки частоты 14 (АПЧ) в виде усилителя постоянного тока, вход которого соединен с частотным детектором 13. Синхронизация частот кварцевого генератора 12 «ведомой» станции осуществляется с помощью фазового детектора 16 и генератора 18 на 1 кГц.

При необходимости установить радиотелефонную связь вход клистронного генератора 11 соединяется с микрофоном 8, а выход первого частотного детектора 6 и 13 — с телефоном 7.

В табл. 21 приведены основные технические характеристики отечественных радиодальномеров.

Постоянная поправка радиодальномера определяется на эталонном базисе для пары станций, одна из которых работает в режиме ведущей, а другая — в режиме ведомой. Оптимальная длина базиса должна быть равна нескольким сотням метров. Наилучшим базисом считается трасса, покрытая лесом или кустарником. Линия, соединяющая точки стояния ведущей и ведомой станций, должна проходить на расстоянии нескольких метров от вершин деревьев или кустарников. Если станции взаимозаменяемы, то поправку на базисе следует определять

дважды: один раз, когда одна станция работает в режиме ведущей, а другая в режиме ведомой, а второй раз — наоборот.

В радиодальномере периодически должны проверяться масштабная частота ведущей станции, а также вспомогательные масштабные частоты.

Т а б л и ц а 21

Характеристика	Тип радиодальномера		
	РДГ	РДГВ	«Луч»
Дальность действия, км	0,2—30	0,2—30	0,2—40
Ошибка измерения, см	$5 \pm 3 \cdot 10^{-6} D$	$5 \pm 3 \cdot 10^{-6} D$	$3 \pm 3 \cdot 10^{-6} D$
Диапазон несущих частот, МГц	2650—3100	2650—3100	8600—8900
Частоты модуляции, *МГц	10,000; 9,990; 9,900; 9,000; 10,001; 9,999; 9,989; 9,899; 8,999	10,000; 9,990; 9,900; 9,000; 10,001; 9,999; 9,989; 9,899; 8,999	10; 9,939
Питание, В	12	12	12
Мощность потребляемая одной станцией, Вт	67	85	60
Масса, кг:			
а) индикаторного блока	16	19	14
б) приемопередатчика			9,5
в) барабана с 25-метровым кабелем	—	—	23
Индикатор	Осциллографический	Осциллографический	Индикатор с фазовращателем

Глава 12

ТАХЕОМЕТРЫ И КИПРЕГЕЛИ

§ 71. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

И ТИПЫ ТАХЕОМЕТРОВ И КИПРЕГЕЛЕЙ

Тахеометры и кипрегели предназначены для производства топографических съемок. При этом плановое положение точек местности определяется методом полярных координат или засечками, высотное — наклонным или горизонтальным лучом визирования.

За полтора столетия развития тахеометров* к настоящему времени, кроме обычных круговых тахеометров, на производстве нашли применение лишь те из них, которые имеют авто-

* Первый теодолит создан в 1730 г. Тахеометрия впервые предложена лишь в 1823 г. итальянским геодезистом И. Порро. Первые кипрегели появились около середины XIX в.

Основные технические характеристики редукционных тахеометров

Технические характеристики	Тип прибора и страна-изготовитель					
	ТД, СССР	Redta 002, ГДР	DK — RV, Швейцария	KI — RA, Швейцария	TARI 4180, Италия	ТВ, СССР
Увеличение зрительной трубы	27	25	27	28	28	16
Диаметр входного зрачка, мм	38	42	45	45	40	—
Фокусное расстояние, мм	218	250	172	1,8	190	157
Длина трубы, мм	250	310	1,8	—	2	—
s_{min} , м	2	2,5	—	—	—	2
Диаметры угломерных кругов, мм:	95	114	75	89	90	95
горизонтального	70	74	50	70	100	85
вертикального	—	—	—	—	—	—
Цена деления круга:	1°	1°	20'	1°	1°	10'
горизонтального	1°	1°	20'	1°	1°	10'
вертикального	—	—	—	—	—	—
Тип отсчетного устройства	ш. м.	ш. м.	ш. м.	ш. м.	ш. м.	шт. м.
Цена деления шкалы	1'	1'	10"	1'	1'	—
Цена деления уровня на 2 мм:	30	30	35	30	30	30
на алидаде горизонтального круга, с	—	30	30	—	30	—
на алидаде вертикального круга, с	—	8	—	—	10	—
круглого, мин	н. к.	в. к	м. р.	м. р.	т. ш.	н. к.
Тип редукционного устройства	45	35	—	—	—	45
Диапазон действия, градус	100/3	100/2	100/3÷5	400/10	50, 100, 200/10÷15	200/6
Коэффициенты дальн. и ошибки на 100 м:	—	—	—	—	—	—
расстояний, см	/5	/2÷5	/3÷5	/3÷5	/5	3÷5
превышений, см	2,1	2,1	2	—	—	0,6
Рейка, тип и длина, м	Горизонт.	Горизонт.	Верт.	Верт.	Верт.	Горизонт.
Масса, кг:	6,0	6,5	5,0	4,5	5,5	7,5
прибора	3	6,2	2,4	2,2	3,1	4,6
фуллера, ящика	5,3	5,6	5,3	5,3	7,2	6,3
штатива	2	9,5	—	—	—	1,5
рейки	—	с подставкой-удлинителем	—	—	—	—

Тип прибора и страна-изготовитель

Технические характеристики	Тип прибора и страна-изготовитель					1а — D4, ВНР
	BR7006, ГДР	Dahlita 010 f. ГДР	RDS, Швейцария	2ТН, СССР	RTa4, ФРГ	
Увеличение зрительной трубы	15	25	24	27,5	25	24
Диаметр входного зрачка, мм	25	40	40	40	40	40
Фокусное расстояние, мм	135	300	212	218		240
Длина трубы, мм	—	216	190		220	175
Spin, М	1,8	3	3	5	2	3
Диаметры угломерных кругов, мм:						
горизонтального	90	86	79	95	98	77
вертикального	90	86	70	70	85	68
Цена деления круга:						
горизонтального	5'	1°	1°	1°	1°	1°
вертикального	5'	1°	1°	1°	1°	1°
Тип отсчетного устройства	шт. м.	шт. м.	шт. м.	шт. м.	шт. м.	шт. м.
Цена деления шкалы	—	1'	1'	1'	1'	1'
Цена деления уровня на 2 мм:						
на алидаде горизонтального круга, с	60	20	30	30	30	30
на алидаде вертикального круга, с	30	—	30	—	—	—
круглого, мин	8	8	12	10	15	6
Тип редуccionного устройства	л. к.	н	н. л.	н	н	н. кр.
Диапазон действия, градус	45	45	50	45	45	—
Коэффициенты дальн. и ошибки на 100 м:						
расстояний, см	200/6	100, 200/10	100/10 ÷ 20	100, 200/10 ÷ 20	50, 100, 200/5, 10, 20	100, 200/10, 20
превышений, см	/3 ÷ 5	10, 20, 50, 100/3, 5, 15	10, 20, 50, 100/3, 4	10, 20, 100/ 3, 5, 15	10, 20, 50, 100/3, 5, 10, 20	20, 50/ 5, 10
Рейка, тип и длина, м	0,6	3; 4	3; 4	3; 4	3	Верт.
Масса, кг:	Горизонт.	Верт.	Верт.	Верт.	Верт.	Верт.
прибора	6,7	4,7	6,2	4,0	5,3	5,3
фуллера, ящика	5,8	4,3	2,2	3,0	4,3	2,8
штатива	5,6	5,8	7,0	5,3		4,8
рейки	1,3	4,5	5,5	5,0	4,3	

Примечания: шт. м. — шкаловой микроскоп; л. к. — неподвижные клинья; в. к. — вращающиеся клинья; м. р. — механическое регулирование расстояний между дальномерными нитями; т. ш. — тангенциальная шкала; шт. м. — штриховая микроскоп; л. к. — линзовый компенсатор; н. — номограмма; н. л. — номограмма с планетарной передачей; н. кр. — номограмма круговая.

матические устройства, облегчающие труд исполнителей и повышающие его производительность.

В СССР выпускаются теодолиты в соответствии с ГОСТ 10529—79 (см. гл. 9) и разрешены к выпуску по ГОСТ 10812—74 тахеометры с авторедуцирующими дальномерами двойного изображения, внутрибазные, номограммные и электронные.

Технические характеристики советских и зарубежных тахеометров приводятся в табл. 22.

По ГОСТ 20778—75 в СССР в настоящее время выпускаются только номограммные кипрегели КН. Технические характеристики кипрегелей даны в табл. 23.

§ 72. ТАХЕОМЕТРЫ С АВТОРЕДУКЦИОННЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ ДВОЙНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Тахеометр ТД. В 1970 г. в СССР создан редуционный тахеометр ТП (тахеометр-полуавтомат). Под этим шифром прибор выпускался до 1975 г. После усовершенствования тахеометр имеет шифр ТД.

Тахеометр ТД сочетает в себе шкаловой теодолит с компенсатором типа 2Т5К и принципиально новый дальномер двойного изображения, предложенный А. И. Захаровым.

Измерение горизонтальных и вертикальных углов тахеометром производится с точностью шкалового теодолита (0,1—0,2'), горизонтальных проложений линий — с относительной средней квадратической ошибкой 1 : 5000, превышений — с ошибкой 3—4 см на 100 м расстояния.

Оптическая схема дальномерно-высотометрного узла и зрительной трубы тахеометра представлена на рис. 184. Световой луч *I*, идущий от рейки, отклоняется неподвижными оптическими клиньями *З* на постоянный угол δ в соответствии с формулой (3.107). Луч *II*, также идущий от рейки, не проходит через оптические клинья *З*, установленные перед объективом *7* зрительной трубы тахеометра. Так образуется двойное изображение.

Когда визирная ось зрительной трубы занимает горизонтальное положение, луч *I* отклоняется клиньями на угол δ_0 :

$$\delta_0 = \theta_0 (n - 1), \quad (12.1)$$

где θ_0 — суммарный преломляющий угол пары клиньев; n — средний показатель преломления стекла, из которого изготовлены клинья.

При наклонах зрительной трубы на угол ν_i диастиметрический угол δ_0 будет уменьшаться пропорционально $\cos \nu_i$, т. е.

$$\delta_i = \delta_0 \cos \nu_i, \quad (12.2)$$

что следует из рис. 185, так как

$$\theta_i = \theta_0 \cos \nu_i, \quad (12.3)$$

Основные технические

Технические характеристики	Тип прибора и стр		
	КН, СССР	КА-2, СССР	МА-5, ВНР
Увеличение зрительной трубы	25	25	24
Диаметр входного зрачка, мм	40	45	45
Фокусное расстояние, мм	251	300	—
Длина трубы, мм	230	265	165
$s_{\text{мфн}}$, м	5	5	3
Диаметр вертикального круга, мм	80	110	59
Цена деления вертикального круга, мин	5	10	10
Тип отсчетного устройства	шт. м.	шт. м.	шт. м.
Цена деления уровня на 2 мм: на алидаде вертикального круга, с	30	30	30
на линейке, с	60	60	60
на трубе, с	30	30	—
Тип редукционного устройства	н	н	н
Диапазон действия, градус	40	45	30
Коэффициенты кривых и ошибки на 100 м: расстояний, см	100, 200/20	100/20	100, 200/20
превышений, см	10, 20, 100/3, 5, 15	10, 20, 100/3, 5, 15	10, 20, 50/3, 5, 10
Рейка, тип и длина, м	Верт. 3; 4	Верт. 3	Верт. —
Масса, кг: прибора	3	2,8	3,5
футляра, ящика	7,5	8,5	6,2
штатива	4	4,3	5,5
рейки	4	—	—
мензулы с планшетом	5	2,2+4,6	2,1+3,5

Примечания: ш. м. — шкаловой микроскоп; шт. м. — штриховой граммма с планетарной передачей; н. ш. п. — номограмма с шарикоподшипни

тогда

$$\delta_i = \theta_i (n - 1). \quad (12.4)$$

На рис. 185 очевидно, что при всех других сечениях, кроме главного, угол $\theta_i < \theta_0$. Если HN совпадает с осью вращения трубы, то

$$AO/BO = \cos v_i. \quad (12.5)$$

Измеренное по горизонтальной рейке расстояние автоматически приводится к горизонту в виде

$$s = kl_s, \quad (12.6)$$

подобно выражению (7.20).

характеристики кипрегелей

ана-изготовитель			
РК-1, Швейцария	РК, Швейцария	Alida, ФРГ	Mascho 627, ФРГ
25	27	20	25
40	40	36	33
195		225	240
2,4	2,8	1,8	2,5
76	50	86	110
10	10	10	10
шт. м.	шт. м.	м. н.	м. н.
30		40	20
120	60	100	60
—	—	20	20
н. п.	н. ш. п.	н	н
—	—	—	—
100, 200/20	100/20	100/20	100/20
20, 50, 100/5, 10,	20, 50, 100/5,	10, 20, 100/3,	10, 20, 100/3,
15	10, 15	5, 15	5,15
Верт. —	Верт. —	Верт. —	Верт. —
2,5	3,1	3,6	3,5
6,0	4,4	2,4	6,0
4,2	5,7	5,5	5,0
—	—	—	—
1,9+5	—	6,0	7,0

микроскоп; м. н. — микроскоп с нониусом; н — номограмма; н. п. — номоковым приводом.

Клинья 3 (см. рис. 184) устанавливаются в тахеометре ТД так, чтобы их центры отверстий находились на оси вращения зрительной трубы. Конструктивно форма оправы клиньев напоминает дополнительный вертикальный круг. Они в одной оправе закреплены в колонке и при вращении зрительной трубы остаются неподвижными.

