

НЮБАР ТЕОДОРЕСИКА ТЕХНИКА

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



**НОВАЯ
ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА
и ее применение
в строительстве**

НОВАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**и ее применение
в строительстве**

**Издание второе,
переработанное и дополненное**

**ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
В. Е. ДЕМЕНТЬЕВА**

**Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов строительных
специальностей вузов**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1982

ББК 38.115

Н72

УДК 528.5

Рецензенты:

Кафедра инженерной геодезии Новосибирского инженерно-строительного ин-та (зав. кафедрой проф. Д. А. Кулешов); А. М. Жилкин — канд. техн. наук, доцент МИИГАИК

Новая геодезическая техника и ее применение в строительстве. Учеб. пособие для стр. спец. вузов/В. А. Величко, С. Ф. Мовчан, В. Е. Дементьев и др. Под ред. Дементьева В. Е. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. школа, 1982. — 280 с., ил.

В пер.: 1 р.

В пособии описываются новые методы геодезических работ и соответствующие им приборы, приведены примеры выполнения инженерно-геодезических работ из отечественной и зарубежной практики. Второе издание (первое выпущено в 1973 г.) дополнено сведениями об оптических теодолитах, приборах для линейных измерений, гидронивелирах и новых лазерных геодезических приборах.

Н 1902010000—639 К.Б. № 54—10—81
001(01)—82

ББК 38.115

912

© Издательство «Высшая школа», 1973
© Издательство «Высшая школа», 1982

Настоящее учебное пособие является вторым изданием, которое написано в соответствии со специальной частью программы курса инженерной геодезии для студентов строительных вузов и факультетов. Изучение этой части курса проводится факультативно в 10-м или 11-м семестрах в течение 16—30 ч. Специальные вопросы инженерной геодезии читаются также на курсах повышения квалификации инженеров-строителей и инженеров-геодезистов, работающих в строительстве.

На XXVI съезде КПСС отмечалось, что условия, в которых народное хозяйство будет развиваться в 90-е годы, делают еще более настоятельным ускорение научно-технического прогресса.

Особенность современного строительства — его массовость и «скоростной» характер, обусловленный применением мощной строительной и землеройной техники, типовых и унифицированных деталей, изготавливаемых индустриальным способом. Скоростной характер строительства требует и скоростных методов его геодезического обеспечения. Другая особенность — повышение точности геодезических разбивочных работ, геодезического контроля в процессе возведения сооружения и монтажа технологического оборудования в цехах промышленных предприятий. Это относится к строительству высотных сооружений, антенн радиотелескопов, направляющих путей значительного протяжения, автоматических поточных линий, конвейеров и т. п. Появилось и технологическое оборудование («физические машины» — ускорители заряженных частиц), требующее прецизионной точности установки и дистанционного геодезического контроля в процессе его работы из-за наличия радиационного фона.

Без геодезических работ нельзя проводить изыскания, проектирование, строительство и монтаж оборудования, эксплуатировать инженерные сооружения. На основе геодезических измерений обеспечивается соблюдение геометрических форм и элементов проекта сооружений.

В настоящее время геодезическая служба в строительстве со своими традиционными инструментами и методами не всегда соответствует уровню механизации строительства, как на этапе изысканий, так и на этапах геодезического контроля.

Повышения эффективности и качества геодезических работ можно достигнуть совершенствованием традиционной технологии и созданием новых, более прогрессивных методов и средств геодезических измерений. Новые геодезические приборы достаточно сложны и для их разработки и правильной эксплуатации необходимы глу-

бокие знания оптики, физики, радиотехники. Созданы приборы, позволяющие автоматизировать не только процессы измерений, но и обработку результатов на микро-ЭВМ, встроенных в эти приборы.

Учитывая развитие геодезического приборостроения, второе издание пособия (первое вышло в 1973 г.) существенно переработано и дополнено. В гл. I приведены сведения из оптики и светотехники, необходимые для понимания принципа действия и устройства различных приборов. В гл. II рассмотрены приборы для измерения расстояний. Она дополнена сведениями о механических мерных приборах, оптических дальномерах и лазерных интерферометрах, гл. III — о приборах для угловых измерений написана заново. В гл. IV содержатся сведения о гироскопическом ориентировании, в гл. V — сведения о приборах для нивелирования. В гл. VI рассматриваются типовые инженерно-геодезические задачи с применением новой геодезической техники.

В соответствии с опытом преподавания специальных разделов инженерной геодезии в Московском инженерно-строительном институте им. В. В. Куйбышева наиболее целесообразным, по мнению авторов, является чтение обзорных лекций по вопросам новой геодезической техники с показом результатов ее применения в строительстве. Приводимые примеры должны быть типичными для профиля инженеров, готовящихся на данном факультете. Настоящее учебное пособие написано с учетом прочитанных лекций. Для лиц, интересующихся более детальными сведениями, даются ссылки на отечественную, доступную студентам литературу.

Учебное пособие написано коллективом авторов: проф. докт. техн. наук *В. А. Величко* (§ II.3—II.5, гл. IV, § V.2, V.3, V.9, VI.1); доц. канд. техн. наук *Н. В. Ангеловой* (§ I.1—I.6), канд. техн. наук *В. Е. Дементьевым* (§ II.2, II.6, гл. III, § V.10, VI.2, VI.5, VI.6, а § VI.3 совместно с инж. *А. С. Федоровым*), ст. препод. *С. Ф. Мовчаном* (§ II.1, V.1, V.4—V.8), инж. *А. С. Федоровым* (§ I.7, VI.4, а § VI.3 совместно с *В. Е. Дементьевым*).

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам — коллективу кафедры инженерной геодезии Новосибирского инженерно-строительного института (зав. кафедрой проф. Д. А. Кулешову) и канд. техн. наук *А. М. Жилкину*, рекомендации и советы которых были учтены при работе над настоящей книгой.

Авторы будут благодарны читателям за все замечания и пожелания, которые просим направлять по адресу: *Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

Авторы

Глава I

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ОПТИКИ И СВЕТОТЕХНИКИ

§ 1.1. ПРИРОДА И СКОРОСТЬ СВЕТА

Свет представляет собой электромагнитное излучение оптического диапазона. Скорость света в соответствии с теорией Максвелла (1831—1879) зависит от свойств среды, в которой он распространяется. Излучение света сопровождается переносом энергии. По современной классификации оптический диапазон занимает полосу частот $3 \cdot 10^{15}$ — $3 \cdot 10^{12}$ Гц, что соответствует длине волн 0,1—100 мкм. Видимый диапазон ограничен полосой частот $1,3 \cdot 10^{15}$ — $2,6 \cdot 10^{15}$ Гц, что соответствует приблизительно длине волн 0,40—0,76 мкм.

Современное представление о свойствах и природе света исходит из предположения о единстве его волновых и квантовых свойств. Основоположник волновой теории света — Х. Гюйгенс (1629—1695). Согласно его теории свет рассматривается как волновое движение, распространяющееся в особой упругой среде — эфире. Каждая точка эфира, до которой доходит световая волна, становится самостоятельным центром возбуждения вторичных элементарных световых волн.

Основоположник корпускулярной природы света И. Ньютон (1643—1727). По его теории свет представляет собой поток мельчайших частиц — корпускул, испускаемых источником света прямолинейно во все стороны.

Квантовая природа света была сформулирована М. Планком (1858—1947), развита далее А. Эйнштейном (1879—1955) и другими учеными. Согласно этой теории, основанной на прерывистости всех процессов, излучение и поглощение световой энергии может происходить только определенными порциями — квантами, кратными некоторому значению $h\nu$, постоянному для данной частоты излучения. По М. Планку энергия, содержащаяся в одном кванте,

$$E = h\nu,$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (постоянная Планка); ν — частота колебаний света, Гц [2].

В 1905 г. А. Эйнштейн, развивая теорию Планка, изложил фотонную теорию, согласно которой световое излучение рассматрива-

ется как поток фотонов, являющихся частицами материи, обладающими энергией, импульсом (произведением силы на время действия) и массой движения. Соединение корпускулярных и волновых свойств света позволило Эйнштейну объяснить такие несовместимые для того времени явления, как интерференция света, фотоэффект и другие сложные явления физической оптики. Этот взгляд на природу света оправдывает применение на практике как квантовой, так и волновой (электромагнитной) теории света в зависимости от того, какие свойства преобладают в используемом световом явлении. Полное раскрытие двойственного характера природы света — задача современной науки.

Значителен вклад русских ученых в формирование взглядов на природу и свойства света. В 1889 г. А. Г. Столетов (1839—1896) открыл фотоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что некоторые вещества при облучении их светом излучают электроны. А. Г. Столетовым впервые в мире был создан фотоэлемент — прибор для преобразования световой энергии в электрическую. В наше время немислимо развитие таких отраслей науки и техники, как автоматика, телемеханика, телевидение и другие без использования фотоэффекта.

Большое значение имеет открытие П. Н. Лебедевым (1866—1912) светового давления, что имело огромное значение для подтверждения электромагнитной теории света. Работы П. Н. Лебедева доказали наличие у электромагнитных волн не только энергии, но и импульса и массы, и послужили исходным пунктом для установления соотношения между массой и энергией.

Существенное практическое значение имеют работы С. И. Вавилова (1891—1951) в области люминесцентного свечения.

Наши современники академики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров — создатели первого молекулярного квантового генератора на аммиаке (1954). Их работа явилась основой для осуществления принципов квантового усиления и генерации электромагнитных волн оптического диапазона, что привело к созданию лазера на рубине (1960), газового лазера (1961) и, наконец, полупроводникового лазера (1962).

В технике использования электромагнитных волн для инженерно-геодезических целей, в частности для измерения расстояний по времени и скорости распространения света, большое значение имеет знание скорости в воздушной среде в момент измерений. Скорость света в свободном пространстве (вакууме) $c = 29\,979\,458$ м/с.