Поворот оправы с клиньями на 90° позволяет дальномерное устройство применять как высотомерное для определения превышений, так как

$$\delta_i = \delta_0 \cos(v_i + 90^\circ) = \delta_0 \sin v_i, \quad (12.7)$$

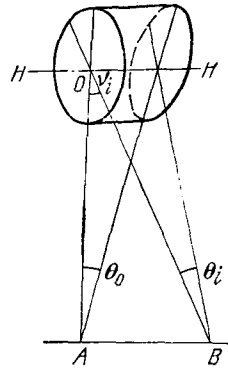
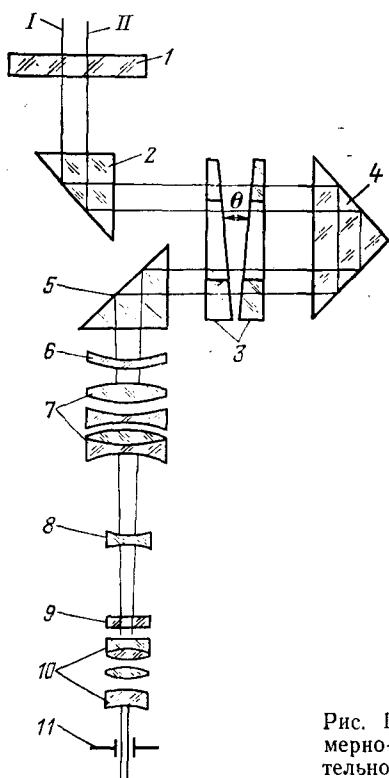


Рис. 185. Принцип редуцирования угла

Рис. 184. Оптическая схема дальномерно-высотомерного узла и зрительной трубы тахеометра ТД

значит,

$$h = kl_h. \tag{12.8}$$

Для горизонтальной рейки имеем

$$s = D \cos v, \tag{12.9}$$

$$h = D \sin v, \tag{12.10}$$

где D — наклонное расстояние, s — горизонтальное проложение, h — превышение, v — угол наклона.

Точное измерение s и h достигается применением верньера на рейке и оптического микрометра в тахеометре. Главной частью оптического микрометра является телескопическая полулинза 6 (см. рис. 184), перекрывающая свободную от клиньев половину объектива и создающая добавочное увеличение (110/111). Телескопическая полулинза в тахеометре ТД установлена для горизонтальной рейки.

Режим измерения s и h определяется вращением переключателя, имеющего при КЛ обозначения s и H .

На оптической схеме (см. рис. 184) обозначены: 1 — защитное стекло; $2, 4, 5$ — поворотные отражательные призмы; 8 — фокусирующая линза; 10 — окуляр.

Окончательно формулы для определения s и h имеют вид

$$s = kl_s + c - \Delta s, \quad (12.11)$$

$$h = l_h + i - v - \Delta h, \quad (12.12)$$

где k — коэффициент дальномера, равный 100; c — постоянное слагаемое дальномера; Δs и Δh — приборные поправки, которые берутся со шкалы, помещенной на колонке с клиньями; i — высота инструмента; v — высота визирования.

Значения k определяются на базисе, измеряемом с ошибкой $m_s/s \leq 1/10\,000$; величина c — на малом базисе (3—5 м), измеряемом точно (до 1 мм) стальной рулеткой, при этом нельзя допускать асимметрию и неперпендикулярность рейки относительно визирного луча и значительное неравенство i и v .

Поправки Δs и Δh возникают за счет невозможности редуцировать отрезок от вершины диастимометрического угла до оси вращения прибора.

Рейки в комплекте тахеометра ТД на лицевой части имеют по два нониуса. Пользуясь основным нониусом, измеряют расстояния s — от 20 до 90 м, превышения h — от 0 до ± 90 м. Используя дополнительный нониус, можно измерять s от 20 до 180 м и превышения от 0 до ± 180 м.

Повышения точности измерения s и h в тахеометре ТД достигают благодаря наличию специального разделительного устройства, состоящего из бипризмы и щелевой диафрагмы.

На рис. 186 показан ход лучей через разделительное устройство тахеометра ТД. Диафрагма 7 установлена за окуляром 6, а бипризма 5 — перед окуляром. Верхняя половина пучка лучей, идущих от основной шкалы рейки 1 P , проходит через верх объектива 3 и строит изображение 4 в плоскости бипризмы 5, которая, преломляя полупучок, направляет его через окуляр 6 в щель диафрагмы 7 и далее в глаз наблюдателя. Другая (незаштрихованная) нижняя половина пучка лучей, идущих от шкалы рейки P , проходит через клин 2, нижнюю часть объектива 3, преломляется бипризмой 5, проходит через окуляр, встречает на своем пути преграду 7 и задерживается ею, не попадая в глаз. Точно так же срезается разделительным

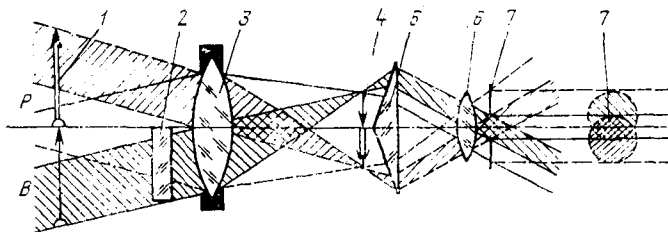


Рис. 186. Схема разделительного устройства тахеометра ТД

устройством и не доходит до глаза верхняя половина пучка лучей, идущих от верньера B .

Нижняя половина пучка лучей, идущих от верньера B через нижнюю часть объектива $З$, направляется бипризмой 5 через окуляр 6 в щель диафрагмы и в глаз наблюдателя.

В результате глаз видит не наложенные друг на друга изображения: верхнюю часть штрихов рейки и нижнюю часть штрихов верньера, т. е. разделенные ребром бипризмы четкие изображения штрихов рейки и верньера.

На оптической схеме ТД (см. рис. 184) разделительное устройство обозначено бипризмой 9 и щелевой диафрагмой 11 . Щелевая диафрагма, помещенная в выходном зрачке, создает некоторое неудобство при визировании, особенно для наблюдателя в очках (ему трудно приблизить глаз к окуляру).

Редукционный тахеометр Редта 002. В отличие от тахеометра-высотомера ТД в тахеометре Редта 002 превышения вычисляются по известной формуле (7.5). Редуцирование расстояний осуществляется подвижными клиньями 3 (рис. 187), установленными перед объективом 2 зрительной трубы с фокусирующей линзой 1 (вид сверху).

При наклоне зрительной трубы вращается большая шестерня 6 , посаженная наглухо на ось вращения трубы HH , и приводит в движение всю систему зубчатых передач $6, 5, 4$. В результате малая шестерня 4 придает вращение клиньям в оправах 3 . Клинья вращаются в разные стороны, при этом угол θ_0 будет уменьшаться (см. рис. 185) пропорционально углу наклона трубы.

Таким образом уменьшается угол δ_0 , как и в тахеометре ТД, только путем поворота подвижных клиньев.

На рис. 187 имеем горизонтальное положение

$$s = BD + c_1 + c_2, \quad (12.13)$$

где BD — горизонтальное расстояние от вершины диастимометрического угла точки B до плоскости штрихов рейки; $c_1 = AB$ — часть постоянного слагаемого (от оси вращения трубы до точки B), равная 75 мм, для приведения к горизонту отрезка c_1 на кожухе круга отсчитывается поправка; c_2 — вторая часть постоянного слагаемого, равная 36 мм, — отрезку от плоскости штрихов рейки до оси штанги, на которой установлена рейка.

Точка B определяется как пересечение продолжений лучей (падающего на первый клин и преломленного от второго клина). Если принять, что преломляющие углы клиньев одинаковы и равны каждый $\theta_0/2$, то точка B расположится посередине между клиньями.

Обозначим

$$c_1 + c_2 = c, \quad (12.14)$$

получим величину постоянного слагаемого дальномера Редта;

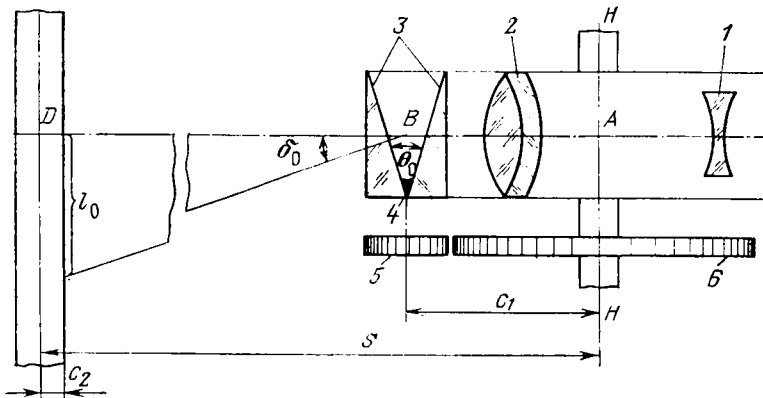


Рис. 187. Схема устройства редуцирующего механизма Редта (вид сверху)

величина

$$BD = l_0 \operatorname{ctg} \delta_0 = kl \quad (12.15)$$

и окончательно

$$s = kl + c, \quad (12.16)$$

где k — коэффициент дальномера, l — отсчет по рейке, равный

$$l = l_0 \cos v. \quad (12.17)$$

Коэффициент дальномера и постоянное слагаемое тахеометра Редта определяются так же, как у тахеометра ТД.

Обычно на заводе рейки Редта изготавливаются так, что $c = 111$ мм учитывается путем смещения нуля верньера на рейке в сторону возрастания цифр и поворотом ромб-призмы 13 (рис. 188) барабаном 12 вокруг оси 14, тогда формула (12.16) принимает более простой вид (12.6).

Если $k \neq 100$, а $c \neq 0$, то следует выполнить юстировку. Поворотом дополнительного клина 2 (см. рис. 188) последовательными приближениями добиваются $k = 100$. Установка $c = 0$ производится разворотом шкалы барабана 12 относительно

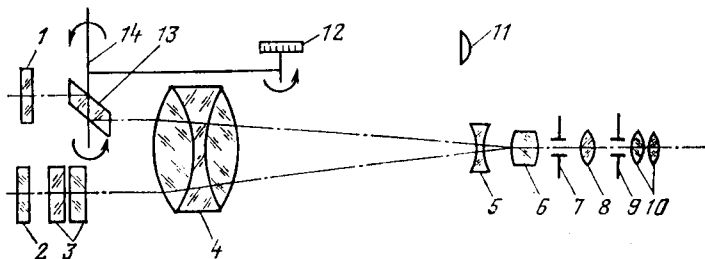


Рис. 188. Оптическая схема зрительной трубы Редта

оси его вращения (предварительно ослабляются крепежные винты барабана).

Установка $k=100$ производится следующим образом. Приводят уровень при алидаде вертикального круга в нуль-пункт. Барабаном 12 ставят отсчет, равный известной длине базиса. Вращением клина 2, установленного перед клиньями 3, совмещают соответствующие длине базиса штрихи рейки и верньера. Для контроля определение коэффициента k на базисе повторяют.

Оптическая система Редта 002, кроме того, содержит защитное стекло 1, объектив 4, фокусирующую линзу 5, бипризму 6, щелевую диафрагму 7, дополнительный объектив 8 для оборачивания изображения, плоскость изображения 9, окуляр 10 и лупу 11 для отсчитывания по шкале барабана.

В тахеометре Редта 002 раздельное устройство (рис. 189) отличается тем, что диафрагма 6 помещается внутри зрительной трубы. После диафрагмы установлен дополнительный объектив 7, оборачивающий изображение второй раз.

В результате в тахеометре Редта 002 через окуляр 9 глаз рассматривает прямое изображение 8 штрихов рейки P и верньера B . Позиции 1, 2, 3, 4, 5, 10 аналогичны позициям 1, 2, 3, 4, 5, 7 рис. 186.

В процессе измерения расстояний дальномером двойного изображения в тахеометре Редта нередко забывают перед отсчетом по рейке привести пузырек уровня при алидаде вертикального круга на середину. В этом случае положение пары клиньев не будет соответствовать действительному углу наклона визирного луча, и редуцирующее устройство будет редуцировать расстояние не на горизонтальную плоскость, а на какую-то другую (наклонную плоскость); в результате горизонтальное проложение будет ошибочным, особенно при больших углах наклона.

Уровень при алидаде вертикального круга Редта связан с большой шестерней, которая приводит в движение вращающиеся клинья.

Если $MO \neq 0$ ($MZ \neq 0$ при зенитной оцифровке), то и приведение пузырька в нуль-пункт не изменит неправильного положения клиньев. По этой причине также возникает ошибка

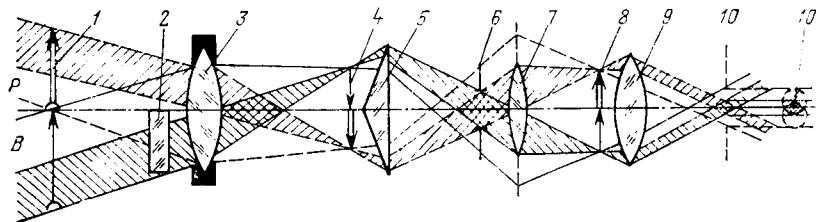


Рис. 189. Схема раздельного устройства тахеометра Редта

в горизонтальном проложении, которая возрастает с увеличением угла наклона. Место нуля равным нулю устанавливается обычным порядком (исправительными винтами уровня), только расстояние до точки визирования следует выбирать не менее 500 м, чтобы на величину места нуля не оказывало влияние смещение визирного луча ромб-призмой, равное 22 мм. При $s=500$ м ошибка в установке МО будет равна 9", т. е. будет близка к точности отсчета по шкаловому микроскопу вертикального круга.

Точность результатов измерений также зависит от правильного положения редуцирующего механизма относительно уровня при алидаде вертикального круга. Проверка этого условия называется проверкой редуцирующего механизма. На линии 20—30 м при угле наклона 5—7° измеряется s прямо и обратно. Среднее s не должно отличаться от действительного (измеренного, например, проволокой) более чем на $1/5000$. Исправление достигается исправительными винтами редуцирующего механизма, расположенными под крышкой подставки зрительной трубы по обе стороны от блока призм уровня.

Значительные ошибки в результатах измерения расстояний Редта 002 и ТД могут быть вызваны неперпендикулярностью рейки к визирному лучу, асимметрией отрезка l относительно штанги рейки и турбулентным состоянием атмосферы. Эти вопросы подробно рассматриваются в курсе геодезии [35].

§ 73. НОМОГРАММНЫЕ ТАХЕОМЕТРЫ. СТОЛИК КАРТИ

После создания первого прибора с диаграммой Гаммера, установленной в фокальной плоскости зрительной трубы, был изготовлен тахеометр, в котором диаграмма по предложению О. Феннеля размещалась на оси вращения трубы, а изображение диаграммы передавалось в фокальную плоскость на призму, закрывающую половину поля зрения трубы.

Полузакрытое поле зрения в приборах Гаммера—Феннеля, которые выпускались отдельными западными фирмами до 1960-х годов, создавало неудобства при наблюдениях, а малый радиус начальной окружности номограмм создавал большие наклоны кривых в поле зрения. Затруднялось отсчитывание по рейке при недостаточной точности результатов измерений.

С 1942 г. фирма «Карл Цейсс», Йена приступила к серийному выпуску первых тахеометров Дальта*. Тахеометр Дальта был значительным шагом вперед в то время, в нем устранялись недостатки, присущие приборам Гаммера—Феннеля.

Фирма «Керн» по предложению швейцарского геодезиста Леммана в тот же период изготовила саморедуцирующую зри-

* Дальта — тахеометр-автомат Даля. Даль — норвежский геодезист, предложивший в 1919 г. наносить диаграмму на стеклянном вертикальном круге и оптически передавать ее изображение в фокальную плоскость трубы при открытом поле зрения.

тельную трубу, в фокальной плоскости которой на небольшом стеклянном круге ($r_0=18,5$ мм) наносилась диаграмма. Круг с диаграммой устанавливался перпендикулярно к визирной оси трубы. Центр круга смещался книзу от визирной оси. При наклоне трубы круг с диаграммой автоматически вращался посредством шарикоподшипникового привода и системы зубчатых передач в отношении 4:1. Четырехкратное увеличение угла поворота диаграммы φ по сравнению с углом наклона визирной оси ν позволяло вытянуть кривые и, несмотря на малый радиус r_0 , сделать их более пологими. Поле зрения трубы тахеометра DKR, изготовленного в 1945 г. фирмой «Керн», также было открытым.

Тахеометры Дальта (1942 г.), DKR и приборы Гаммера — Феннеля имели общий конструктивный недостаток — остаточный неустранимый параллакс в фокальной плоскости трубы между изображениями кривых и нитями сетки, вызванный близостью диаграммы к фокальной плоскости. Не обеспечивалась необходимая точность результатов измерений. В тахеометрах и кипрегелях фирмы «Керн», кроме того, отсутствие основной окружности замедляло процесс измерений, требовалось раздельное наведение на рейку при измерении s и h .

В 1948 г. Народное предприятие «Карл Цейсс» изготовило тахеометр Дальта 020 (с 1969 г. — Дальта 010, позднее — Дальта 010А и Дальта 010В); с 50-х годов фирма «Вильд» выпускает тахеометр RDS; с 1954 г. фирма «Оптон» — RTa4; с начала 1960-х г. венгерское народное предприятие «МОМ» выпускает редуционный тахеометр ТаD1 (ТаD4); все эти приборы находят производственное применение и в настоящее время.

В новых номограммных тахеометрах кривые наносятся на отдельном стеклянном круге, соосном с вертикальным. Плоскость номограмм удалена от фокальной плоскости трубы, применена так называемая реверсионная оптическая система, позволившая устранить параллакс.

Тахеометр Дальта 010А предназначен для измерения горизонтальных проложений с относительной ошибкой $1/1000$ и превышений со средней квадратической ошибкой 3—10 см на 100 м по номограмме, углов горизонтальных и вертикальных с точностью шкалового теодолита. В отличие от Дальта 020 в последних моделях тахеометра применяется улучшенная зрительная труба, имеется оптический центрир. Наводящие винты алидады и трубы соосны. Закрепительный винт является общим для трубы и алидады. При вертикальном круге имеется компенсатор, обеспечивающий автоматически установку $MO=0$ в диапазоне 3—5' наклона основной оси вращения прибора.

Оптические схемы зрительной трубы, отчетного микроскопа и оптического центрира Дальта 010А представлены на рис. 190. В зрительной трубе объектив 6, фокусирующая линза 11 и оборачивающая система Порро II рода 13 строят изобра-

жские рейки в плоскости номограммы на специальном круге 14. Далее изображение рейки и номограммы через призму 20 с коллективом 21 строится микрообъективом 19 через призму 18 в плоскости сетки нитей 17, где оно рассматривается глазом наблюдателя через пятилинзовый окуляр 16. Пучок лучей после многократного преломления и отражения дает прямое изображение предмета.

Оптическая система отсчетного шкалового микроскопа горизонтального и вертикального кругов имеет независимые оптические каналы. Угломерные круги освещаются от зеркала 27 через иллюминатор 28. Часть светового пучка призмами 29 и 32 направляется на горизонтальный круг 31. Объектив горизонтального круга 30 строит изображение круга в плоскости шкалы 22 через поворотные призмы 26 и 23. Другая часть пучка лучей от зеркала 27 направляется через иллюминатор 28 призмой 7 на вертикальный круг 8; его изображение через призму 25 объективом 9 вертикального круга через призму 24 строится в плоскости шкалы 22. Изображения кругов и шкал микроскопа через призму 10, далее объективом микроскопа 12 передаются в фокальную плоскость окуляра 15, где они рассматриваются глазом наблюдателя.

Схема оптического центра включает защитное стекло 1, объектив 2, призму 3, сетку нитей 5 и окуляр 4.

Номограммные кривые, рассчитанные по формулам (7.24) и (7.25), нанесены на специальном круге 14.

Измеренные горизонтальное положение и превышение определяются по формулам

$$s = 100l_s; \quad h = \pm 10l_h, \quad (12.18)$$

где l_s и l_h — отрезки на рейке при наведении основной (начальной) окружности на высоту визирования, равную высоте прибора.

Автоматическая установка МО с точностью 1" в Дальта 010А осуществляется компенсатором. Основной частью компенсатора является свободно подвешенная на плоской пружине одна из линз объектива вертикального круга.

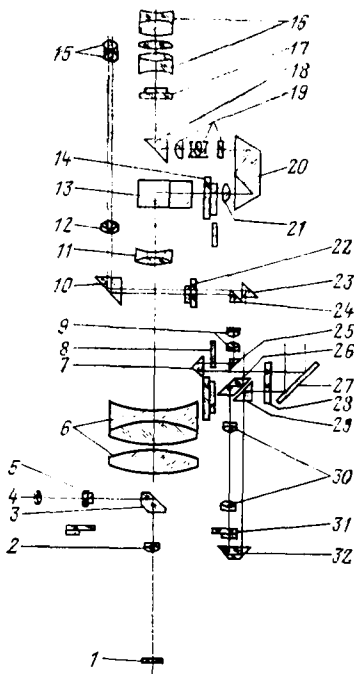


Рис. 190. Оптическая схема тахеометра Дальта 010А

В тахеометре Дальта 010В осуществляются грубая и точная фокусировка, грубое и точное перемещение наводящими винтами по азимуту и по вертикали.

В комплекте с тахеометром Дальта могут быть использованы дополнительные устройства и приборы, например столик Карти.

Столик Карти Народного предприятия «Карл Цейсс», Йена (ГДР) применяется с тахеометрами Дальта 020, Дальта 010, Дальта 010А, Дальта 010В, Редта 002, БРТ-006 и теодолитами Тео-020, Тео-030, Тео-120 для непосредственного составления тахеометрического плана в полевых условиях на каждой отдельной станции.

Известны некоторые другие картографические столики: столик-тахеограф Д. Н. Оглоблина (СССР), столик Цветанова (НРБ), столик ЮНГА (ФРГ), не получившие такого широкого распространения, как столик Карти.

Конструкция столика Карти достаточно простая (рис. 191). Во втулку 3 корпуса 2 столика с подставкой 1 устанавливается основной прибор (тахеометр) и закрепляется винтом. Алидадная часть прибора соединена с корпусом дополнительным устройством 4. При вращении алидады прибора совместно со столиком внутри столика с той же скоростью, но в обратном направлении вращается круг 13 с чертежной бумагой с помощью

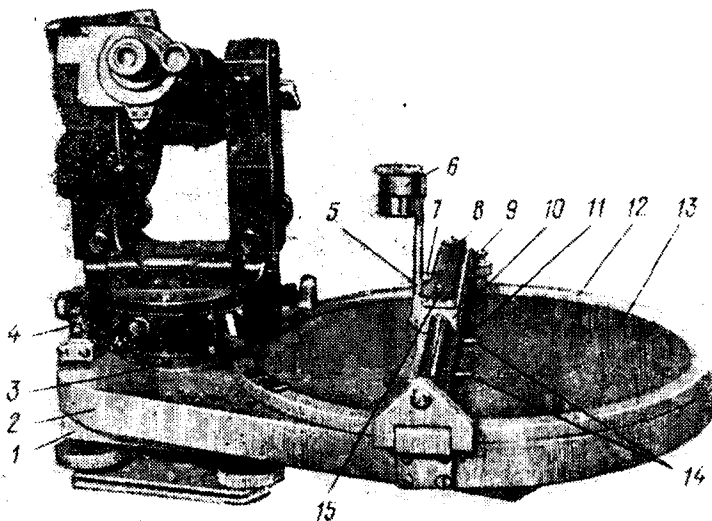


Рис. 191. Столик Карти

системы шестерен, помещенных внутри корпуса столика. Таким образом, чертеж относительно местности всегда остается неподвижным. Точки на план столика наносятся наколкой 9, укрепленной на салазках 10 и перемещающейся вместе с ними на мостике 11 параллельно коллимационной плоскости трубы. На салазках установлена масштабная линейка 8, по которой производится отсчет по индексу 5 с помощью откидной лупы 6. В комплект столика Карти входят четыре сменные масштабные линейки со шкалами для масштабов 1:1000, 1:2000, 1:2500, 1:5000, которые при диаметрах кругов 250 или 500 мм позволяют вести съемку на соответствующих расстояниях от точки стояния прибора.

Точная установка расстояний на шкале масштаба достигается благодаря использованию специального упора 15 на салазках и упоров 14 на мостике.

В качестве чертежной основы в настоящее время наряду с чертежной бумагой успешно используются прозрачные материалы из пластмасс.

Укладка и замена чертежной основы производятся после откидывания кольца 12 с мостиком 11; предварительно открепляется специальная клемма 7.

Работа при съемке на столике Карти заключается в следующем. Наносится иглой 9 на чертежную бумагу в центре круга точка стояния прибора при установке индекса 5 на отметке 0 шкалы масштаба 8. Зрительная труба (вместе с ней вращается столик с мостиком) наводится на предмет местности (на рейку). Измеренное горизонтальное проложение откладывается по индексу 5 на линейке и накаливается иглой 9. У полученной точки (пикета), так же как и у точки стояния, подписывается наблюдателем отметка, при этом мостик приподнимается и находится в фиксированном положении, что создает удобство при рисовке контуров и горизонталей. Тот же метод нанесения применяется при съемке всех других точек местности.

Последние модели столика Карти выпускаются с переходной втулкой, позволяющей поднять прибор над столиком так, что окуляры трубы и микроскопа и поверхность столика находятся на удобных для отсчетов и записей высотах.

Тахеометр РТа 4 («Оптон», ФРГ) мало отличается от тахеометра Дальта 010А. На круге с номограммой в тахеометре РТа 4 нанесена третья кривая горизонтальных проложений с коэффициентом $K_s = 50$. Перестановка горизонтального круга осуществляется специальным устройством, однотипным с устройствами точных оптических теодолитов (Т2 и 2Т2); имеется несомная конструкция закрепительных и наводящих винтов и обычная для приборов фирмы «Оптон» подставка прибора.

Тахеометр РДС («Вильд», Швейцария) отличается от тахеометра Дальта 010А наличием планетарной передачи

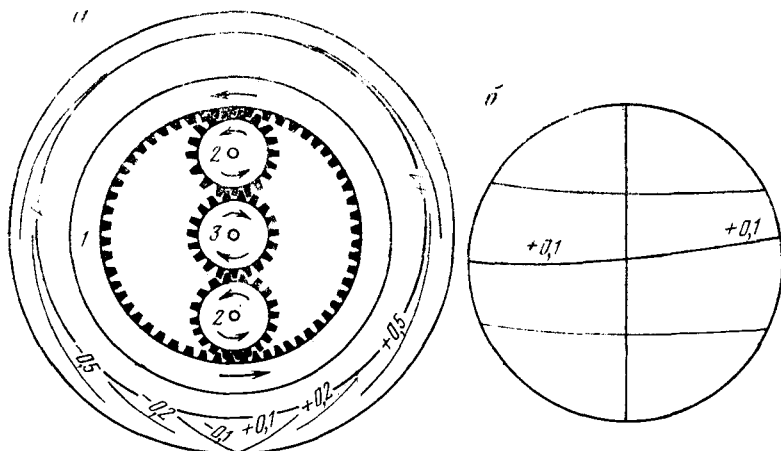


Рис. 192. Планетарная передача в тахеометре РДС и поле зрения трубы

(рис. 192, а), увеличивающей угол поворота диаграммы по сравнению с углом наклона визирной оси в 4 раза.

Благодаря этому кривые наносятся вытянутыми по всему кругу, а в поле зрения трубы (рис. 192, б) изображения кривых получаются с малым наклоном к начальной окружности. Действия планетарной передачи можно усвоить по рис. 192, а. Большая шестерня 1 с радиусом, равным трем радиусам малых шестерен, вращается вместе со зрительной трубой и вращает шестерни-сателлиты 2, через которые вращение передается на центральную малую шестерню 3, жестко соединенную с кругом номограммы.

При повороте трубы на угол ν в одну сторону круг с номограммой вращается на 3ν в обратную сторону. Это позволяет вытянуть в 4 раза кривые, сделать их более пологими и создать благоприятные условия для отсчитывания по рейке. Вместе с тем механические ошибки зубчатых передач не дают возможности значительно повысить точность измерения превышений.

В тахеометре РДС отсутствует компенсатор, поэтому перед отсчетом по рейке необходимо приводить на середину пузырек уровня вертикального круга.

Тахеометр Та Д4 («МОМ», ВПР), конструкция Беззегга [46], является номограммным тахеометром с круговыми кривыми. В тахеометре Та Д4 кривые нанесены на круге, соосном с вертикальным. Наклон зрительной трубы тахеометра на угол ν влечет за собой поворот круга с номограммой на $(-\nu)$. Суммарный угол поворота номограммы составляет 2ν . Кривые на круге нанесены в виде дуг окружностей с различными центрами. Круговые кривые номограммы превышений пересекаются

с начальной окружностью так, что отсчетывание положительных превышений производится только над ней, а отрицательных — под ней.

Измерение превышений и горизонтальных проложений по номограмме тахеометра Та Д4 осуществляется при двух положениях вертикального круга.