В физике для характеристики скорости пользуются термином «фазовая скорость», имея в виду скорость, с которой передается фаза колебаний от одной точки пространства к другой. Фазовая скорость в вакууме не зависит от частоты колебаний; при распространении же колебаний в среде — зависит от частоты (длины волны). Это свойство электромагнитных волн, называемое *дисперсией*, особенно резко выражено у световых волн. Скорость света в воздухе уменьшается с уменьшением длины волны.

Так как при измерениях практически пользуются смешанным по спектральному составу световым потоком, то вычисляют так называемую групповую скорость света (м/с)

$$v = c/n, \quad (1.1)$$

где n — показатель преломления воздуха для групповой скорости света.

В зависимости от состояния воздушной среды при решении геодезических задач показатель преломления

$$n = 1 + \frac{(n_{0,760} - 1)p}{(1 + \alpha t)760} - \frac{55 \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha t} \epsilon, \quad (1.2)$$

где $n_{0,760}$ — показатель преломления для групповой скорости света при температуре воздуха $t = 0^\circ\text{C}$, давлении $p = 760$ мм рт. ст. и влажности $\epsilon = 0$ мм рт. ст.; $\alpha = 1/273$ — объемный коэффициент расширения воздуха.

В зависимости от длины волны света

$$n_{0,760} = 1 + [2876,04 + (48,86/\lambda_v^2) + (0,68/\lambda_v^4)]10^{-7}, \quad (1.3)$$

где λ_v — длина волны света, соответствующая максимуму спектральной чувствительности приемника излучения (мкм).

Волновые свойства света широко используются в инженерной геодезии при решении задач методами интерференции, дифракции, двойного лучепреломления и поляризации.

§ 1.2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

При объяснении основных законов распространения света используют понятия светящейся точки и светового луча. *Светящейся точкой* называют геометрическую точку, являющуюся источником световых колебаний. *Световым лучом* называют линию, по которой распространяется свет от источника. Раздел оптики, изучающий распространение света, пользуясь приведенными понятиями светящейся точки и светового луча, называют *геометрической оптикой*.

Геометрическая оптика базируется на следующих законах распространения света:

1) в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно;

2) лучи света распространяются независимо друг от друга;

3) лучи света могут отражаться, т. е. изменять первоначальное направление на обратное, на границе раздела двух сред. Отражение может быть правильным (зеркальным), если неровности на границе двух сред меньше длины волны падающего света; в этом случае виден сам источник света, а граница раздела не видна; угол i_1 падения луча равен по абсолютной величине углу $-i_2$ отражения и обратен по знаку. Отражение может быть неправильным (диффузным), если неровности двух сред больше длины волны света. При диффузном отражении видна граница двух сред, а источник

света не виден. Угол падения и угол отражения при этом не равны друг другу и распределяются по закону случайных величин;

4) лучи света могут преломляться, т. е. изменять направление распространения на границе раздела двух сред, скорость распространения в которых различна. При этом отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 для данных двух сред есть величина постоянная и равная отношению показателей преломления n_1 и n_2 этих двух сред:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_2 / n_1. \quad (1.4)$$

Показатели преломления двух сред обратно пропорциональны длине волн в этих средах

$$\lambda_1 / \lambda_2 = n_2 / n_1. \quad (1.5)$$

Преломленный свет сохраняет ту же частоту колебаний, что и падающий. Среда с большим показателем преломления считается оптически более плотной.

Явление отражения сопровождается частичным, а иногда и полным внутренним отражением от границы раздела двух сред. Если луч переходит из среды оптически более плотной n в среду оптически менее плотную n' , то угол преломления i' будет больше угла падения i . Увеличивая угол падения i , можно получить такое значение угла преломления, при котором преломленный луч будет скользить вдоль поверхности раздела двух сред, образуя угол преломления $i' = 90^\circ$. Тогда

$$\sin i' = 1; \quad \sin i = n' / n. \quad (1.6)$$

Угол i' называют *углом полного внутреннего отражения*; преломление прекращается и остается лишь отраженный луч. При этом отражение происходит под углом, равным углу падения. Явление полного внутреннего отражения замечательно тем, что отраженный луч несет в себе полную энергию падающего луча. Поэтому полное внутреннее отражение широко используется в оптических геодезических приборах.

§ 1.3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Интерференция — явление, возникающее при сложении двух и более световых волн и, проявляющееся в том, что интенсивность результирующего колебания в зависимости от разности фаз складывающихся колебаний может быть больше или меньше суммы их интенсивностей. Это явление обусловлено волновой природой света.

Интерференция возникает в том случае, когда существует постоянное и не изменяющееся по времени (когерентное) соотношение между фазами световых колебаний. При этом периоды световых колебаний постоянны, а все изменения фазы, происходящие в одном источнике света, совершаются и в других. При интерференции происходит перераспределение световой энергии между различными точками, так как усиление света в одних точках пространства соп-

ровождается ослаблением в других. Интенсивность результирующего колебания в зависимости от разности фаз либо больше, либо меньше интенсивности складываемых колебаний. Разность фаз зависит от начальной разности фаз и разности пути, пройденного интерферирующими колебаниями.

Создать два самостоятельных источника света, излучения которых были бы когерентны, практически невозможно. Поэтому часто на практике для целей интерференции используют так называемую

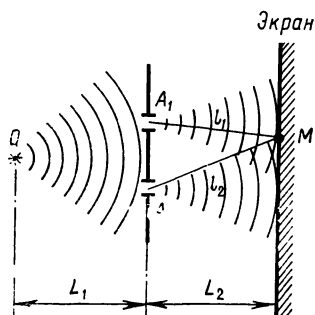


Рис. I.1. Интерференция световых волн

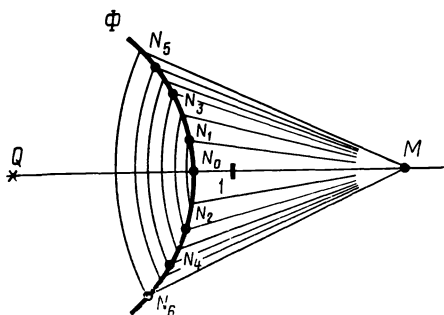


Рис. I.2. Дифракция света

схему Юнга. Пусть Q (рис. I.1) источник света, освещающий в диафрагме два точечных отверстия A_1 и A_2 . В соответствии с принципом Гюйгенса каждое из отверстий, до которых дошла сферическая световая волна, можно рассматривать как самостоятельные источники света, независимо излучающие вторичную сферическую световую волну. Поскольку расстояние L_1 , L_2 и $\overline{A_1A_2}$ неизменны, то вторичные световые волны когерентные, т. е. их колебания сдвинуты по фазе относительно друг друга на постоянную величину. Такие колебания будут интерферировать, и в плоскости экрана можно наблюдать интерференционную картину в виде чередующихся темных и светлых concentрических колец. Темные кольца соответствуют разности хода лучей для точки M на нечетное количество полуволн:

$$\Delta_{\tau} = l_2 - l_1 = (2n + 1)(\lambda/2), \quad (1.7)$$

где l_1 , l_2 — расстояния от точечных отверстий до точки M ; n — целое число; λ — длина волны света.

Светлые кольца соответствуют разности хода лучей на четное количество полуволн:

$$\Delta_{\epsilon} = l_2 - l_1 = 2n(\lambda/2). \quad (1.8)$$

Расстояние между серединами двух светлых или темных полос на экране называют *шириной полосы интерференции*. В общем случае эта величина переменная, зависящая от расстояния L_2 и удаления от центра интерференционной картины.

Наиболее ярким будет центральное пятно, называемое *нулевым максимумом*, менее ярким — первое, далее — второе и последующие кольца — максимумы первого, второго и т. д. порядков.

Дифракция света — явление отклонения световых лучей от прямолинейного направления при прохождении ими среды с резкими оптическими неоднородностями, а также при всяком ограничении световых пучков препятствиями. Дифракция обусловлена волновыми свойствами света.

При прохождении света сквозь щели и отверстия, а также при освещении точечным источником света непрозрачных препятствий, размеры которых соизмеримы с длиной волны света, на экране, установленном позади отверстий или препятствий, вместо четко разграниченных областей света и тени будет наблюдаться система максимумов и минимумов освещенности. Эти же явления возникают при прохождении света сквозь среду с резко выраженными неоднородностями показателя преломления. Наблюдаемая на экране система максимумов и минимумов обусловлена интерференцией дифрагирующих лучей.

Для объяснения дифракции света обычно применяется метод Френеля разделения фронта световой волны на зоны. *Фронтом называют геометрическое место точек, до которых в данный момент дошла световая волна в одинаковой фазе колебаний.*

Пусть от точечного источника света Q (рис. 1.2) в однородной среде распространяется сферическая монохроматическая волна. Кривая Φ — положение, занимаемое фронтом волны в некоторый момент времени; M — произвольная точка перед фронтом волны. При прямолинейном распространении света по направлению QN_0M достаточно было бы поставить на пути луча в точке I малый экран, чтобы в точке M наблюдалась полная темнота. Но в точку M приходят и интерферируют волны не только от точки N_0 волны, но и от всех других точек фронта, которые, по Френелю, рассматриваются как самостоятельные источники излучения. Проведем ряд сфер с центром в точке M радиусами, равными соответственно

$$\begin{aligned} MN_1 &= MN_0 + (1/2)\lambda, \\ MN_2 &= MN_0 + 2(1/2)\lambda, \\ MN_3 &= MN_0 + 3(1/2)\lambda, \\ &\dots \end{aligned}$$

Волны, приходящие в точку M от каждой четной зоны (рис. 1.2), сдвинуты на половину длины волны по отношению к волнам от каждой нечетной зоны. Колебания от каждой пары (четной и нечетной) смежных зон находятся в противоположных фазах и поэтому суммарная амплитуда колебания, даваемая парой, равна разности амплитуд колебаний от каждой из зон в отдельности. Суммарная амплитуда A световой волны, приходящей в точку M от всех зон, равна разности двух сумм:

$$A = \sum A_{\text{ч}} - \sum A_{\text{н}},$$

где $A_{\text{ч}}$ и $A_{\text{н}}$ — сумма амплитуд четных и нечетных зон.