Кривые наносятся с коэффициентом $K_h = \pm 20$ и ± 50 ; $K_s = 100$ и 200. Номограмма проста в построении. Отсутствие кривых с $K_h = \pm 10$ снижает точностные качества номограммы Беззегга.

Советские номограммные тахеометры ТН и 2ТН разработаны на базе теодолитов Т5К и 2Т5К. Номограммы нанесены на отдельных кругах, соосных с вертикальными. В отличие от тахеометров Дальта в тахеометрах ТН, 2ТН (рис. 193) кривые на круге 3 размещены не снаружи, а к центру от основной окружности (см. рис. 107, б).

В тахеометре 2ТН, как и в теодолите 2Т5К, применена секторная симметричная оцифровка вертикального круга. При месте нуля вертикального круга, равно нулю (что достигается с помощью компенсатора), отсчет по кругу соответствует углу наклона визирного луча. Горизонтальный круг и осевая система тахеометра унифицированы с теодолитом 2Т5К. На горизонтальном круге укреплен круг-искатель 1, позволяющий быстро ориентировать прибор. Когда не требуется измерение вертикальных углов, верхняя половина поля зрения отсчетного микроскопа закрывается поворотом рукоятки, расположенной под зеркалом подсветки.

В отличие от теодолита 2Т5К в тахеометре 2ТН изменена оптическая схема отсчетной системы вертикального круга. Для удобства работы и большей стабильности исправление места нуля вертикального круга в полевых условиях осуществляется двумя юстировочными винтами, как в теодолитах с уровнем при вертикальном круге (например, 2Т2).

В тахеометрах применена апохроматическая зрительная труба 2 типа ГД-302 (как и в теодолите Т2), обеспечивающая высокое качество изображения. В фокальной плоскости зрительной трубы с помощью двух пар линз оборачивающей системы телеобъективом строится прямое изображение наблюдаемых предметов. При положении круг лево в поле зрения окуляра зрительной трубы наблюдатель рассматривает одно-

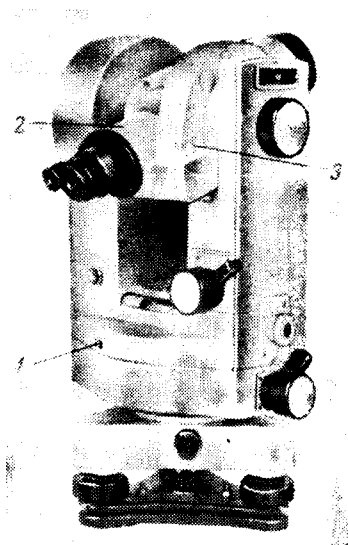


Рис. 193. Тахеометр 2ТН

временно вертикальную нить сетки, изображение рейки и кривые: начальную (О), горизонтальных проложений (s), превышений. На сетке нитей нанесены также два коротких дальних штриха.

Тахеометр 2ТН выпускается со столиком. Соединение со столиком может выполняться через промежуточный кронштейн, приподнимающий тахеометр над планшетом. В комплект тахеометра входят две складные рейки с уровнями и выдвижными пятками. Форма раскраски рейки, чередование цветов и цифровка исключают возможность появления грубых ошибок в отсчетах, особенно при больших расстояниях.

§ 74. НОМОГРАММНЫЕ КИПРЕГЕЛИ. ОБЛЕГЧЕННАЯ МЕНЗУЛА

Кипрегель номограммный (КН) с облегченной мензурой выпускается отечественной промышленностью. Кипрегель КН (рис. 194) имеет апохроматическую зрительную трубу, дающую прямое изображение (объектив 1, фокусирующее устройство 26, вращающийся окуляр 19). Зрительная труба закрепляется в приданном ей положении закрепительным винтом 22 рычажного типа, соосным с наводящим винтом трубы 23. В корпусе 20, кроме винтов трубы, смонтирован цилиндрический уровень при вертикальном круге (на рисунке не виден) с винтом уровня 25. С обратной стороны торца винта 25 (снизу) имеется исправительный винт уровня. Вертикальный круг помещается в корпусе 2, наглухо скрепленном с трубой. При повороте трубы вертикальный круг остается неподвижным (вращается только корпус 2). В корпусе также установлен уровень при трубе с зеркалом 24 и крышкой 21, закрывающей доступ к исправительным винтам уровня.

Верхняя часть кипрегеля соединена с основной линейкой 16 колонкой 3. Узкая линейка 15 соединяется с основной линейкой шарнирами 5 и защелкой 13. Скошенный край линейки перемещается параллельно самому себе.

На узкой линейке крепится и передвигается вдоль нее масштабная линейка 14 с наколкой 6. Всего в комплект входят четыре масштабные линейки с масштабами 1:1000, 1:2000, 1:2500 и 1:5000.

Грубое наведение зрительной трубы на цель осуществляется с помощью выступа-визира 27 на трубе.

В комплект прибора входит облегченная мензула. Она состоит из мензурной доски 7, подставки с диском 8, фрикционно сцепленной с доской, станового винта 11, штатива 10, наводящего винта 9, подъемных винтов 12, вращением которых планшет приводится в горизонтальное положение по уровню 18 на линейке кипрегеля. Уровень на линейке имеет исправительный винт 17. В комплект мензулы и кипрегеля входит ориентир-буссоль 4.

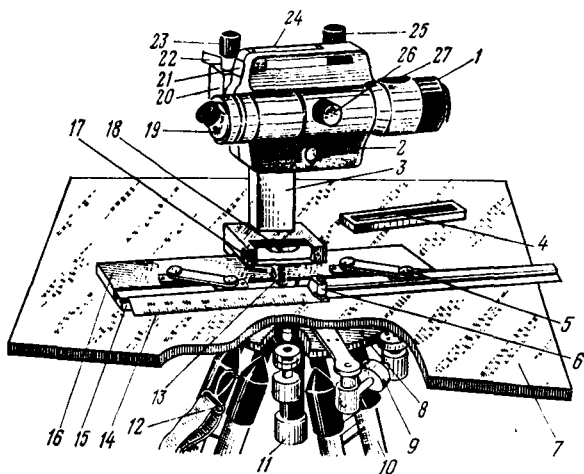


Рис. 194. Кипрегель КН с облегченной мензулой

Оптическая схема кипрегеля представлена на рис. 195. Изображение рейки строится телеобъективом (объектив 1—4, фокусирующая линза 5) в плоскости номограммы на вертикальном круге 17 через поворотную призму 6. Далее изображение рейки вместе с изображением номограммы и штрихов вертикального круга передается в фокальную плоскость окуляра на сетку нитей 10 (оборачивающей системой 15—11, коллективом 16 и призмой 7). Через вращающийся окуляр 8 с полупентапризмой 9 глаз наблюдателя рассматривает в поле зрения трубы картину, представленную на рис. 108, б.

Кипрегель КН с облегченной мензулой имеет существенные преимущества по сравнению с комплектом кипрегеля КА-2 с металлической мензулой.

У кипрегеля КН повышена до 30" точность отсчета по вертикальному кругу. Удобство в работе наблюдателя с прибором

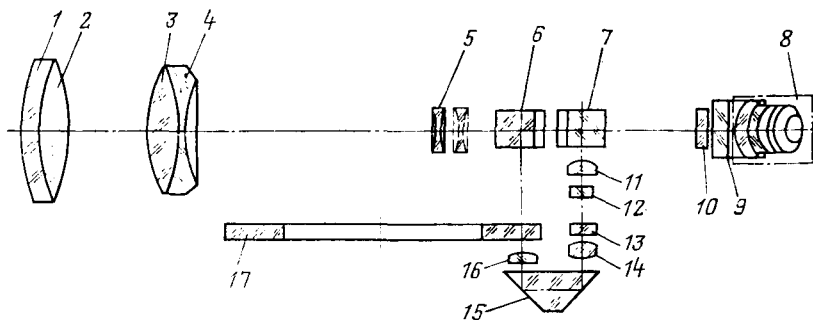


Рис. 195. Оптическая схема кипрегеля КН

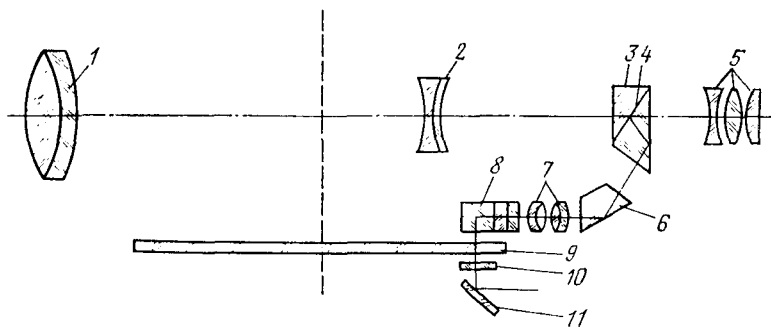


Рис. 196. Оптическая схема кипрегеля КА-2

создается наличием облегченной и устойчивой мензулы, сменных масштабных линеек с наколками, зрительной трубы высокого качества с прямым изображением, открытым полем зрения и вращающимся окуляром.

Конструкция нового мензульного комплекта отвечает повышенным требованиям производства съемок крупных масштабов в равнинных районах.

В топографо-геодезических производственных подразделениях нашей страны еще в значительных количествах имеется и продолжает использоваться номограммный кипрегель КА-2 с металлической мензулой.

Кипрегель КА-2 имеет зрительную трубу, строящую обратное изображение. Зрительная труба не имеет изломов, а изображение круга с номограммой передается особым оптическим каналом (рис. 196). Телеобъектив (1, 2) строит изображение рейки в фокальной плоскости окуляра 5, совпадающей с посеребренной полоской 4 на блок-призме 3. Изображение вертикального круга передается пучком лучей от зеркала 11 через защитное стекло 10, круг 9, призмы 8 и 6 и микрообъектив 7 на полоску 4.

Изображение кривых и штрихов круга рассматривается глазом наблюдателя через окуляр 5. Поле зрения трубы кипрегеля КА-2 показано на рис. 197.

Номограммный кипрегель МА-5 («МОМ», ВНР) в отличие от кипрегеля КН имеет точность отсчета по вертикальному кругу, равную 1', и светопропускание трубы 35—40% (у КН — 43—44%).

В кипрегеле МА-5 имеется уст-

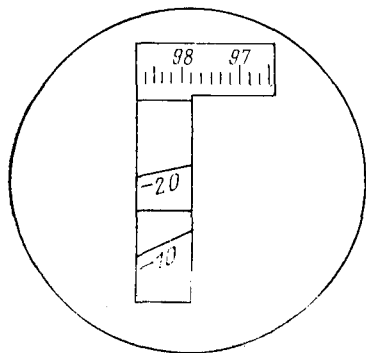


Рис. 197. Поле зрения трубы кипрегеля КА-2

ройство для наклона колонки, обеспечивающее точную юстировку горизонтального положения оси вращения трубы.

Номограммные кипрегели РК («Керн», Швейцария) и РК1 («Вильд», Швейцария) в части номограмм не имеют принципиальных отличий от номограмм тахеометров, выпускаемых этими фирмами (DKP и PDC). В табл. 23 приводятся основные технические характеристики номограммных кипрегелей.

§ 75. НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ НОМОГРАММНЫХ ПРИБОРОВ. ТОЧНОСТЬ ПРИБОРОВ

1. На стадии разработки и выпуска приборов с номограммами целесообразно:

— иметь большой радиус основной окружности, чтобы уменьшить наклон кривых превышений с малым коэффициентом ($K_h = \pm 10$);

— точно центрировать круг с номограммой (с ошибкой 2—3 мкм) и иметь доступ к исправлению децентрировки круга;

— иметь равным нулю место нуля кривых превышений, когда место нуля вертикального круга равно нулю, иметь доступ к устранению этой неисправности;

— наносить на круг кривые с предельной ошибкой по радиусу не более 3 мкм и $12''$ в полярном угле;

— иметь толщину кривых 2—3 мкм;

— добиваться полного устранения параллаксов при юстировке и эксплуатации прибора.

2. В процессе эксплуатации номограммных приборов важно:

— до начала полевых работ тщательно определить коэффициенты кривых по формулам

$$K_s = K_{s_0} \frac{s_0}{s}; \quad K_h = K_{h_0} \frac{h_0}{h}, \quad (12.19)$$

где $K_{s_0} = 100$; 200 и 50 — номинальные значения коэффициентов кривых горизонтальных проложений; $K_{h_0} = \pm 10$; ± 20 ; ± 50 ; ± 100 — номинальные значения коэффициентов кривых превышений; s_0 и h_0 — точные (эталонные) значения горизонтального проложения и превышения, определенные с ошибками $m_s/s = \pm 1/3000$; $m_h = 3$ мм; s и h — значения, измеренные по номограмме.

Базисы выбираются так, чтобы $s = 60 \div 100$ м; $v \geq 3 \div 5^\circ$.

Относительные ошибки определения K_s и K_h не должны превышать 0,1 %;

— устанавливать значение МО равным нулю при средней температуре рабочего дня;

— устанавливать $\overline{МО} = 0$ ($\overline{МО}$ — место нуля кривых превы-

шений, $\overline{МО} = \frac{h_{пр} + h_{об}}{2}$) из двойного нивелирования наклонным лучом при $s = 60 \div 100$ м; $v \geq 3 \div 5^\circ$;

— перед отсчетом превышений по кривой приводить пузырек уровня при алидаде вертикального круга в нуль-пункт;

— иметь рейки с уровнями;

— иметь раскраску реек, обеспечивающую отсчет только на светлой шашке.

3. По точности номограммные приборы в полной мере заменяют обычные круговые тахеометры и кипрегели, при этом в среднем в два раза повышается производительность труда [24].

Средняя квадратическая ошибка определения превышения на 100 м расстояния по кривым $K_h = \pm 10$ не превышает 3 см (Дальта 020 и ТН).

Предельная невязка высотного хода длиной 1 км методом из середины составляет 11 см, при длинах визирных лучей до 200 м и неравенстве «плеч» — до 45 м.

§ 76. РЕДУКЦИОННЫЕ ТАХЕОМЕТРЫ С БАЗОЙ В ТОЧКЕ СТОЯНИЯ ПРИБОРА

Тахеометр внутрибазный (ТВ), выпускаемый в СССР с 1969 г., предназначен для измерения горизонтальных проложений с относительной ошибкой 1:1000, горизонтальных и вертикальных углов с ошибкой 30" и превышений с ошибкой 3 ÷ 5 см на 100 м. Общий вид тахеометра ТВ показан на рис. 198.

На подставке 2 прибор закрепляется винтом. В корпусе 3 размещен горизонтальный круг со штриховым микроскопом 15 и устройством для перестановки лимба. Закрепление и точное наведение алидады горизонтального круга осуществляется со-

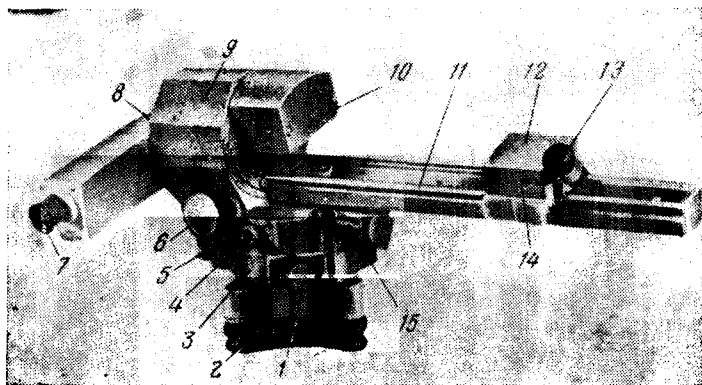


Рис. 198. Тахеометр ТВ

осно расположенными винтами 1. Оптический центр 4 вмонтирован в алидадную часть прибора. Имеется цилиндрический уровень 5 для приведения основной оси в отвесное положение.

Система осей цилиндрическая, неповторительная. Наведение на предмет грубо выполняется оптическим визиром 8, точно — зрительной трубой с окуляром 7 и закрепительным винтом 6. В колонке 9 помещаются неподвижные кольцевые клинья, на одном из которых нанесены штрихи вертикального круга. Клинья вместе с неподвижной и подвижной пентапризмой 10 и 12 и линейкой 11 составляют основную часть дальномера и редуцирующего устройства. Отсчет по линейке производится через лупу 13, около которой имеется рукоятка 14 для юстировки изображения.

Оптическая схема тахеометра ТВ (без системы горизонтального круга) приведена на рис. 199. Часть пучка лучей от предмета попадает на неподвижную пентапризму 2, далее на призму-крышу 6 и направляется на верхнюю часть объектива 8 зрительной трубы; другая часть пучка от предмета улавливается призмой 1 путем ее перемещения на линейке и идет через ромб-призму 3 на неподвижные клинья 4, 5 в сечение, которое соответствует углу наклона визирной оси, затем через ромб-призму 7 и призму-крышу 6 направляется на нижнюю часть объектива 8.

Телескоп 8 и 9 строит два полуизображения предмета в фокальной плоскости сетки нитей 10, которые рассматриваются глазом наблюдателя через окуляр 11.

Расстояние до предмета определяется из треугольника, вершинами которого являются точка (предмет) и точки пересечения лучей в пентапризмах 1 и 2. Наличие неподвижных клиньев 4, 5 позволяет автоматически привести наклонное расстояние к горизонту.

Величина горизонтального проложения в метрах отсчитывается на базисной линейке с учетом коэффициента, равного 200, и цены деления линейки, равной 0,5 см.

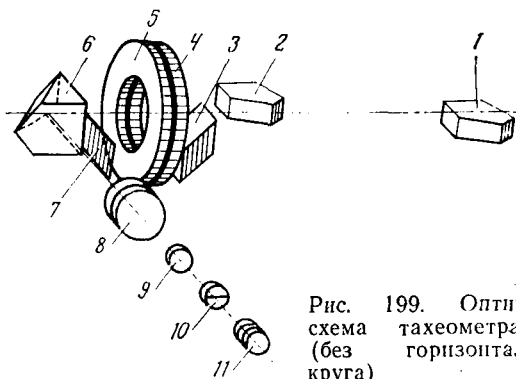


Рис. 199. Оптическая схема тахеометра ТВ (без горизонтального круга)

Если полуизображения растянуты или сжаты, то рукояткой осуществляется регулировка.

Длины до 60 м тахеометром ТВ измеряются без рейки, путем наведения на удлиненный вертикально стоящий предмет. С использованием 60-сантиметровой рейки, входящей в комплект прибора вместе с вехой, измеряются длины до 180 м.

Во внутрибазном тахеометре БРТ-006 («К. Цейсс», ГДР) редуцирование наклонных расстояний осуществляется с помощью полулинз.

Основные технические характеристики внутрибазных тахеометров приводятся в табл. 22.

§ 77. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТАХЕОМЕТРЫ

Появлению и развитию электронно-оптических тахеометров предшествовало создание и усовершенствование топографических светодальномеров, а также использование фоторегистрации изображений шкал в геодезических приборах.

Успехи, достигнутые в области микроэлектроники, и применение в светодальномерах полупроводникового диода на арсениде галлия (Ga As) в качестве излучателя и модулятора* позволили создать в начале 1970-х годов вполне транспортабельные, полевые, управляемые с помощью мини-ЭВМ электронно-оптические тахеометры.

В настоящее время ряд зарубежных фирм и предприятий социалистических стран разрабатывают и выпускают малогабаритные электронно-оптические тахеометры.

Определились два основных направления в их развитии:

— электронно-оптические тахеометры с визуальным отсчитыванием по угломерным кругам и автоматическим измерением расстояний;

— электронно-оптические тахеометры с автоматической регистрацией результатов измерений.

К первой группе относятся электронно-оптические тахеометры Di 3s+T2 («Вильд», Швейцария); Di 4s+T2, T1, T16 («Вильд», Швейцария); DM502+DKM2A, K1-C («Керн», Швейцария), ЕОТ 2000 («К. Цейсс», ГДР), Та5 (СССР) и др.

Ко второй группе относятся электронно-оптические тахеометры Ельта 2 («Оптон», ФРГ), Геодиметр 710 («АГА», Швеция), Тахимат ТС1 («Вильд», Швейцария) и др.

Основные технические характеристики электронно-оптических тахеометров приводятся в табл. 24.

* В 1965 г. первый малогабаритный светодальномер ГД-314, разработанный в СССР, в ГОИ им. С. И. Вавилова, удостоен золотой медали на выставке в Брюсселе. Впервые в качестве излучателя и модулятора в этом светодальномере был применен Ga As. Подробно см.: Попов Ю. В., Утенков Б. И., Калинин В. И., Тельтевский В. Н., Борейко В. М. Малогабаритный светодальномер ГД-314.— Геодезия и картография, № 1, 1967.

Основные технические характеристики электронно-оптических тахеометров

Технические характеристики	Тип прибора, страна-изготовитель					
	Таб. СССР	ЕОТ 2000, ГДР	D13S+T2, Т16, Т1, Швейцария	D1AS+T2, Т16, Т1, Швейцария	DM502+DKM2A, К1.С, Швейцария	Reg Elta 14, ФРГ
Зрительная труба	Совмещ. 25 35	Совмещ. 30 40	Раздел. —	Раздел. —	Раздел. —	Совмещ. 25 35
Увеличение	95	86	Зависит от теодолита	Зависит от теодолита	Зависит от теодолита	—
Диаметр входного зрачка, мм	70	86	То же	То же	То же	0,2" 0,6" 4/11"
Диаметр входной части: диаметр круга:	0,0018 гон 0,0030 гон 3,5"/2" 30"	0,1" 0,1" 4'/03" 20"	То же	То же	То же	—
точность оценки: горизонт:	2—2000	0—3000	0—2000	0—5000	0—2000	1200 500
горизонт:	1000	1500	1000	1000	1200	—
Диапазон/точность компенсатора	2000	2000	1600	1600	2000	—
Цилиндрический уровень на алидаде	5000	3000	2000	5000	2000	1200
Дальномерная часть:	15—20	10	5+5, км	5+5, км	5+5, км	10
Диапазон D, м:	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs
с одной призмой	Визуальный	Визуальный	Визуальный	Визуальный	Визуальный	Код
с тремя призмами	—	—	—	—	—	—
максимальный	—	—	—	—	—	—
m, мм при Smax	—	—	—	—	—	—
Излучатель	—	—	—	—	—	—
Метод считывания кругов	—	—	—	—	—	—
Наличие регистра или памяти (емкость)	—	—	—	—	—	—
Возможность записи:	—	—	—	—	—	—
на перфолену (число дорожек)	—	—	—	—	—	—
на магнитную ленту	Да	Да	Да	Да	Да	Да (5—8)
Время измерения, с	≤20	10	10	10	8	10
Масса, кг:	7,8	10,5	2+6,0	2,4+6,0	1,6+6,0	21,5
тахеометра	3,8	8,5	3,0	3,0	2,8	—
блока питания	0,8—2,0	6,5	—	—	—	—
штатива	5,4	—	—	—	—	—
вехи	1,0	—	—	—	—	—

Тип прибора, страна-изготовитель

Технические характеристики	Тип прибора, страна-изготовитель				
	Ельга 2, ФРГ	Ельга 4, ФРГ	НР 3820А, США	Геодиметр 710, Швеция	Тахимат ТС1, Швейцария
Зрительная труба	Совмещ.	Совмещ.	Совмещ.	Совмещ.	Совмещ.
Увеличение	30	25	30	30	25
Диаметр входного зрачка, мм	60	40	66	60	34
Угломерная часть:					
диаметр круга:	98	98			80
горизонт.	98	98			80
точность оценки:					
горизонт.	0,2"	0,1'	0,6"	0,3"	0,6" (6 ^{СС})
верт.	0,6"	0,1'	1,3"	0,5"	1,0" (10 ^{СС})
Диапазон/точность компенсатора	4'/1"	Уровень 15"	4'/1"	4'/3"	5/1"
Цилиндрический уровень на алидаде	—	—	—	20"	30"
Дальномерная часть:					
диапазон D, м:	3—5000	3—3000	0—5000	0—10 000	0—5 000
с одной призмой	1600	1600		1700	1000
с тремя призмами	5000	3000		3500	1600
максимальный	10±2/км	10 ± 2/км	5±1/км	5±1/км	5000
m ₃ мм при 5"пах	GaAs	GaAs	GaAs	He — Ne лазер	5±5/км
Излучатель	Код	Инкремент	Код	Инкремент	GaAs
Метод считывания кругов	200 слов	—	—	14 разрядов	Инкремент
Наличие регистра или памяти (емкости)	(1 блок)	—	—	—	200 блоков X 256 бит.
Возможные записи:					
на перфоленду (число дорожек)	Да (5—8)	Да (5—8)	Да (5—8)	Да (5—8)	—
на магнитную ленту	—	—	—	—	—
Время измерения, с	2—5	2—5	5—10	10—15	4—15
Масса, кг:					
тахеометра	12	6,5	9,5	14,2	9,8
блока питания	—	—	—	6,6	3,0
отражателя	—	—	—	—	—
штатива	—	—	—	—	—
вехи	—	—	—	—	—

Тахеометр Та5*, первый советский электронно-оптический тахеометр, предназначен для производства полигонометрии 2 разряда тахеометрических и инженерно-геодезических работ. На рис. 200 представлен общий вид тахеометра Та5.

На стандартной подставке 2 с подъемными винтами 1 установлена и закреплена винтом верхняя подвижная часть тахеометра с коаксиальной зрительной трубой, совмещающей функции зрительной трубы теодолита и приемопередающей трубы светодальномера (на рис. 200 виден окуляр трубы 7); отсчетным микроскопом (окуляр микроскопа 8); уровнем 6;

оптическим визиром 9; оптическим центриром; соосными закрепительными и наводящими винтами алидады 12 и трубы 11.

На лицевой панели 5 электронного вычислительного блока имеются рукоятки управления 13, стрелочного прибора, переключателя рода работы регулятора уровня сигнала, цифровое табло 4, наборное поле с цифровыми и буквенными клавишами 3. На панели коммутации установлены переключатели ввода поправок за изменение атмосферных условий и места зенита, имеется переключатель для измерения расстояний до 1 км и больших. Для периодической поверки прибора под съемной крышкой панели коммутации имеется гнездо, через которое подключается частотомер. Для удобства переноски тахеометра имеется ручка 10.

Функциональная схема тахеометра конструктивно воплощена в одном цельном приборе в виде угломерной и дальномерной частей и вычислителя на микропроцессорах.

Угломерная часть прибора создана на базе теодолита 2Т5К с компенсатором при вертикальном круге, с визуальным отсчитыванием по кругам в градусной системе. Цена деления вертикального и горизонтального кругов равна 1 гон ($0,9^\circ$), цена деления шкал микроскопа равна 0,01 гон ($0,54'$). Возможная точность отсчитывания по шкалам — 0,001 гон, что составляет

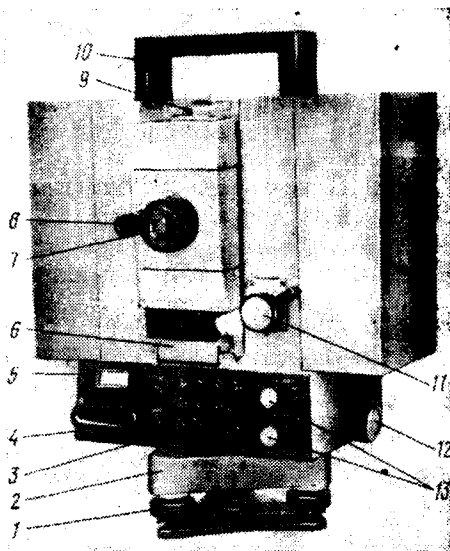


Рис. 200. Тахеометр Та5

* В. В. Абрамовских, М. А. Болотов, А. И. Захаров и др. Тахеометр Та5.— Геодезия и картография, 1983, № 1, с. 49—51.

3,2". Отсчеты по кругам могут быть записаны в журнал или внесены в регистр памяти вычислителя через клавиатуру.

Дальномерная часть тахеометра, созданная на базе светодальномера ЗСМ2 («Блеск»), обеспечивает (по результатам испытаний) измерение расстояний в диапазоне от 2 до 3—5 км со средней квадратической ошибкой 1,5—2 см импульсным методом. В режиме «грубо» излучение модулируется последовательностью коротких импульсов с частотой 149,85 кГц; в режиме «точно» — последовательностью коротких импульсов с частотой 14985 кГц. Функциональная электронная схема, применяемая в тахеометре Та5, приведена в главе 11 (см. светодальномеры СМ5 и ЗСМ2).