При отклонении точки M от створа линии QN_0 изменяются условия интерференции и меняется суммарное значение амплитуды A . В случае, изображенном на рис. 1.2, дифракционная картина состоит из чередующихся светлых и темных концентрических колец.

Дифракционная картина зависит от длины волны, огибающей препятствия. Если использовать монохроматический свет (белый), то дифракционные максимумы интенсивности для различной длины волны пространственно разойдутся и возникнут дифракционные спектры.

Явления интерференции и дифракции находят применение в инженерной геодезии для компарирования длины мерных приборов и разбивки створов при установке технологического оборудования в проектное положение.

§ 1.4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Свойство света, характеризующееся пространственно-временной упорядоченностью ориентации магнитного и электрического векторов, называется *поляризацией света*.

По своей природе поляризованный свет является элементарным: монохроматический луч поляризованного света не разлагается на составляющие. Работа с поляризованным светом в ряде случаев проще, чем с естественным, у которого магнитный и электрический векторы хаотически меняют свое направление.

Линейно поляризованным называется свет, у которого направления колебаний электрического и магнитного векторов в любой точке пространства остаются неизменными с течением времени. *Поляризованным по кругу* — свет, у которого электрический и магнитный векторы в любой точке пространства равномерно вращаются, а концы векторов описывают окружности. *Эллиптически поляризованным* — свет, у которого электрический и магнитный векторы в любой точке пространства вращаются, а концы векторов описывают эллипсы.

Плоскостью поляризации называется плоскость, проходящая через электрический вектор и направление распространения электромагнитной волны.

Естественный свет, отраженный от гладко полированной поверхности диэлектрика, частично или полностью поляризован. Д. Брюстер установил (1815 г.) закон поляризации света при отражении. При падении его на поверхность среды под углом i , когда $\operatorname{tg} i = n$ (n — показатель преломления среды) отраженный свет полностью поляризован, при этом угол между отраженным и преломленным лучами равен 90° . Поляризация при отражении всегда сопровождается наличием преломленного луча.

Угол i падения луча, при котором имеет место полная поляризация отраженного луча, называется *углом полной поляризации* или *углом Брюстера*. Угол Брюстера различен для разных участков спектра, так как показатель преломления среды зависит от длины волны.

Если линейно-поляризованный свет поляризован перпендикулярно к плоскости падения и падает на оптически прозрачную среду (например, стекло) под углом полной поляризации, то преломление и отражение исчезают и свет проходит среду без потерь. Это явление используется в газоразрядных трубках лазеров, где для уменьшения потерь на отражение, связанных с многократным прохождением лучом света разделов «стекло—воздух» в оптическом резонаторе, «окна» устанавливаются под углом Брюстера, называемые *окна Брюстера* (см. § 1.7). При этом выходящий из лазера свет линейно поляризован, что очень удобно при использовании газовых лазеров в светодальномерах.

На поверхности металлов, даже очень хорошо отполированных, поляризации света нет; падающая волна распадается на отраженную и проникающую внутрь — в металл. Величина прошедшей через металл световой энергии исчезающе мала, поглощенная часть энергии превращается в теплоту. Можно считать, что в металле нет преломленной волны, а следовательно, и отраженная волна (для естественного света) не может быть поляризована, так как поляризация возникает от неодинакового распределения компонентов электрического вектора между отраженными и преломленными волнами.

Если на металл падает плоская линейно-поляризованная волна света, то в отличие от прозрачного диэлектрика, при отражении от которого происходит поворот плоскости поляризации, здесь отраженные составляющие электрического и магнитного векторов приобретают относительную разность фаз Δ и в общем случае свет будет эллиптически поляризован. Отраженная волна останется линейно-поляризованной, если разность фаз $\Delta=0$ или $\Delta=\pi$, что будет иметь место при падении линейно-поляризованного света по нормали к отражающей поверхности металла. Это явление используется в отражателях для визуальных светодальномеров.

Оптические устройства, преобразующие проходящий через них естественный свет в поляризованный, называют *поляризаторами*. Поляризатор разделяет первоначальный пучок естественного света на две компоненты: обыкновенный и необыкновенный лучи, имеющие разную скорость распространения и колебания во взаимноперпендикулярных направлениях. Поляризатор пропускает один из лучей и поглощает или отклоняет другой.

Для поляризаторов, основанных на двойном лучепреломлении, применяют двойные или одинарные призмы из исландского шпата или кварца. В двойных призмах (Франка—Риттера, Николя, Гласа-Томпсона и др.) обыкновенный луч претерпевает на поверхности раздела между призмами полное внутреннее отражение и отводится в сторону. Необыкновенный же луч проходит сквозь обе призмы и становится линейно поляризованным. Плоскостью поляризации обычно считается плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла и направление колебаний обыкновенного луча.

Поляризационные призмы обладают высоким коэффициентом пропускания и почти полностью поляризуют свет. Их недостатки —

малая входная площадь призмы и сравнительно малый (до 15°) апертурный угол поляризации. В связи с этим призмы нужно устанавливать в параллельном световом потоке, что не всегда удобно в конструктивном отношении.

В некоторых узлах геодезических приборов применяют поляризационные пластинки из двулучепреломляющих кристаллов с разностью хода между обыкновенным и необыкновенным лучами в $1/4$ и $1/2$ длины волны, называемые соответственно четвертьволновыми и полуволновыми пластинками. Их изготавливают из кварца, слюды, селенита и др. Необходимая разность хода лучей достигается подбором толщины пластинки. Так, пластинка из кварца, соответствующая $1/4 \lambda$ для желтого света должна иметь толщину около 15 мкм, а из слюды — около 36 мкм. Изготавливать и эксплуатировать такие тонкие пластинки неудобно, поэтому на практике используют четвертьволновые пластинки, дающие разность хода лучей $(N + 1/4)\lambda$, где N — целое число.

Если на пластинку в $1/4 \lambda$ поляризованный свет падает по нормали линейно так, что главная оптическая ось пластинки и плоскость поляризации падающего луча составляют между собой угол 45° , то свет, вышедший из пластинки, становится поляризованным по кругу. Наоборот, эта же пластинка может превратить свет поляризованный по кругу в линейно поляризованный.

Если через четвертьволновую пластинку пропустить дважды (в прямом и обратном направлениях) один и тот же поляризованный свет, то плоскость поляризации светового потока повернется на 90° . Это явление, в частности, использовалось в светодальномере «Кристалл» для осуществления компенсационного способа наблюдений. С помощью пластинки в полволны плоскость поляризации линейно поляризованного света можно повернуть на 90° .

Для получения поляризованного света в новой геодезической технике широко используют *поляроиды*, представляющие собой слой (или срез) однообразно ориентированных кристаллов, обладающих *дихроизмом*, т. е. явлением различного поглощения лучей с различным направлением поляризации, нанесенных на прозрачную основу. Дихроизмом обладают многие вещества и среди них йодистый хинин-геропатит, названный по имени английского химика Геропата (1850 г.). Геропатит — это мельчайшие кристаллы, имеющие форму иголок, причем ось наибольшего поглощения света в них совпадает с осью иглы. Для получения поляроида массу геропатита наносят на подогретую до состояния размягчения поливиниловую пленку, а затем быстро растягивают ее в длину в 3—5 раз. При растяжении игольчатые кристаллы геропатита самоориентируются в направлении растяжения пленки. Высушенная пленка заклеивается между двумя защитными стеклами, предохраняющими ее от влаги.

Кроме геропатитовых поляроидов известны и другие, состоящие из дихроичных молекул, «выстроенных» в ряд. Преимущество поляроидов — удобная форма, большие размеры (до 300 мм в диаметре), больший чем у призм апертурный угол поляризации и дешевиз-

на изготовления. Недостатки — несколько большее, чем у призм, поглощение света и неодинаковая степень поляризации в пределах видимой области спектра. Поляроиды не выдерживают нагревания более 80°C .

Пропускная способность поляризующих устройств для естественного света не превышает 50%. Учитывая же поглощение в поляризаторе как темном фильтре и отражение на разделах стекло — воздух, пропускная способность поляризующих призм из исландского шпата составляет 42—46%, а поляроидов — 32—40%.

§ 1.5. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

Совокупность оптических деталей, установленных в положение, заданное расчетом и конструкцией, составляет оптическую систему прибора. В геодезических приборах используют следующие оптические детали: линзы, зеркала, призмы, клинья, светофильтры, дифракционные решетки и др.

Линзы. *Линзами* называют детали из оптически прозрачных материалов, ограниченных двумя преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью тела вращения. По преломляющему действию линзы делятся на положительные (собираательные) и отрицательные (рассеивающие). В свою очередь собираательные линзы делятся на двояковыпуклые и плосковыпуклые, а рассеивающие — на двояковогнутые, плосковогнутые и вогнутовыпуклые.

Прямую, соединяющую центры сферических поверхностей линз, называют *оптической осью*. Радиус кривизны преломляющей поверхности, толщина и показатель преломления линзы определяют ее оптические свойства. Величину, обратную заднему фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы и определяют из выражения $\varphi = 1/f$. Единицей оптической силы является *диоптрия* — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием, равным 1 м.

В тех случаях, когда необходимо получить изображение в виде линии или полосы, а также равномерное бесструктурное изображение, применяют цилиндрические линзы (рис. 1.3), обладающие в двух взаимно перпендикулярных сечениях различными оптическими свойствами.

Пусть свет от точечного источника Q , расположенного на конечном расстоянии, падает на линзу. Длина изображения $\overline{Q'Q''}$ зависит от длины линзы L_m и линейного увеличения. Полоса $\overline{Q'Q''}$ практически криволинейна и обращена выпуклостью к линзе. Если цилиндрическую линзу установить перед плоскостью предмета, то можно получить оптическое сопряжение предметов, расположенных на разных расстояниях друг от друга в разных сечениях. Положительная цилиндрическая линза, установленная вблизи плоскости изображения, вызывает ее сужение, а отрицательная — расширение.

Цилиндрические линзы применяют для развертки лазерного луча в горизонтальной или вертикальной плоскости, а в светодайном номере МСД-1 — для устранения влияния фазовости поля на результаты измерений.

Аксиконы. Аксиконы представляют собой линзу, имеющую одну поверхность в виде плоскости, а другую — конической или сферической формы (рис. 1.4). Если поместить перед аксиконом точечный источник света Q , то лучи 2, выходящие под одним и тем же углом к оптической оси, будут одинаково преломляться и сойдутся

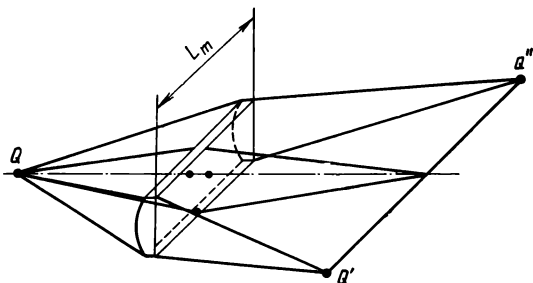


Рис. 1.3. Развертывание изображения точечного источника света в полосу с помощью цилиндрической линзы

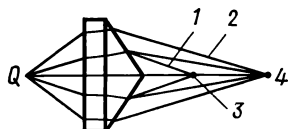


Рис. 1.4. Схема аксикона: 1, 2 — лучи, расположенные под разными углами к оптической оси аксикона; 3 и 4 — изображения точечного источника Q , создаваемые аксиконом

на оптической оси в одной точке 3, где создадут слабое изображение. Лучи, выходящие от источника света под более острым углом, создадут изображение 1 на оптической оси, расположенное ближе к аксикону, а под менее острым углом — дальше от аксикона. Таким образом, на каком бы расстоянии от аксикона ни был размещен источник света, позади него будет создан ряд светящихся изображений в виде линии. При использовании ярких источников света (лазеров) аксиконом можно задать световую линию, например при измерениях створа; в зрительных трубах аксиконом можно получить изображение яркого источника света в плоскости перекрестия сетки нитей без всякой фокусировки. Аксикон устраняет ошибки, возникающие из-за различных дефектов в направляющих устройствах для перемещения фокусирующего компонента.

Призмы. Изменение направления оси системы при переходе от пространства предмета к пространству изображений, поступательное смещение оси системы, оборачивание изображений и целый ряд других задач требуют применения в оптической системе призм и зеркал. На рис. 1.5 изображена прямоугольная призма Дове со срезанной нерабочей частью. Лучи света S_1 и S_2 , параллельные гипотенузной грани BC , преломляются на катетных гранях, отражаются от гипотенузной и выходят из призмы, не меняя первоначального направления. Если луч не параллелен грани BC (луч S_3), то

он выйдет из призмы под углом преломления, равным углу падения луча на входной грани. Призма не отклоняет лучей и не смещает их; она дает зеркальное изображение.

В оборачивающих системах, называемых *призмами Порро*, ход пучка не сохраняется в одной и той же плоскости (рис. I.6). Система призм Порро I рода состоит из двух прямоугольных призм 1 и 2 с двумя отражениями, раз-

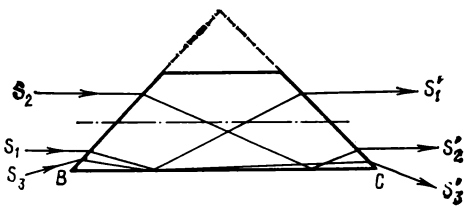


Рис. I.5. Призма Дове

вернутых относительно друг друга на 90°. Такую систему используют для смещения оси луча по высоте и в горизонтальной плоскости. Систему призм Порро II рода можно рассматривать как систему из четырех призм с одним отражением в каж-

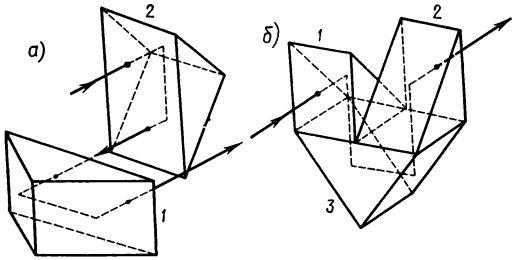


Рис. I.6. Системы призм Порро:
а — I рода; б — II рода



Рис. I.7. Трипельпризма

дой, или же как систему из трех призм, в которой две призмы — первая 1 и последняя 2 имеют одно отражение, а средняя 3 — прямоугольная — два отражения. Систему используют большей частью для отклонения оптической оси в горизонтальной плоскости. В совокупности с объективом она дает прямое изображение. Призмы системы Порро применяют в нивелирах НС.

Трипельпризма. Трипельпризма (углоковый отражатель) — четырехгранная стеклянная пирамида, на три грани которой, составляющие друг с другом прямые углы, нанесены зеркальные отражательные покрытия (рис. I.7). Основное свойство таких призм заключается в том, что падающий на входную грань пучок световых лучей после отражения от зеркальных граней выходит из призмы параллельно падающему лучу, но в противоположном направлении. Это свойство сохраняется и в том случае, если входная грань недостаточно точно ориентирована по отношению к источни-

ку света, т. е. падение луча отличается от нормального на несколько градусов.

Обычно грани призмы металлизируют, что устраняет деполяризацию света, возникающую при полном внутреннем отражении. Отражательная способность металлизированных трипельпризм составляет 60—65%.

Расходимость отраженного пучка возрастает из-за дифракции и неточного изготовления трипельпризмы:

$$\theta_{\text{отр}} = \theta_0 + \theta_d + \theta_{\text{и}},$$

где θ_0 — расходимость пучка на входе в трипельпризму; θ_d и $\theta_{\text{и}}$ — составляющие угла расходимости отраженного пучка, обусловленные дифракцией и неточностью изготовления.

Величину θ_d можно определить из выражения

$$\theta_d = \lambda / (d \cos \beta),$$

где λ — длина волны падающего излучения; d — линейный размер входной грани одной трипельпризмы; β — угол между лучом и нормалью к отражателю.

Расходимость пучка из-за неточности изготовления трипельпризмы обычно увеличивается на 20—30'', но при тщательном их изготовлении эта величина может составлять 2—5''.

Трипельпризмы широко применяются в инженерно-геодезических работах при выполнении светодальномерных измерений.

Клинья. Призму с малым преломляющим углом называют *оптическим клином*. Луч, проходящий через клин в плоскости главного сечения, отклоняется клином к его основанию. Клинья применяют для получения и измерения малых углов отклонения луча. Систему из двух клиньев называют *компенсатором* и применяют в оптических теодолитах и точных нивелирах.

Пластины плоскопараллельные. Прозрачное тело, ограниченное двумя параллельными гранями, называют *плоскопараллельной пластиной* (рис. 1.8). В оптической системе она располагается плоскими гранями перпендикулярно к оптической оси линзы.

Пучок света, падающий на грань плоскопараллельной пластинки под углом i , изменяет свое направление дважды: сначала преломившись на грани $I-I$ (в точке O_1), а затем — на грани $II-II$ (в точке O_2). В однородной среде такая пластинка сместит пучок света относительно первоначального направления на величину h и параллельно ему. Величина смещения пучка зависит от толщины d пластинки и угла падения i .

Плоскопараллельная пластинка не искажает изображения, если находится на пути параллельных лучей. В сходящемся пучке пластинка вызывает аберрации. Плоскопараллельные пластинки применяют в точных нивелирах и оптических дальномерах.

Светопровод (рис. 1.9, а, б). Светопровод — стеклянный пруток круглого, прямоугольного или другого сечения с полированной боковой поверхностью и торцами. Для обеспечения полного

внутреннего отражения светового пучка светопроводы изготавливают из материала, имеющего показатель преломления n_c , и покрывают оболочкой, имеющей показатель преломления n_0 . Критический угол полного внутреннего отражения

$$\sigma_{\max} = \arcsin(n_c/n_0) \text{ при } n_c > n_0.$$

На боковой поверхности светопровода происходит полное внутреннее отражение лучей, идущих внутри светопровода. Луч, падающий под углом σ_1 к оси, выйдет из светопровода под тем же углом, если число отражений четное, т. е. параллельно падающему лучу.

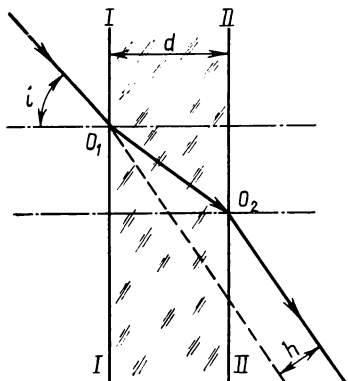


Рис. 1.8. Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

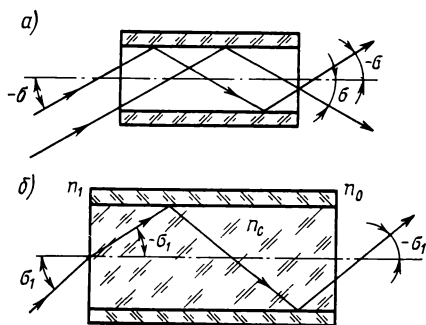


Рис. 1.9. Светопровод в виде цилиндрической трубки (а) и ход лучей в волокне с оболочкой (б)

Если число отражений нечетное, то абсолютное значение угла будет такое же, а знак изменяется на противоположный.