Неоднозначность измерения расстояний до 1000 м разрешается автоматически благодаря использованию вспомогательного генератора, частота которого подстраивается под частоту опорного генератора с помощью фазовой автоподстройки так, что на выходе ФЭУ в режиме «точно» обращается сигнал с частотой 14985 кГц, а в режиме «грубо» — с частотой 14,585 кГц.

При появлении помех в створе измеряемой линии и при сильных атмосферных флуктуациях оптического сигнала в приборе автоматически осуществляется блокировка счета, что исключает получение ложных результатов.

На семизначном табло высвечивается результат измерения наклонного расстояния в миллиметрах как разность отсчетов в режимах «дистанция» и «ОКЗ» — оптическое короткое замыкание.

Постоянная поправка тахеометра приводится к нулю путем установки контрольного отсчета, указанного в паспорте прибора. Для каждого конкретного отражателя, входящего в комплект, указывается своя приборная поправка.

Вычислительный блок на микропроцессорах имеет клавишное наборное поле и выход на внешнее регистрирующее устройство. В соответствии с заданной программой в тахеометре Та5 автоматически регистрируется информация об измеренном наклонном расстоянии, а через клавишное поле вводится информация об измеренных горизонтальных и вертикальных углах (или направлениях). В вычислительном блоке решаются задачи и выдаются на цифровом табло по требованию исполнителя горизонтальное проложение, превышение, приращения координат и зенитное расстояние.

В комплект прибора входят тахеометр, два отражателя, два источника питания, три штатива, две вехи, зарядное устройство, термометр и запасные части с принадлежностями.

Сравнительно небольшая масса тахеометра (7,8 кг), блока питания (3,7 кг), отражателя (0,8 кг — из 1 призмы и 2 кг — из 7 призм) и вехи (1 кг) обеспечивает успешное применение тахеометра Та5 на массовых топографо-геодезических работах.

Тахеометр ЕОТ 2000 широко применяется на топографо-геодезических работах в СССР.

Угломерный блок тахеометра создан на базе теодолита Тео-010А с визуальным отсчетом по кругам и компенсатором при вертикальном круге. Дальномерный блок обеспечивает автоматическое измерение расстояний со средней квадратической ошибкой 1 см при дальности от 0,2 до 3000 м. Результат измерения расстояния передается на цифровое табло (7 разрядов). Наличие микропроцессоров и пульта управления позволяет осуществить в приборе ввод и накопление данных, вычисление горизонтального расстояния, превышения с введением атмосферной поправки. В приборе имеется специальный вывод для подключения и передачи информации на внешнее регистрирующее устройство. Зрительная труба тахеометра служит для визирования, передачи и приема светового луча дальномера. С 1981 г. предприятие выпускает электронный тахеометр Рета, с 1982 г. — автоматический светотахеометр Рета.

ТахимаТ ТС1, разработанный совместно фирмой «Вильд» (Швейцария) и фирмой «Серсел» (Франция) [47], содержит светодалномер с диодом на GaAs; коаксиальную трубу; круги с растровыми решетками; регистрирующее устройство (GRE-1) для автоматической регистрации отсчетов на кассетной ленте; преобразователь данных (GLE-1), осуществляющий считывание данных с магнитной ленты и передачу их для обработки на ЭВМ и последующего направления на печатающее устройство. Тахеометр снабжен оптическим центриром и устройством для принудительного центрирования, компенсатором при вертикальном круге.

Оба круга тахеометра опрашиваются автоматически электронным способом. На кругах в большом количестве нанесены радиальные штрихи (отражательные растровые радиальные решетки). Опрос освещенных кругов производится по системе «да» — «нет» (инкрементальный метод). Повышение точности отсчета достигается совмещением диаметрально противоположных штрихов и интерполированием.

Для ориентирования вертикального круга измеряется зенитное расстояние на вспомогательную точку. Микро-ЭВМ вычисляет поправку за место зенита и вводит ее в отсчет по вертикальному кругу. Средняя квадратическая ошибка измерения при двух положениях трубы горизонтального направления $6''$ ($2''$), вертикального $10''$ ($3''$).

Расстояние измеряется по принципу обычной цифровой фазометрии. Источником света служит люминесцентный диод с непосредственно модулированным излучением в ИК-диапазоне (885 нм) на двух частотах. Вводится поправка, учитывающая метеорологические условия и постоянное слагаемое. Измерение ведется по одной из программ короткой, нормальной и для больших длин. Время измерения 4, 8 и 15 с. Средняя квадратическая ошибка измеренного расстояния равна $5 \text{ мм} + 5 \text{ мм/км}$.

Регистрирующее устройство с кассетной магнитной лентой устанавливается на верху прибора. Емкость одной кассеты 1800—2000 блоков (1 блок=8 слоев=64 знака=256 бит) *. Результаты измерений фиксируются на магнитной ленте в виде блоков данных, занимающих на ленте каждый блок 16 мм длины, с плотностью записи 16 бит/мм. Запись может производиться в виде блоков двух типов: «измерительного», содержащего данные о горизонтальных и вертикальных углах, наклонных расстояниях, горизонтальных проложениях и превышениях, и «кодowego», содержащего в закодированном виде информацию об опорных пунктах, виде съемки, съемочных точках и т. п.

Геодиметр 710 [48] в отличие от Тахимата ТС1 имеет в качестве источника света He-Ne лазер, излучение которого модулируется ячейкой Керра. Оба круга тахеометра также сканируются электронным способом. Растр каждого угломерного круга освещается и проектируется на диаметрально противоположную сторону этого круга, где образуются муаровые полосы, дающие импульсные сигналы для получения синусов и косинусов. Измеренные и вычисленные величины высвечиваются на табло и могут через клавиатуру регистрироваться на перфоленте (Геодат 700) или полупроводниковом накопителе (Геодат 200) для последующей передачи на ЭВМ.

При благоприятных условиях Геодиметр 710 обеспечивает измерение расстояний до 10 км.

В последние годы фирма АГА выпустила новый электронный тахеометр Геодиметр-140, имеющий меньшую массу (8,5 кг), малую чувствительность к внешним воздействиям и более простое обслуживание. Применен принципиально новый способ отсчитывания по кругам, имеется компенсатор и предусмотрена односторонняя телефонная связь с точкой визирования по лазерному лучу. Прибор оборудован счетнорешающим и регистрирующим устройствами.

Ельта 2 [50] — регистрирующий секундный тахеометр, имеет кодовые угломерные круги и непрерывно вращающийся микрометр с плоскопараллельной пластинкой, совмещающей диаметрально противоположные штрихи лимба.

Интегральные геодезические системы. С конца 1970-х годов в топографо-геодезическом производстве применяются интегральные геодезические системы типа «Геос I», «Геомап» и другие, включающие следующие основные приборы: электронный тахеометр, настольную ЭВМ и автоматический координатограф (графопостроитель). Такие системы обеспечивают единство процесса создания карты или плана: полевые работы, обра-

* К. Шеннон — основатель теории информации предложил меру множества информации — энтропию — определять в «битах», «дитах» или «ни-тах», соответственно основаниям логарифмов: 2, 10, e. Таким образом, «бит» есть единица энтропии при основании логарифмов 2.

ботку результатов измерений, составление и вычерчивание плана или карты.

Автоматический координатограф Dz7 (США) позволяет вычерчивать (карандашом, тушью или гравированием) изображения контуров или горизонталей со скоростью 90—280 мм/с (максимальное ускорение достигает 1 м/с²). Размеры стола 1,0×1,2 м. Разрешающая способность 0,01 мм, средняя ошибка 0,05 мм. Координатограф может работать как в горизонтальном, так и в наклонном (до 70°) положениях.

Французская фирма «Бенсон» выпускает графопостроители двух видов. Первый из них имеет модификации, различающиеся по габаритам от 84×120 до 120×160 см, скорость вычерчивания составляет от 75 до 250 мм/с. Другой автоматический координатограф модели 254 рассчитан на вычерчивание или гравирование не только линейных элементов, но и букв латинского и русского алфавитов.

Графопостроители могут работать в подсоединении к ЭВМ и в автономном режиме в помещениях с температурой от 5 до 38 °С при максимальной влажности 85 %.

Микро-ЭВМ, являющаяся центральным звеном современных полевых электронных геодезических приборов, состоит в основном из промежуточного накопителя, регистров данных и команд, арифметическо-логического устройства и блока управления. С помощью четырехпроводной связи к ней могут быть подключены периферийные вычислители, решающие частные задачи. Измеренные в полевых условиях аналоговые величины (углы, расстояния, наклон вертикальной оси) для магнитной обработки преобразуются в числовые.

Применение электронных тахеометров радикально изменяет сам технологический процесс топографо-геодезических работ: удлиняются расстояния при полярном методе съемки, повышается точность измеренных расстояний, отпадает надобность утомительных записей в полевых журналах, замедляющих работу и приносящих ошибки. Отпадает необходимость в производстве многочисленных контролей, появляется большая объективность измеренных данных. Отпадает потребность в густой сети съемочного обоснования и в густой астрономо-геодезической сети — все это способствует существенному повышению производительности труда, сокращению сроков создания планов и карт, повышению культуры производства.

Но внедрение новой техники пока задерживается, так как оно сопряжено и с некоторыми трудностями: новые приборы являются дорогостоящими и не всегда выдерживают нелегкие полевые условия работы, у исполнителей появляется неуверенность в результатах и возникает недоверие к приборам (например, наблюдатель не видит, что снимает далее 500 м, и т. п.) — образуется своеобразный психологический барьер, преодоление которого, несомненно, будет способствовать ускоренному внедрению новых приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апенко М. И., Дубовик А. С. Прикладная оптика. М., Наука, 1971.
2. Аникст Д. А. Высокоточные теодолиты Т1 и Т05. М., Недра, 1978.
3. Аникст Д. А., Голубовский О. М., Петрова Г. В., Фельдман Г. А. Оптические системы геодезических приборов. М., Недра, 1981.
4. Афанасьев В. А., Усов В. С. Оптические приборы и методы контроля прямолинейности в инженерной геодезии. М., Недра, 1973.
5. Баканова В. В. Геодезия. М., Недра, 1980.
6. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. М., Машиностроение, 1981.
7. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений. М., Недра, 1983.
8. Васютинский И. Ю., Рязанцев Г. Е., Ямбаев Х. К. Геодезические приборы при строительномонтажных работах. М., Недра, 1982.
9. Васютинский И. Ю. Гидростатическое нивелирование. М., Недра, 1976.
10. Воронков Н. Н., Кутырев В. В., Ашимов Н. М. Гирскопическое ориентирование. М., Недра, 1980.
11. Гауф М. Электронные теодолиты и тахеометры. М., Недра, 1978.
12. Генике А. А., Ларин Б. А., Назаров В. М. Геодезические фазовые дальнометры. М., Недра, 1974.
13. Годжаев Н. М. Оптика М., Высшая школа, 1977.
14. ГУГК. 50 лет советской геодезии и картографии. М., Недра, 1967.
15. ГУГК. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М., Недра, 1974.
16. ГУГК. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000, 1 : 500. М., Недра, 1982.
17. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. М., Недра, 1968.
18. Деймлик Ф. Геодезическое инструментоведение. М., Недра, 1970.
19. Дитчберн Р. Физическая оптика. М., Наука, 1965.
20. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении. Справочник в 2-х томах. Под общей редакцией В. В. Бойцова. М., Изд-во стандартов, 1979.
21. Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. М., Недра, 1973.
22. Захаров А. И. Новые теодолиты и оптические дальнометры. М., Недра, 1978.
23. Зацаринный А. В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. М., Недра, 1976.
24. Кузнецов П. Н. Исследования тахеометров и кипрегелей с диаграммами. М., Недра, 1975.
25. Литвинов Б. А., Лобачев В. М., Воронков Н. Н. Геодезическое инструментоведение. М., Недра, 1971.
26. Манина А. С., Крупина Т. К. Зрительные трубы современных теодолитов. Сб. Инженерная геодезия, ч. 2, М., 1976.
27. Маркшейдерское дело/ Д. Н. Оглобин, Г. И. Герасименко, А. Г. Акимов и др. М., Недра, 1981.
28. Мельников В. Г., Казанов Л. С. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения. М., Высшая школа, 1978.
29. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений/ В. Д. Большаков, И. Ю. Васютинский, Е. Б. Ключин и др. М., Недра, 1976.
30. Михеечев В. С. Практикум по курсу «Геодезические приборы». М., Недра, 1974, с. 160.
31. Оптические приборы в машиностроении/ М. И. Апенко, И. П. Арасв, В. А. Афанасьев и др. М., Машиностроение, 1974, с. 240.
32. Правила по технике безопасности на топографо-геодезических работах. М., Недра, 1973.

33. *Приборостроение и средства автоматизации*. Справочник под ред. А. Н. Гаврилова. М., Машиностроение, 1964.
34. *Рытов А. В., Спиридонов А. И.* Геодезические приборы для крупномасштабных топографических съемок. М., Недра, 1977.
35. *Селиханович В. Г.* Геодезия, ч. II. М., Недра, 1981.
36. *Скороходов А. И.* Основы государственной и отраслевой стандартизации в геодезии. М., МИИГАиК, 1980.
37. *Спиридонов А. И., Кулагин Ю. Н., Кузьмин М. В.* Проверка геодезических приборов. М., Недра, 1981.
38. *Справочник геодезиста (в двух книгах)*. Под редакцией В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М., Недра, 1975.
39. *Справочник конструктора оптико-механических приборов*. Под редакцией В. А. Панова. Л., Машиностроение, 1978.
40. *Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам*. Под редакцией В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М., Недра, 1980.
41. *Торочкин В. Ю.* Гиротеодолиты. М., Недра, 1970.
42. *Федоров Б. Д.* Маркшейдерско-геодезические приборы и инструменты. М., Недра, 1971.
43. *Федоренко В. А., Шошин А. И.* Справочник по машиностроительному черчению. М., Машиностроение, 1978.
44. *Черемисин М. С., Ардасенов В. Д., Кольцов В. П.* Нивелиры с компенсаторами. М., Недра, 1978.
45. *Ямбаев Х. К.* Высокоточные створные измерения. М., Недра, 1978.
46. *Bessegh L., Gyinithy I.* Redukalo tachimeter Körevek körött tortinö lecleolvessel N 145021, 15.06.59.
47. *Heyink Wild* Tachymat TCI "Vermessungsingenieur", 1979, 30, N 3, 66—67.
48. *Kahmen H.* Instrumenteller Entwicklungsstand der elektronischen Tachymetrie "Allg. Vermess. Nachr", 1980, 87, N 1, 21—29.
49. *Witte Bertold, Zetsche Hans.* Arbeitsweise der total-station 3810A von Hewlett-Packard und Ergebnisse einer Geräteuntersuchung. „Vermessungsw. und Raumordn", 1977, 39, N 4, 169—177.
50. *Zeiss Elta 2 Allg. Verwess.*— Nachr, 1979, 86, N 2, 56—57.