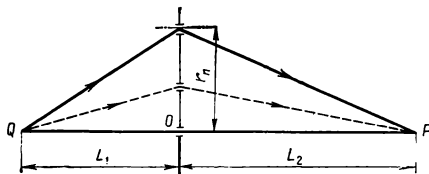
В настоящее время созданы светопроводы с малым коэффициентом затухания (порядка 0,5 дБ/км). Их применяют в лазерных геодезических приборах для передачи светового потока от лазера в зрительную трубу теодолита или нивелира.

Светофильтры. Плоскопараллельный слой какой-либо среды, обладающий избирательным пропусканием света, называется *светофильтром*. Светофильтры бывают из окрашенного в массу стекла, из окрашенных пластмасс, желатиновые, жидкие, газовые, поляризационные и интерференционные. Они изменяют как яркостные, так и цветовые соотношения между видимыми объектами, уменьшают хроматическую аберрацию. Светофильтры используют в светодалномерах для выделения полезного светового сигнала на фоне дневной освещенности.

Пластины зонные. Если между источником света и наблюдателем поместить поверхность произвольной формы и создать на ней прозрачные полосы, выбрав границы прозрачных зон таким образом, чтобы для точек, расположенных внутри этих зон, суммы расстояний до источника и наблюдателя отличались между собой

на целое число длин волн (см. рис. I.1), то в точке наблюдения, в силу сложения амплитуд колебаний, будет видно яркое изображение источника света. Зонная пластина может создавать изображе-

Рис. I.10. Определение соотношения между расстоянием от источника света и изображением до зонной пластины



ние подобно линзе или зеркалу. Для получения изображения хорошего качества оптические пути лучей должны отличаться от целого числа волн не более чем на $(1/4)\lambda$. Разность хода между волнами, пришедшими от двух соседних прозрачных зон, в

обычной зонной пластине должна составлять длину волны света. Если источник Q (рис. I.10) расположен далеко от зонной пластины (параллельные лучи света), то яркое пятно света сформируется на расстоянии $f = r_n/n\lambda$ (r_n — радиус n -й зоны), где находится один из фокусов. При использовании источника, расположенного вблизи зонной пластины (расходящийся световой поток), соотношение между расстояниями L_1 и L_2 аналогично соотношению для линз и составляет $1/f = 1/L_1 + 1/L_2$.

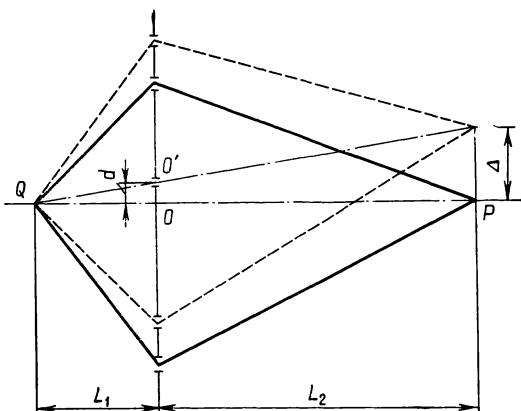


Рис. I.11. Смещение изображения источника света при смещении зонной пластины в направлении, перпендикулярном линии створа

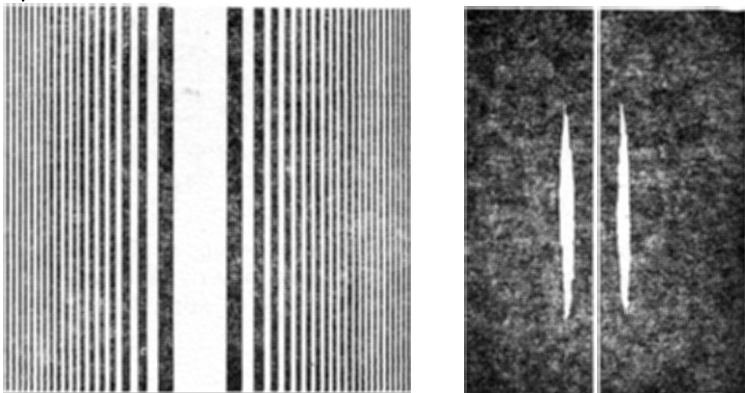
Зонная пластина имеет свойство формировать на расстоянии L_2 изображение точечного источника света Q строго симметрично относительно линии QO , соединяющей источник и ось симметрии зонной пластины. Если переместить зонную пластину в направлении, нормальном к линии створа QO на величину $d = \overline{OO'}$ (рис. I.11), то изображение P источника света сместится на величину $\Delta = d[(L_1 + L_2)/L_2]$ в ту же сторону.

Зонная пластина с круговыми зонами дает подобное изображение точечного источника света или фокусирует параллельный пучок когерентного света в виде точки.

На рис. I.12, а представлена одномерная зонная пластина с вертикальными зонами и изображение источника света, даваемое ею; на рис. I.12, б — двумерная зонная пластина в виде совокупности

прямоугольных зон и изображение точечного источника света, даваемое ею в виде креста.

а)



б)

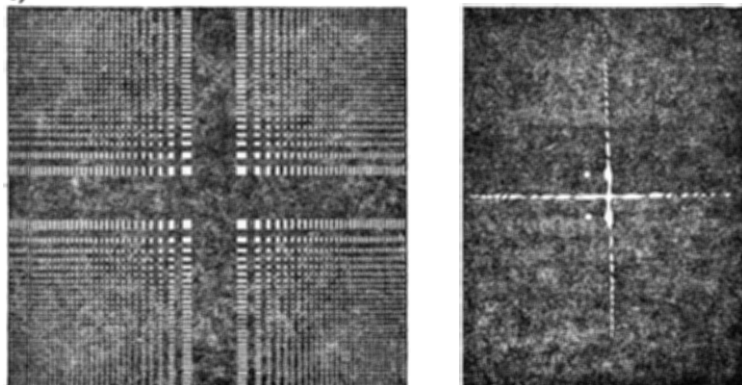


Рис. I.12. Зонные пластины и изображения источника света, даваемые ими:

а — одномерная пластина; *б* — двумерная пластина

Зонные пластины применяют в лазерных створофиксаторах с дистанционным съемом информации о положении технологического оборудования.

§ I.6. ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Глаз (рис. I.13) имеет шарообразную форму и заключен в сухожильную оболочку (склеру), передняя часть которой (роговица) прозрачная и имеет форму, близкую к сфере. К склере прилегает сосудистая оболочка, образующая вблизи перехода склеры в роговицу утолщение в форме кольца (ресничное тело). Сосудистая оболочка не прилегает к роговице, а отходит от нее, образуя радуж-

ную оболочку с отверстием (зрачком). В радужной оболочке имеются мышечные волокна, сокращение которых изменяет размеры зрачка.

В кольце ресничного тела находится хрусталик, прикрепленный к нему волокнами тончайшей перепонки, которой он окружен. Хрусталик представляет собой двояковыпуклую линзу с различными радиусами кривизны. С задней стороны глаза до ресничного тела к поверхности сосудистой оболочки примыкает сетчатая оболочка (ретины), очень сложная по строению, состоящая из десяти слоев, один из которых световоспринимающий. Попадающая на нервные элементы (колбочки и палочки), свет вызывает их раздражение, и зрительное восприятие по зрительному нерву передается в головной мозг.

Глаз имеет две особые области: в одной из них — желтом пятне, получается наибольшая острота зрения; в другой — слепом пятне, зрительного восприятия нет. Передняя камера глаза (между роговицей и хрусталиком) заполнена водянистой влагой, а задняя (между хрусталиком и сетчаткой) — стекловидным телом.

Глаз можно рассматривать как оптическую систему, принципиальное отличие которой от обычной оптической системы состоит в том, что расстояние от хрусталика до сетчатки постоянно. В обычной системе резкое изображение на экране возникает при определенном положении предмета относительно этой системы, и при изменении расстояния от предмета до оптической системы необходимо измерять расстояние до экрана. Глазом же мы видим предметы резко при различном удалении за счет изменения кривизны поверхности и соответственно фокусного расстояния хрусталика.

Способность глаза резко видеть предметы, различно удаленные от него, называется *аккомодацией*. Аккомодационная мышца глаза, к которой прикреплен хрусталик, способна увеличить или уменьшить его кривизну. При спокойном состоянии мышцы нормальный глаз аккомодируется на бесконечность. Чем ближе предмет к глазу,

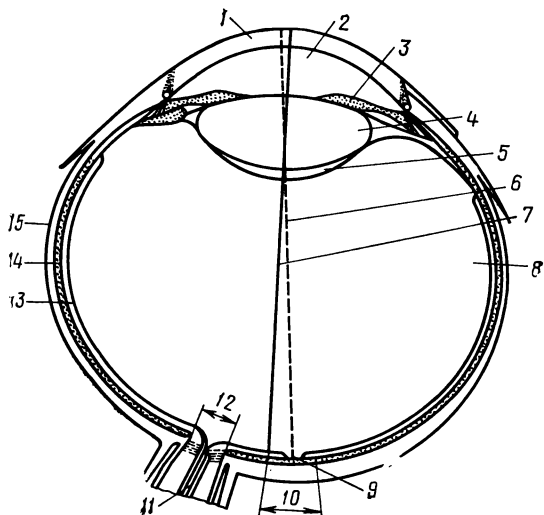


Рис. 1.13. Глаз человека:

1 — роговица; 2 — передняя камера; 3 — радужная оболочка; 4 — хрусталик; 5 — захрусталиковое пространство; 6 — зрительная ось; 7 — оптическая ось; 8 — стекловидное тело; 9 — центральная ямка; 10 — желтое пятно; 11 — зрительный нерв; 12 — слепое пятно; 13 — ретины; 14 — сосудистая оболочка; 15 — склера

тем сильнее напряжение мышцы. Наименьшее расстояние, при котором нормальный глаз привык к аккомодации в течение длительного времени, называется *расстоянием наилучшего зрения*. Для нормального глаза оно составляет около 25 см.

Способность глаза раздельно видеть изображение двух точек называется *разрешающей способностью*. Разрешающая способность глаза близка к одной угловой минуте. Пределы разрешающей способности обусловлены структурой сетчатки. Если изображение предмета уместается в пределах одного элемента сетчатки (например, колбочки), то глаз, не различая формы, воспринимает этот предмет в виде точки. Две точки глаз различает отдельно, если изображения их на сетчатке будут находиться на разных элементах, разделенных по крайней мере одним нераздраженным элементом. Высокая разрешающая способность глаза при оценке смещения линий имеет большое значение при измерении дальности оптическими дальномерами и при отсчетах по шкалам измерительных приборов.

Сетчатка воспринимает лучистую энергию в пределах $\lambda = 0,380 - 0,780$ мкм как световое раздражение. Энергия более коротких и длинных волн поглощается стекловидным телом глаза. Максимальная спектральная чувствительность дневного (колбочкового) зрения находится в области 0,556 мкм (желто-зеленый свет), максимальная спектральная чувствительность палочкового зрения приходится на длину волны 0,507 мкм (ночное зрение).

При работе с оптическими приборами в условиях дневного освещения действует дневное зрение. При работе ночью — в зависимости от освещенности предмета — смешанное или ночное. Признак ночного зрения — неразличимость цветов, все предметы кажутся голубовато-серыми, как при лунном освещении. Дисперсионная поправка при визуальных светодальномерных измерениях вводится для длины волны преобладающего зрения.

§ 1.7. 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.

Электромагнитное излучение представляет собой энергию, передаваемую в пространстве в форме электромагнитных волн. Если электрический заряд находится в состоянии колебания или ускорения, то от него распространяется возмущение в виде электрических и магнитного полей, называемое *электромагнитной волной*. Частотный спектр таких волн очень велик: от радиоволн до гамма-излучения.

Электромагнитная энергия излучается и поглощается порциями (квантами), называемыми *фотонами*, которые ведут себя подобно частицам. Вследствие этого изменение энергии всегда происхо-

дит скачком, т. е. дискретно. Энергия E (Дж) фотона пропорциональна частоте ν , т. е. $E=h\nu$, где h — постоянная Планка.

Таким образом, электромагнитное излучение обладает свойствами как частиц, так и волн. В области гамма-излучения проявляются только свойства частиц, так как длина волны исчезающе мала. В области оптического диапазона проявляются свойства частиц и волн; в области радиодиапазона излучение характеризуется лишь волновыми свойствами. Рассматривая взаимодействие электромагнитной энергии с материей, необходимо использовать как квантовую, так и волновую теории.

В соответствии с представлениями современной физики, атом вещества состоит из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Вследствие волновых свойств электронов их движение происходит не по орбите, а в некоторой области, в которой наиболее вероятным местом является орбита. Движение электрона вокруг ядра характеризует его энергетическое состояние. Величина энергии электрона может принимать лишь определенные дискретные значения, характеризующиеся *квантовыми числами*.

Каждое энергетическое состояние электрона, по аналогии с потенциальной энергией тела, поднятого на некоторую высоту, принято изображать графически в виде горизонтальной черты на определенном уровне (E_1, E_2, \dots, E_i), соответствующем потенциальной энергии электрона (рис. I.14). Чем дальше электронная орбита от ядра, тем большей энергией E обладают «населяющие» ее электроны. В основном, или нормальном состоянии (состоянии термодинамического равновесия), электроны распределяются по орбитам так, чтобы атом обладал энергией E_1 , наименьшей из всех возможных значений. Ближайшие к ядру орбиты при этом заполняются электронами до предела. Не заполненными могут быть только более далекие (внешние) орбиты. Такой атом может только поглощать энергию и в нормальном состоянии существовать неограниченное время.

При воздействии на атом внешней электромагнитной энергии, нагревании, облучении светом, бомбардировке потоком элементарных частиц или при столкновении атомов между собой энергия одного может перейти к другому и атом возбуждается: его электроны переходят на более высокие орбиты и энергетическое состояние атома может быть записано в виде $E_i > E_1$, причем, как уже указывалось, возможны только определенные (дискретные) значения уровней энергии.

Возбужденных состояний атома может быть несколько. Время пребывания атома в возбужденном состоянии ограничено. Например, время жизни возбужденных атомов водорода составляет около 10^{-8} с. Существуют некоторые возбужденные состояния — *метастабильные уровни (метастабильные атомы)*, характеризующиеся большим временем жизни. В некоторых средах (например, газах)

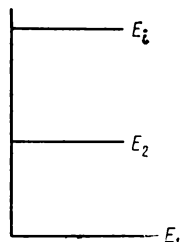


Рис. I.14. Графическое изображение уровней энергии

метастабильные атомы имеют важное значение. При столкновениях они отдают свою энергию, способствуя этим возбуждению атомов рабочей среды. При переходах атома из состояния с энергией E_i в состояние с энергией E_k при $E_i > E_k$ атом отдает, а при $E_i < E_k$ — поглощает энергию на частоте перехода (Гц)

$$\nu = (E_i - E_k)/h. \quad (1.9)$$

Для атомов различных веществ и разных энергетических уровней характерно собственное значение частоты перехода ν . Совокупность переходов между энергетическими уровнями образует энергетический спектр поглощения или излучения атома. Каждому переходу с излучением соответствует определенная спектральная линия со значением частоты ν или длины волны λ , т. е. $\lambda = c/\nu$, где c — скорость света.

В малоискаженном виде свойства отдельных атомов проявляются в газах, где взаимодействие между атомами ничтожно. В твердом теле соседние атомы находятся настолько близко друг к другу, что внешние оболочки соприкасаются и даже перекрываются. В этом случае на электроны действует не только ядро собственного атома, но и ядра соседних атомов, что приводит к смещению и образованию широких энергетических уровней и соответственно широкополосности энергетического спектра.

Для атома, находящегося в верхнем энергетическом состоянии, существует определенная вероятность перехода через некоторое время на более низкий энергетический уровень. При переходе атом излучает квант энергии. Процесс излучения при саморазвольном (спонтанном) переходе электрона хаотичен. Атомы излучают свет независимо друг от друга и не согласованно по времени, поэтому спонтанное излучение некогерентно и широкополосно. Примером спонтанного излучения является свет от обычной электрической лампы накаливания.

Наряду со спонтанным возможно вынужденное (индуцированное) излучение возбужденного атома под воздействием внешней электромагнитной волны. При этом атомы переходят с верхних энергетических уровней на нижние согласованно и излучают вторичную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения полностью совпадают с характеристиками волны, вызвавшей индуцированное излучение. Существует также вынужденное поглощение. Это явление имеет место при переходе атома с уровнем энергии E_1 на более высокий E_2 за счет поглощения электромагнитной энергии. Если количество атомов, переходящих на нижние уровни, равно количеству атомов, переходящих на верхние, то возникает так называемое *резонансное поглощение*, и индуцированное излучение не имеет места. Таким образом для получения индуцированного излучения полезны лишь переходы сверху вниз, усиливающие первоначальную волну.

Явление вынужденного излучения дает возможность управлять излучением атомов и получать когерентное излучение. Для того чтобы осуществить индуцированное излучение, необходимо выпол-

нение следующих условий: резонанса, инверсии населенности уровней и положительной обратной связи.

Под *резонансом* подразумевают совпадение частоты волны, вызвавшей индуцированное излучение, с одной из частот энергетического спектра атома. Резонанс связан с выбором рабочего вещества и его агрегатным состоянием.

Инверсия (обращение) населенностей связана с переводом электронов с нижних на более высокие «разрешенные» энергетические уровни. Для осуществления генерации нужно, чтобы из двух выбранных рабочих уровней верхний был заселен больше, чем нижний.

Инверсия населенностей достигается за счет так называемой накачки — подведения световой или электромагнитной энергии возбуждения извне.

Для управления индуцированным излучением необходимо, чтобы часть излучаемой световой энергии все время оставалась внутри рабочего вещества, вынуждая к индуцированному излучению все больше и больше новых атомов. Эта задача решается с помощью зеркал. Рабочее вещество помещается между двумя плоскими параллельными друг другу зеркалами (рис. 1.15, а), одно из которых полупрозрачно. Эти зеркала образуют «открытый» оптический резонатор (резонатор Фабри—Перо), осуществляющий положительную обратную связь: часть стимулированного излучения все время возвращается внутрь резонатора за счет отражения полупрозрачным зеркалом. Если угол падения фотонов на зеркала близок к прямому, то поток фотонов будет многократно проходить через активную среду, не выходя за пределы зеркал, увеличивая при этом интенсивность излучения. В этом случае имеет место резонансное усиление. Для возникновения генерации света усиление должно быть таким, чтобы компенсировались потери, обусловленные поглощением в зеркалах при отражении и излучением через открытую боковую поверхность активной среды.

Зеркала резонатора должны обладать большим (около 100%) коэффициентом отражения. В этом случае амплитуда световых колебаний на отражающем слое близка к нулю. Данное условие приводит к тому, что будет иметь место совпадение фаз падающей и отраженной волн. Если в промежутке между двумя зеркалами укладывается целое число полуволн световых колебаний, то в оптическом резонаторе возникает так называемое стоячее световое поле.