ПЕРЕЧЕНЬ СТАНДАРТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГЕОДЕЗИИ
И ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИИ

№ п/п	Наименование стандарта	Обозначение стандарта	Шифр группы стандарта
Государственные стандарты СССР			
1	Автоколлиматоры визуальные. Типы. Основные параметры и размеры. Нормы точности	ГОСТ 11899—77	П 41
2	Автоколлиматоры. Методы и средства поверки	ГОСТ 15806—70	T88.4
3	Аппаратура аэрофотообработывающая наземная. Термины и определения	ГОСТ 22213—76	У 00
4	Ампулы уровней	ГОСТ 2386—73	П 04
5	Анемометр ручной индукционный	ГОСТ 7193—74	П 68
6	Геодезия. Термины и определения	ГОСТ 22268—76	T 02
7	Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения	ГОСТ 7427—76	T 02
8	Гравиметры наземные. Основные параметры. Технические требования	ГОСТ 13017—73	П 67
9	Гравиметры наземные. Методы испытаний	ГОСТ 20792—79	П 69
10	Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений	ГОСТ 8.001—80	T 81
11	ГСИ. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений	ГОСТ 8.002—71	T 80
12	ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений	ГОСТ 8.009—72	T 80
13	ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений длины	ГОСТ 8.020—75	T 84
14	ГСИ. Требования к построению, содержанию и изложению стандартов методик и средств поверки мер и измерительных приборов	ГОСТ 8.042—72	T 80
15	ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений	ГОСТ 8.050—73	T 80
16	ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения	ГОСТ 8.057—80	T 80
17	ГСИ. Организация и порядок проведения метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации	ГОСТ 8.103—73	T 80
18	ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная первичная схема для измерения времени и частоты	ГОСТ 8.129—77	T 84
19	ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения	ГОСТ 8.207—76	T 80

№ п п	Наименование стандарта	Обозначение стандарта	Шифр группы стандарта
20	ГСИ. Меры длины штриховые. Ленты образцовые и рулетки измерительные металлические. Методы и средства поверки	ГОСТ 8.301—78	Т 88.4
21	ГСИ. Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений. Основные положения	ГОСТ 8.326—78	Т 80
22	ГСИ. Меры длины штриховые. Методы и средства поверки. Общие положения	ГОСТ 8.327—78	Т 88.5
23	ГСИ. Метрология. Единицы физических величин	ГОСТ 8.417—81	Т 80
24	ГСИ. Метрология. Термины и определения	ГОСТ 16263—70	П 00
25	Дальномеры двойного изображения. Общие технические условия	ГОСТ 22549—77	П 42
26	Динамометры растяжения пружинные общего назначения	ГОСТ 14004—68	П 16
27	Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Основные положения	ГОСТ 2.001—70	Т 52
28	ЕСКД. Виды изделий	ГОСТ 2.101—68	Т 52
29	ЕСКД. Стадии разработки	ГОСТ 2.103—68	Т 52
30	ЕСКД. Технические условия. Правила построения, изложения и оформления	ГОСТ 2.114—70	Т 52
31	ЕСКД. Технические условия. Порядок согласования, утверждения и государственной регистрации	ГОСТ 2.115—70	Т 50
32	ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению	ГОСТ 2.701—76	Т 52
33	ЕСКД. Единая система технологической документации. Общие положения	ГОСТ 3.1001—81	Т 53
34	ЕСКД. Стадии разработки и виды документов	ГОСТ 3.1102—81	Т 53
35	ЕСКД. Процессы технологические. Основные термины и определения	ГОСТ 3.1109—73	Т 53
36	Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП). Общие положения	ГОСТ 14.001—73	Т 53
37	ЕСТПП. Основные требования к технологической подготовке производства	ГОСТ 14.002—73	Т 53
38	Знаки геодезические металлические. Основные параметры. Технические требования	ГОСТ 21668—76	Т 41
39	Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм	ГОСТ 577—68	П 53
40	Измерения времени и частоты. Термины и определения	ГОСТ 15855—77	Т 01
41	Картография. Термины и определения	ГОСТ 21667—76	Т 02

№ п/п	Наименование стандарта	Обозначение стандарта	Шифр группы стандарта
42	Климатические зоны СССР. Районирование по воздействию климата на технические изделия и материалы. Статистические параметры климатических факторов	ГОСТ 16350—80	Т 40
43	Качество продукции. Термины	ГОСТ 15467—79	Т 00
44	Курвиметры	ГОСТ 300—69	П 42
45	Линейки измерительные металлические. Основные параметры и размеры. Технические требования	ГОСТ 427—75	П-53
46	Лупы складные карманные	ГОСТ 7594—75	П 43
47	Линейки синусные	ГОСТ 4046—80	П 54
48	Масштаб поперечный	ГОСТ 13495—68	П 42
49	Меры длины штриховые	ГОСТ 12069—78	П 51
50	Меры длины штриховые. Методы и средства поверки	ГОСТ 16216—70	Т 88.5
51	Машины вычислительные. Программное обеспечение. Термины и определения	ГОСТ 19781—74	Э 00
52	Нивелиры. Общие технические условия	ГОСТ 10528—76	П 42
53	Нормальные линейные размеры	ГОСТ 6636—69	Г 02
54	Надежность в технике. Термины и определения	ГОСТ 13377—75	Т 00
55	Приборы геодезические. Термины и определения	ГОСТ 21830—76	П 00
56	Приборы геодезические. Общие технические требования	ГОСТ 23543—79	П 42
57	Подставки для геодезических приборов	ГОСТ 16740—79	П 42
58	Приборы геодезические. Режимы испытаний на транспортную тряску	ГОСТ 13007—67	П 49
59	Приборы картографические. Термины и определения	ГОСТ 22651—77	П 00
60	Приборы геодезические номограммные. Общие технические условия	ГОСТ 10812—82	П 42
61	Рейки нивелирные. Технические условия	ГОСТ 11158—83	П 42
62	Рулетки измерительные металлические	ГОСТ 7502—80	П 53
63	Рулетки измерительные неметаллические	ГОСТ 11900—66	П 42
64	Система проектной документации для строительства (СПДС). Общие положения	ГОСТ 21.001—77	Ж 01
65	СПДС. Правила оформления привязки проектной документации	ГОСТ 21.202—78	Ж 01
66	Система обеспечения геометрической точности в строительстве. Основные положения	ГОСТ 21778—81	Ж 02
67	Система обеспечения геометрической точности в строительстве. Технологические допуски геометрических параметров	ГОСТ 21779—82	Ж 02

№ пп	Наименование стандарта	Обозначение стандарта	Шифр группы стандарта
68	Система обеспечения геометрической точности в строительстве. Общие правила расчета точности	ГОСТ 21780—76	Ж 02
69	Средства копирования и оперативного размножения документов. Термины и определения	ГОСТ 22600—77	Т 00
70	Скамья оптическая станového профиля	ГОСТ 16810—79	П 41
71	Системы телескопические оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения	ГОСТ 15114—78	П 49
72	Светодалномеры. Типы. Основные параметры и технические требования	ГОСТ 19223—82	П 42
73	Стереоскопы. Типы. Основные параметры и технические требования	ГОСТ 20565—75	П 42
74	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Основные положения	ГОСТ 12.0.001—74	Т 58
75	ССБТ. Основные понятия. Термины и определения	ГОСТ 12.0.002—80	Т 00
76	ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация	ГОСТ 12.0.003—74	Т 58
77	ССБТ. Производственные процессы. Общие требования безопасности	ГОСТ 12.3.002—75	Т 58
78	Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов. Основные положения	ГОСТ 17.0.001—76	Т 58
79	Средства вычислительной техники. Общие технические требования	ГОСТ 21552—76	П 80
80	Стекло оптическое бесцветное. Технические условия	ГОСТ 3514—76	П 40
81	Стекло оптическое бесцветное. Метод определения показателей светопоглощения	ГОСТ 3520—74	П 49
82	Стекло оптическое. Методы измерения показателей преломления на гониометре	ГОСТ 5723—75	П 49
83	Теодолиты. Типы. Основные параметры и технические требования	ГОСТ 10529—79	П 42
84	Теодолиты. Методы испытаний и поверки	ГОСТ 20063—74	П 49
85	Теодолиты. Методы определения погрешностей диаметров горизонтального круга	ГОСТ 13424—68	П 49
86	Транспортиры геодезические	ГОСТ 13494—80	П 42
87	Фототопография. Термины и определения	ГОСТ 21002—75	Т 00
88	Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин	ГОСТ 7601—78	Т 35
89	Центриры оптические. Типы и основные параметры. Технические требования	ГОСТ 22550—77	П 42

№ п п	Наименование стандарта	Обозначение стандарта	Шифр группы стандарта
90	Цепи размерные. Термины, определения и обозначения	ГОСТ 16319—80	Г 02
91	Цепи размерные. Методы расчета плоских цепей	ГОСТ 16320—80	Г 02
92	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики	ГОСТ 2789—73	Г 00
93	Штативы для геодезических приборов.		
94	Общие технические условия	ГОСТ 11897—78	П 42
94	Экономическая эффективность стандартизации. Методы определения. Основные положения		
95	Язык программирования ФОРТРАН	ГОСТ 20779—81	Т 50
96	Язык программирования КОБОЛ	ГОСТ 23056—78 ГОСТ 22558—77	П 85 П 85
Стандарты Совета Экономической Взаимопомощи			
1	Единая система допусков и посадок СЭВ (ЕСДП СЭВ). Поля допусков и рекомендуемые посадки	СТ СЭВ 144—75	Г 12
2	ЕСДП СЭВ. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений	СТ СЭВ 145—75	Г 12
3	Единая система электронных вычислительных машин. Технические средства. Общие технические требования	СТ СЭВ 361—76	Э 61
4	Модульная координация размеров в строительстве	СТ СЭВ 1001—78	Ж 02

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аберрации оптических систем:**
— астигматизм и кривизна поля 73
— дисторсия 74
— меридианальная кома 73
— сферическая аберрация 69
— хроматическая аберрация 71
- Верньер 110**
- Гидродинамические нивелиры 288**
- Гидромеханические нивелиры 287**
- Гидростатические нивелиры 284**
- Гироскопические геодезические приборы:**
— гиробуссоли 255
— гироскопы 255
— гиротеодолиты 255
- Деталировочный чертеж 181**
- Дисперсия света 17**
- Дифракция света 20**
- Длина волны 15**
- Допуски и посадки на изготовление деталей:**
— качество 187
— размеры 185
— шероховатость поверхности 187
- Единая система конструкторской документации 176**
- Зажимные устройства 149**
- Защитные покрытия материалов 198**
- Законы геометрической оптики:**
— независимости распространения света 26
— отражения света 27
— преломления света 27
— принцип Ферма 30
— прямолинейного распространения света 27
- Зрительная труба:**
— автоколлимационные окуляры 94
— зеркально-линзовые телеобъективы 91
— корпус 90
— объективы 90
— построение изображения 87
— с внутренней фокусировкой 87
— сетка нитей 88
- Идеальная оптическая система:**
— построение изображения 51
— уравнение Ньютона 52
- Исправительные винты 155**
- Интерференция света 19**
- Испытания приборов:**
— климатические 202
— механические 200
— специальные 203
— электрические 203
- Кодовые теодолиты 250**
- Коэффициент отражения света в оптической системе 75**
- Коэффициент светопропускания оптической системы 76**
- Коэффициент рассеяния света 77**
- Кипрегели:**
— номограммные кипрегели 338
— технические характеристики 324, 325
— типы 323
- Компенсаторы наклона:**
— жидкостные 134
— исследования 135
— механические 127
— оптико-механические 128
— расчет 138
— схемы 129
— характеристики 136
- Лазерные нивелиры 279**
- Лазерные теодолиты 252**
- Линза:**
— построение изображения 48
— уравнение тонкой линзы 47
- Линза конечной толщины:**
— выпукло-плоская 61
— вогнуто-плоская 62
— двояко-вогнутая 61
— двояковыпуклая 60
— отрицательный мениск 62
— плоско-вогнутая 62
— положительный мениск 62
- Лупа:**

- построение изображения 84
- увеличение 85
- Меры безопасности при работе с приборами 208**
- Микробарометр 249**
- Микроскоп:**
 - линейные увеличения 85
 - оптическая схема 86
- Механические мерные приборы:**
 - длинномеры 292
 - ленты 291
 - проволоки 292
 - рулетки 291
- Наводящие устройства 149**
- Нивелирные рейки:**
 - метрологические характеристики 278
 - типы 278
- Нивелиры:**
 - высокоточные нивелиры 267
 - исследования, поверки 275
 - оптические схемы 268
 - технические нивелиры 272
 - технические характеристики 268
 - типы 272
 - точные нивелиры 272
- Нитяной дальномер 292**
- Обработка материалов:**
 - волочение 197
 - давлением 197
 - ковка 198
 - литье 197
 - металлокерамика 198
 - прессование 197
 - прокатка 197
 - сварка 198
- Оптические дальномеры двойного изображения:**
 - классификация 295
 - оптическая схема 294, 299
 - принципы измерения 293
 - техническая характеристика 295, 296
- Оптический клин:**
 - дисперсия клина 66
- Оптическая система глаза 81**
- Оптический микрометр:**
 - расчет микрометров 118
 - типы 115
- Оптическое стекло:**
 - виды 190
 - изготовление 191
 - обработка 192
 - показатели качества 192
- Осевые системы:**
 - вертикальные 142
 - горизонтальные 146
 - исследования 147
- Подставки геодезических приборов 149**
- Поглощение света 192**
- Показатель преломления среды 98**
- Покрyтие оптических деталей пленками 195**
- Полевая диафрагма 67**
- Полное внутреннее отражение света 98**
- Плоскопараллельная пластина 62**
- Преломляющая призма 65**
- Призмы:**
 - виды 34
 - отражательные призмы 34
 - преимущества призм перед системой зеркал 34
- Разборка и сборка приборов 206**
- Радиодальномеры:**
 - блок-схема 318
 - технические характеристики 320
- Разрешающая способность оптической системы 78**
- Рассеяние света 77**
- Редуцирующие устройства и преобразователи:**
 - автоматические редуцирующие устройства 163
 - емкостные преобразователи 170
 - индуктивные преобразователи 169
 - механотроны 169
 - номограммные преобразователи 165
 - омические преобразователи 167
 - полуавтоматические редуцирующие устройства 157
 - преобразователь с механическим регулированием расстояний между дальномерными штрихами 160
 - преобразователь с оптико-механическим регулированием фокусного расстояния 160