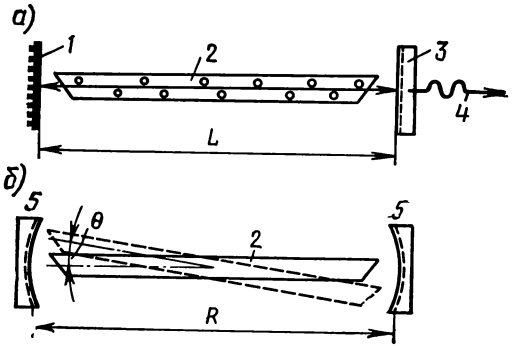


Рис. 1.15. Схема оптического резонатора с плоскими (а) и сферическими (б) зеркалами:

1 — зеркало; 2 — трубка с рабочим веществом; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — индуцированное излучение; 5 — сферические зеркала

Расстояние между зеркалами при этом должно быть кратно длине полуволны $\lambda/2$, т. е. $L = n(\lambda/2)$, где n — целое число, равное 1; 2; 3; ...

Частота резонанса световых колебаний

$$\nu_0 = nc/(2L), \quad (1.10)$$

где c — скорость света в рабочей среде.

Для установки в нужное положение зеркала снабжаются юстировочными винтами, а сам процесс установки зеркал называется *настройкой оптического резонатора*.

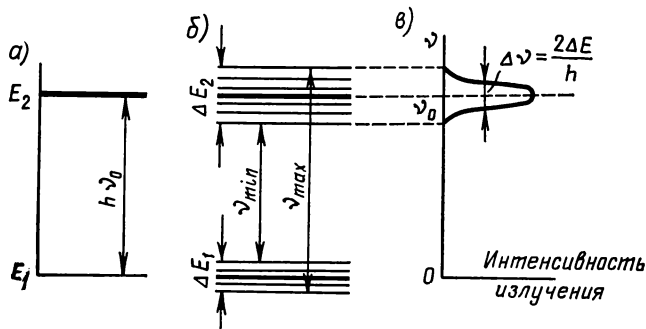


Рис. 1.16. Положение уровней энергии:
 а — теоретическое; б — действительное; в — спектр излучения

Помимо плоских зеркал в лазерах применяют конфокальные резонаторы — открытые оптические резонаторы, состоящие из сферических зеркал (рис. 1.15, б), находящихся на расстоянии, равном их радиусу кривизны R . Оптический резонатор настраивают изменением наклона трубки с рабочим веществом. Если в первом положении трубки (сплошная линия) луч света проходит расстояние $L = R$, то при наклоне на угол θ

$$L_\theta = R(1 + \theta^2).$$

Например, при $R = 300$ мм и угле наклона $\theta = 1'$, что составляет $1 : 3438$ рад, $L_\theta = 300(1 + 1/3438^2) = 300,0003$ мм, т. е. на 0,3 микрона больше. Конфокальные резонаторы проще в настройке и имеют меньшие дифракционные потери, чем резонаторы с плоскими зеркалами.

Спектр излучения на первый взгляд должен быть линейчатым. В действительности из-за «размыва» уровней энергии возникает некоторая ширина спектра излучения. На рис. 1.16, а показано теоретическое положение уровней E_1 и E_2 , на рис. 1.16, б — действительное положение основного значения уровней E_1 и E_2 (толстые линии) и их подуровней (тонкие линии), наличие которых, например в газах, обусловлено столкновением частиц между собой и со стенками сосуда, в котором находится рабочее вещество. Кроме

того, уровни расширяются из-за эффекта Доплера, вызываемого тепловым движением частиц.

Таким образом, между основным уровнем и подуровнями возможен переход на частотах от ν_{\min} до ν_{\max} . На рис. 1.16, в изображен спектр индуцированных колебаний с максимумом на частоте ν_0 ; ширина его

$$\Delta\nu = 2\Delta E/h,$$

где ΔE — наибольшая разность энергий подуровней, Дж.

Излучение лазеров отличается от обычных источников высокой монохроматичностью, когерентностью во времени и пространстве, высокой направленностью и большой спектральной плотностью мощности.

Любое излучение характеризуется распределением энергии по частотам (или длинам волн), называемым *спектром* или *полосой частот излучения*. Обычный (белый) свет имеет довольно широкую полосу частот излучения. Ширину полосы обычно характеризуют *степенью монохроматичности*, выражаемой соотношением

$$\Delta\lambda/\lambda_{\max},$$

где $\Delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/2$ — полуширина полосы излучения; $\lambda_{\max} = c/\nu_{\min}$ и $\lambda_{\min} = c/\nu_{\max}$ — максимальная и минимальная длины волны излучения.

Если $\Delta\lambda/\lambda_{\max} = 0$, излучение является идеально монохроматическим; если $\Delta\lambda/\lambda_{\max} \ll 1$ — квазимонохроматическим.

Идеально монохроматического излучения не существует даже в том случае, когда на элементарные частицы не действуют никакие внешние силы. Это обусловлено естественной шириной энергетических уровней (уровни не являются бесконечно узкими), доплеровским уширением уровней в зависимости от направления и скорости движения частиц относительно приемника излучения, уширением спектральной линии в кристаллах из-за колебаний кристаллической решетки и т. д.

Степень монохроматичности зависит от величины воздействия между частицами активного вещества и от частоты спектра. Активные вещества, состоящие из газовых компонентов, имеют более узкую полосу частот излучения. Газовые лазеры имеют высокую частоту спектра и дают возможность получения одночастотного режима генерации. Твердотельные и полупроводниковые лазеры имеют ширину спектра на несколько порядков большую, чем газовые. Излучение обычных источников света немонахроматично, т. е. имеет широкую полосу излучаемых частот $\Delta\lambda$. У газовых лазеров, работающих в одномодовом режиме, $\Delta\lambda$ достигает величины 10^{-10} мкм, степень монохроматичности $\Delta\lambda/\lambda_{\max} \approx 10^{-10}$.

Высокая степень монохроматичности излучения лазеров позволяет увеличить отношение сигнал/шум на входе приемника за счет спектральной селекции, которая может быть осуществлена применением узкополосных интерференционных фильтров или приемников, чувствительных к излучению в узкой области спектра.

При индуцированном излучении происходят малые флуктуации частоты на величину $\Delta\nu$. Промежуток времени, в течение которого не происходит изменения $\Delta\nu$, измеряется величиной $\Delta t = 1/\Delta\nu$, называемой *временем когерентности*. Чем больше величина Δt , тем строже выполняются фазовые соотношения между частями волны, излучаемыми в разные моменты времени.

Пространственно когерентными источниками считаются такие, которые излучают колебания с одинаковыми фазами или с постоянной разностью фаз. Если по всему сечению активной среды все ато-

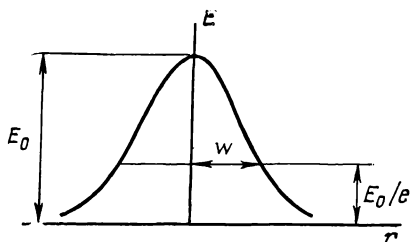


Рис. 1.17. Распределение интенсивности в пучке ОКГ, генерирующего на основной моде TEM_{00}

мы излучают в одной фазе, то фронт суммарной волны будет бесконечно близок к фронту плоской волны. Постоянство кривизны фронта волны во времени и пространстве определяется когерентностью излучения.

В идеальном случае излучение лазера представляет собой плоскую или сферическую волну с большим радиусом кривизны, для которой распределение интенсивности подчиняется закону Гаусса (рис. 1.17). При гауссовом рас-

пределении интенсивности мощность излучения в основном сконцентрирована вблизи оси распространения, т. е. в центре пучка лазерного излучения наблюдается максимум интенсивности, которая спадает к краям по экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-2r^2/\omega^2},$$

где I — интенсивность излучения на расстоянии r от оси распространения пучка; I_0 — интенсивность излучения на оси распространения пучка; ω — поперечное сечение пучка или расстояние от оси пучка, на котором интенсивность I в e раз меньше по сравнению с интенсивностью I_0 на оси пучка.

При гауссовом распределении интенсивность I_0 является основной модой TEM_{00} .

Распределение интенсивности в пучке лазерного излучения может отличаться от гауссового и зависит от конфигурации и вида симметрии сечения резонатора.

При работе лазера в многомодовом режиме картина излучения лазера может изменяться в зависимости от расстояния до него, так как между модами имеется сдвиг по фазе, зависящий от расстояния. Генерация на основной моде — необходимое условие получения высокой степени пространственной и временной когерентности и, как следствие, минимально возможной угловой расходимости пучка лазерного излучения, которая определяется только дифракционными явлениями. Ширина спектра излучения зависит от числа возбуждения мод; минимальная ширина спектра получается при генерации на одной аксиальной моде TEM_{00} .

Одномодовый режим генерации лазера можно получить различными способами, например, настройкой резонатора, изменением размеров зеркал, мощности накачки. Величина угловой расходимости зависит от количества типов колебаний, образующихся в резонаторе: в одномодовом режиме она минимальная, в многомодовом — максимальная. Газовые лазеры имеют расходимость 5—10', твердотельные — несколько десятков минут и полупроводниковые 15—20°.

Мощность оптического излучения определяется энергией, излучаемой в единицу времени. Выходная мощность газовых лазеров как правило меньше мощности твердотельных, вследствие относительно невысокой плотности возбужденных частиц газа.

Одна из особенностей лазерного излучения — невозможность получения высокой степени монохроматичности и направленности при большой мощности. Увеличение мощности вызывает расширение полосы частот, что уменьшает степень монохроматичности и когерентности. В ряде случаев даже при малой мощности излучения можно получить очень высокую спектральную плотность мощности, если излучение занимает узкий спектральный диапазон. Спектральная поверхностная плотность потока излучения лазеров может на несколько порядков превосходить спектральную поверхностную плотность потока излучения Солнца, равную $7 \cdot 10^3$ Вт/см². Хотя это и очень большая величина, но вся энергия распределяется в широком спектральном диапазоне (видимый участок спектра равен $3,5 \cdot 10^8$ МГц). Такую же плотность потока излучения можно получить для газового лазера с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм при мощности излучения около 2 мВт. В настоящее время для лазеров получена плотность потока излучения около 10^{11} Вт/см², что в миллиард раз больше солнечной.