- преобразователи с фрикционными парами 159
- пьезоэлектрические преобразователи 170
- реостатные преобразователи 167
- тангенциальные преобразователи 157
- тензопреобразователи 168
- фотоэлектрические преобразователи 171
- Сборочный чертеж** 178
- Световой луч** 24
- Светодальномеры:**
 - блок-схема 303
 - классификация 305
 - оптическая схема 308, 311, 314
 - принцип действия 301
- Светящаяся точка** 24
- Система зеркал:**
 - зеркала, расположенные под углом 33
 - параллельные зеркала 33
 - плоское зеркало 32
- Система линз:**
 - линейное поперечное увеличение 57
 - оптическая сила системы 57
 - построение изображения 57
 - эквивалентная линза 55
- Стадии разработки прибора:**
 - рабочие чертежи 176
 - технического проектирования 176
 - эскизного проектирования 176
- Сферическое зеркало:**
 - основное уравнение 38
 - правила построения изображения 39
- Тахеометры:**
 - внутрибазные тахеометры 342
 - номограммные тахеометры 331
 - электронно-оптические тахеометры 344
 - с авторедукционными дальномерами 323
 - столик Карти 331
- технические характеристики 321
- типы 320
- Теодолиты:**
 - высокоточные теодолиты 225
 - исследования 231
 - конструкции 209
 - ошибки теодолитов 231
 - технические теодолиты 215
 - технические характеристики 229
 - типы теодолитов 209
 - точные теодолиты 219
- Телескопическая система:**
 - видимое увеличение 59
 - линейное поперечное увеличение 58
 - продольное увеличение 59
 - свойства 58
 - угловое увеличение 59
- Техническое задание на разработку прибора** 173
- Уровни:**
 - компенсируемые 122
 - контактные 124
 - регулируемые 123
 - цилиндрические 121
 - электронные 125
- Устранение неисправностей приборов:** 206
- Уход за приборами** 203
- Хранение приборов** 203
- Центрированная оптическая система:**
 - построение изображения 41
 - сферическая преломляющая поверхность 41
 - формула Аббе 42
 - формула Гаусса 44
- Чистка и смазка приборов** 206
- Шкалы геодезических приборов:**
 - методы изготовления 106
 - ошибки шкал 108
 - требования к шкалам 106
- Шкаловой микроскоп** 112
- Штриховой микроскоп** 111
- Штативы** 149
- Элевационные винты** 154

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЯ	4
Глава 1. Введение	4
§ 1. Предмет и задачи геодезического инструментоведения	4
§ 2. История развития геодезических приборов и геодезического инструментоведения	5
§ 3. Требования к геодезическим приборам. Стандартизация и классификация приборов. Метрологическое обеспечение измерений	11
Глава 2. Сведения из геометрической и физической оптики	14
§ 4. Краткие сведения из физической оптики. Явления дисперсии, интерференции и дифракции света. Лазерные источники излучения	14
§ 5. Основные положения и законы геометрической оптики. Правила знаков	24
§ 6. Показатель преломления. Полное внутреннее отражение	28
§ 7. Принцип Ферма. Оптическая длина пути	30
Глава 3. Оптические детали и системы в геодезических приборах	32
§ 8. Плоское зеркало, системы зеркал	32
§ 9. Отражательные призмы	34
§ 10. Сферическое зеркало	37
§ 11. Центрированная оптическая система. Преломление луча сферической поверхностью	41
§ 12. Преломление луча двумя сферическими поверхностями. Линза	47
§ 13. Идеальная оптическая система	49
§ 14. Система из нескольких линз	54
§ 15. Линзы конечной толщины	60
§ 16. Оптические детали с плоскими преломляющими поверхностями	62
§ 17. Ограничение лучков лучей в оптических системах	66
§ 18. Недостатки (абберации) оптических систем	69
§ 19. Потери света в оптических системах	75
§ 20. Разрешающая способность и качество изображений оптических систем	78
§ 21. Глаз как оптическая система	81
§ 22. Оптические приборы: лупа, микроскоп	84
§ 23. Зрительные трубы геодезических приборов	86
§ 24. Основные оптические характеристики зрительных труб и их определение	95
§ 25. Исследование оптических характеристик зрительных труб	98
§ 26. Понятие о габаритном и абберационном расчетах зрительной трубы	102
Глава 4. Линейные и круговые шкалы. Отсчетные устройства	104
§ 27. Линейные и круговые шкалы геодезических приборов, их назначение, требования к ним	104
§ 28. Современные методы нанесения штрихов на шкалах. Понятие об ошибках нанесения штрихов и способах их определения	106
§ 29. Отсчетные устройства. Верньер. Штриховой микроскоп. Шкаловой микроскоп. Микроскоп с винтовым микрометром	110
§ 30. Оптические микрометры	114
§ 31. Понятие о расчете оптических микрометров	118
Глава 5. Уровни и компенсаторы наклона	121

§ 32. Уровни, их типы и устройство	121
§ 33. Компенсаторы наклона	127
§ 34. Исследование работы компенсаторов наклона в нивелирах	135
§ 35. Понятие о расчете компенсаторов	138
Глава 6. Осевые системы и другие механические части	141
§ 36. Типы конструкций вертикальных и горизонтальных осевых систем. Исследование правильности работы вертикальной осевой системы	141
§ 37. Штативы, подставки и подъемные винты. Зажимные и наводящие устройства	149
§ 38. Элевационные винты	154
§ 39. Исправительные винты уровней и сеток нитей	155
Глава 7. Редуцирующие и другие автоматические устройства	156
§ 40. Полуавтоматические редуцирующие устройства	157
§ 41. Автоматические редуцирующие устройства	163
§ 42. Номограммные преобразователи	165
§ 43. Другие преобразователи для автоматизации геодезических измерений	167
Глава 8. Общие сведения об основных этапах разработки, выпуска, испытаний и эксплуатации новых образцов геодезических приборов	173
§ 44. Просктирование геодезических приборов	173
§ 45. Изготовление геодезических приборов и их основных узлов	189
§ 46. Испытания геодезических приборов	199
§ 47. Обращение с геодезическими приборами. Хранение приборов и уход за ними	203
§ 48. Общие правила разборки и сборки, чистки и смазки приборов. Устранение мелких неисправностей	206
§ 49. Меры безопасности при работе с геодезическими приборами	208
ЧАСТЬ II. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	209
Глава 9. Теодолиты	209
§ 50. Общие сведения о современных теодолитах	209
§ 51. Теодолиты технические	215
§ 52. Точные теодолиты	219
§ 53. Высокоточные теодолиты	228
§ 54. Основные инструментальные ошибки теодолитов и их исследование	231
§ 55. Кодовые теодолиты	250
§ 56. Лазерные теодолиты	252
§ 57. Гирскопические теодолиты автономного ориентирования	255
Глава 10. Нивелиры	266
§ 58. Общие сведения и типы нивелиров	266
§ 59. Высокоточные нивелиры	267
§ 60. Точные и технические нивелиры	272
§ 61. Исследования, поверки и инструментальные источники ошибок нивелиров	275
§ 62. Нивелирные рейки	278
§ 63. Лазерные нивелиры	279
§ 64. Приборы гидро nivelирования	284
§ 65. Микробарометры	289
Глава 11. Приборы для измерения расстояний	291
§ 66. Механические приборы для измерения расстояний	291
§ 67. Нитяный дальномер зрительной трубы с внутренней фокусировкой	292

§ 68. Дальномеры двойного изображения	293
§ 69. Светодальномеры. Принципы действия и виды свстодальномеров	301
§ 70. Радиодальномеры	316
Глава 12. Тахеометры и кипрегели	320
§ 71. Общие сведения и типы тахеометров и кипрегелей	320
§ 72. Тахеометры с авторедукционными дальномерами двойного изображения	323
§ 73. Номограммные тахеометры. Столик Карти	331
§ 74. Номограммные кипрегели. Облегченная мензула	338
§ 75. Некоторые требования к разработке и эксплуатации номограммных приборов. Точность приборов	341
§ 76. Редукционные тахеометры с базой в точке стояния прибора	342
§ 77. Электронно-оптические тахеометры	344
Список литературы	352
Приложение. Перечень стандартов, применяемых в геодезии и геодезическом инструментоведении	354
Предметный указатель	359

ПАВЕЛ НИКИТИЧ КУЗНЕЦОВ,
ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ ВАСЮТИНСКИЙ,
ХАРЬЕС КАЮМОВИЧ ЯМБАЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИНСТРУМЕНТОВЕДЕНИЕ

Редактор *В. Д. Большаков*

Редактор *В. Д. Большаков*
Переплет художника *Т. Н. Погореловой*
Художественный редактор *Е. Л. Юрковская*
Графики-иллюстраторы *А. Ю. Бушуев, В. А. Крылов*
Технический редактор *Л. А. Мурашова*
Корректор *В. И. Понкина*

ИБ № 5476

Сдано в набор 12.01.84. Подписано в печать 12.04.84. Т-09520.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура
«Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 23,0. Усл.
кр.-отт. 23,0. Уч.-изд. л. 24,24. Тираж 8800 экз. Заказ
71/9299—15. Цена 1 р. 10 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государст-
венном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли, 191126, Ленинград, Социалистическая ул.,
14.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!
В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА»
ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ

БУШ В. В., КАЛУГИН В. В., СААР А. И. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа. 15 л. 75 к.

Рассмотрен комплекс вопросов производства геодезических работ при возведении и эксплуатации высотных сооружений башенного типа (дымовые трубы, градирни, ректификационные колонны, телевизионные башни). Освещены вопросы геодезических измерений при строительстве башен конической и гиперболической форм в скользящей опалубке, учета влияния внешних условий при возведении высотных башен, геодезического обеспечения монтажа сооружений с последующей их установкой в вертикальное положение.

Для геодезистов и специалистов, занятых проектированием строительства и эксплуатацией сооружений башенного типа.

ДАНИЛЕНКО Т. С. Геодезические работы при создании комплексов инженерных объектов. 15 л. 75 к.

Приведены сведения об особенностях размещения и возведения объектов крупного строительства, о роли генплана комплекса объектов. Описаны топографо-геодезические работы в строгом соответствии с существующей нормативной и стандартной документацией. Рассмотрены в связи с этим оптимально необходимые инструменты и приборы. Освещены особенности и рациональные схемы построения опорных плано-высотных сетей. Уделено особое внимание долговременной сохранности геодезических пунктов. Даны необходимые формулы расчета погрешностей измерений и оценки точности полученных результатов при сгущении пунктов сети и геодезическом обеспечении строительного-монтажных процессов.

Для геодезистов, специалистов, занятых изысканиями, проектированием и строительством инженерных объектов.

КОЧЕТОВ Ф. Г. Нивелиры с компенсаторами.— 2-е изд., перераб. и доп. 10 л., 50 к.

Второе издание (1-е — 1969) подготовлено с учетом усовершенствования конструкции нивелиров с компенсаторами. Изложены теоретические основы этих типов нивелиров, принцип действия их со смещающейся сеткой или объективом, с изломом и переносом луча визирования. Описаны механические системы подвесок компенсаторов. Дан анализ характерных ошибок приборов этого типа. Рассмотрены оптико-механические схемы нивелиров с компенсаторами, методика лабораторных и полевых исследований.

Для инженерио-технических работников, занимающихся разработкой компенсаторных нивелиров, а также использующих их при съемках.

НЕУМЫВАКИН Ю. К., СМИРНОВ А. С. Практикум по геодезии: Учеб. пособие для вузов. 15 л. 50 к.

Излагаются научно-методические основы современной технологии топографических съемок для землеустройства, работы с топографическими планами и картами по определению положения точек местности и площадей земельных угодий, а также сведения о геодезических приборах, методах измерений и математической обработке их результатов с применением современных вычислительных средств.

Для студентов сельскохозяйственных высших учебных заведений.

РАДИОГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ и электрооптические измерения:
Учебник для вузов / Большаков В. Д., Голубев А. Н., Деймлик Ф.
и др. 20 л. 1 р. 10 к.

Учебник подготовлен авторскими коллективами из вузов СССР и ГДР и совместно издается в СССР и ГДР. Изложены вопросы радиогеодезических и электрооптических измерений. Рассмотрены теоретические основы различных способов измерения расстояний с использованием электромагнитных волн. Приведены основы устройства светодальномеров, радиодальномеров и радиогеодезических систем, изложена теория соответствующих устройств и приборов, описаны основные конструкции. Даны сведения о геодезической интерферометрии и дальномерной рефрактометрии. Показаны методы измерения расстояний до искусственных спутников Земли и Луны. Освещены основные вопросы математической обработки измерений.

Для студентов геодезических специальностей вузов СССР и ГДР.

СПИРИДОНОВ А. И. Теодолиты. 14 л. 70 к.

Рассмотрены вопросы теории теодолитов, дана их классификация. Приведены особенности конструкции типов теодолитов, проанализированы и систематизированы инструментальные погрешности угломерных приборов, описаны методы их исследования и оценки качества приборов с учетом показателей надежности, производительности, технологичности и эргономичности. Изложены сведения о методах измерения углов теодолитами, даны рекомендации по метрологическому и техническому их обслуживанию, а также отмечены перспективные направления развития угломерной техники.

Для инженерно-технических работников, а также специалистов оптико-механических предприятий и научно-исследовательских организаций, связанных с проектированием, изготовлением и контролем угломерных приборов. Может быть полезна также преподавателям и студентам учебных заведений геодезического профиля.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазин.

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.