По виду активного вещества лазеры принято делить на четыре группы: твердотельные, газовые, полупроводниковые (инжекционные) и жидкостные. Для технических целей в инженерной геодезии пока перспективны первые три типа лазеров.

Лазер твердотельный. Первым лазером был рубиновый; он создан в 1960 г. Рубин представляет собой драгоценный минерал — кристалл корунда (окись алюминия Al_2O_3) с небольшой (0,05%) примесью хрома. Красный цвет рубина объясняется тем, что при его освещении естественным светом часть атомов хрома возбуждается, а затем спонтанно переходит с высоких энергетических уровней на нижние, излучая при этом красный цвет.

Рубиновый лазер (рис. 1.18, а) состоит из активного вещества (кристалла рубина), генератора накачки и объемного оптического резонатора. Активное вещество (рубин) выполнено в виде цилиндрического стержня диаметром около 1 см и длиной 7—10 см. Торцевидные грани стержня отполированы и покрыты пленкой серебра, образующей отражающий слой объемного резонатора. Длина L резонатора должна быть «настроена» на длину волны λ генерируемого света, т. е. отношение $2L/\lambda = n$ должно быть целым числом. Одна из торцевых граней сделана полупрозрачной; через нее выхо-

дит луч света. В качестве генератора накачки используется газоразрядная неон-криптоновая лампа, дающая зеленое свечение.

В рубиновом лазере используют три энергетических уровня (рис. 1.18, б). При освещении кристалла рубина зеленым светом атомы (ионы) хрома возбуждаются и переходят с уровня E_1 на уровень E_3 , поглощая энергию зеленой части спектра. Через 10^{-7} с атомы хрома переходят с уровня E_3 на метастабильный уровень E_2 , время жизни атомов на котором около 10^{-3} с. При мощной лампе накачки за это время удается перевести на уровень E_2 более поло-

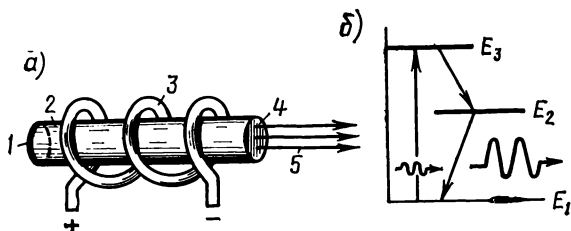


Рис. 1.18. Схема рубинового лазера (а) и его энергетические уровни (б):

1 — непрозрачное зеркало; 2 — кристалл рубина; 3 — генератор накачки; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — индуцированный свет

вины атомов хрома, что является необходимым условием усиления света. Если после этого ввести в кристалл слабый луч красного света в качестве «пускового сигнала», частота которого соответствует частоте перехода энергии с уровня E_2 на уровень E_1 , то, проходя через кристалл, луч будет переводить атомы (ионы) с метастабильного уровня E_2 на нижний уровень E_1 . При этом энергия введенного красного луча усилится за счет излучения атомов хрома.

Чтобы превратить усилитель в генератор, необходимо часть усиленного сигнала подать на вход усилителя вместо «пускового» луча, т. е. осуществить положительную обратную связь. Это обеспечивается, как уже указывалось, наличием зеркал оптического резонатора. Энергия света в резонаторе лавинообразно нарастает и в какой-то момент выходит из полупрозрачного зеркала в виде ослепительной вспышки с плотностью энергии в луче в 10^7 раз больше солнечной.

Рубиновый лазер излучает импульсы света на длине волны 0,6943 мкм. Длительность импульсов около 10^{-3} с. Энергия импульса в лазерах разных конструкций составляет от единиц до 10^8 Дж. Из-за сильного нагревания рубиновый лазер может работать только в импульсном режиме.

На основе рубинового лазера создано довольно много конструкций импульсных светодальномеров для измерения расстояний с точностью 5—10 м при дальности до 10 км без установки на определяемой точке специального отражателя и при условии, что отражающая способность объекта не менее 10%. Такие дальномеры приме-

няют главным образом в военном деле. Была попытка применения рубинового лазерного дальномера для топографических целей при съемке местности взамен измерения расстояния по рейке. Большая масса (около 20 кг) и энергоемкость (батарея аккумуляторов обеспечивает измерение 100 линий) не создают пока благоприятных условий для его применения. Рубиновый лазерный дальномер был успешно применен для оптической локации Луны и советского Лунохода-1, на борту которого установлен французский трипельпризменный отражатель.

Л а з е р г а з о в ы й. В газовых лазерах активная среда находится в газо- или парообразном состоянии. Из-за малой связи между атомами энергетический спектр газов отличается частотой генерации, соответствующей энергетическим уровням отдельных атомов и молекул. Другая особенность газов — их высокая оптическая однородность и малая плотность, что уменьшает рассеивание света и его рефракцию при прохождении активной среды. Это позволяет применить значительные по продольному габариту оптические резонаторы и, как следствие, получить высокую направленность и монохроматичность излучения.

К числу недостатков газовых лазеров относится их малая (по сравнению с твердотельными) мощность и низкий коэффициент полезного действия, что обусловлено малой плотностью вещества и значительно меньшим количеством возбужденных атомов, излучающих свет.

Особенность активной газовой среды — многообразие физических процессов, приводящих к инверсии населенностей. Такими процессами являются неупругие соударения атомов 1-го и 2-го рода, диссоциация молекул при соударениях их в электрическом поле, возбуждение атомов электронным ударом и светом и т. д. В подавляющем числе случаев инверсия населенностей в газовых лазерах достигается в процессе электрического разряда, поэтому такие лазеры называют *газоразрядными*.

Среди газоразрядных лазеров для целей инженерной геодезии наибольшее применение находит гелий-неоновый лазер. В таком лазере рабочим веществом являются нейтральные атомы неона (Ne). В электрическом разряде часть атомов неона переходит с основного уровня E_1 на возбужденные E_4 и E_5 (рис. 1.19). Инверсии населенностей в чистом ионе мешает метастабильный уровень E_2 . Эта трудность преодолевается введением в неон примеси гелия (He), у которого энергия возбуждения уровней E_2 и E_3 совпадает с уровнями E_4 и E_5 неона. В этом случае возбужденные атомы гелия, находящиеся на уровнях E_2 и E_3 , сталкиваясь с невозбужденными атомами неона, находящимися на уровне E_1 , отдают им свою энергию, и часть атомов неона дополнительно переходит на уровни E_4 и E_5 . Таким образом, здесь осуществляется резонансная передача возбуждения и создается дополнительная населенность верхних уровней неона.

Если правильно подобрать процентный состав смеси гелий-неон, то можно добиться того, что населенность уровней E_4 и E_5 неона

будет значительно превышать населенность этих уровней в чистом неоне, и создать таким образом инверсию населенностей, необходимую для процесса генерации света. Опустошение нижнего уровня E_3 неона, необходимое для условия генерации, происходит под влиянием соударений атомов со стенками газоразрядной трубки. Соударения со стенками опустошают и метастабильный уровень E_2 . Для того чтобы соударения со стенками газоразрядной трубки

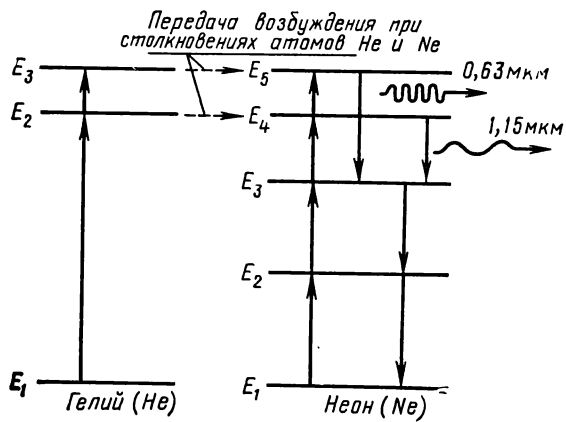


Рис. 1.19. Энергетические уровни гелий-неонового лазера

эффективно опустошали уровень E_3 , газовая смесь гелий-неон берется в пропорции 5 : 1 при общем давлении около $1,5 \cdot 10^2$ Па и диаметре трубки около 7 мм.

Рабочие уровни неона E_5 , E_4 и E_3 представляют собой спектр тесно расположенных подуровней (рис. 1.19). Поэтому частотный спектр гелий-неонового лазера может содержать до 30—40 спектральных линий в диапазоне видимого и инфракрасного излучения.

Длина гелий-неоновых лазеров колеблется от 0,17 до 1 м, что позволяет получать высокую направленность лазерного излучения. Расходимость пучка (мин)

$$\theta \approx 3438 \sqrt{\lambda/L},$$

где λ — длина волны излучения, мкм; L — длина оптического резонатора, мм.

Например, при $L=300$ мм и $\lambda=0,63$ мкм

$$\theta = 3438 \sqrt{0,63/(3 \cdot 10^5)} = 5'.$$

Гелий-неоновые лазеры излучают в красной области видимого спектра ($\lambda=0,6328$ мкм). Большинство лазеров, применяемых для геодезических работ в СССР и за рубежом, генерирует именно в этой области. Коэффициент полезного действия лазеров невысок —

около 0,1—0,01%, а выходная мощность лежит в пределах 0,1—0,001 Вт.

Общий вид лазера ОКГ-13 и его разрез показаны на рис. 1.20, *а*, *б*. Он состоит из газоразрядной трубки 5 (рис. 1.20) и оптического резонатора, состоящего из двух сферических зеркал 1, прижатых к инварному корпусу 6.

Газоразрядная трубка представляет собой герметическую стеклянную или кварцевую трубку диаметром около 7 мм, наполненную смесью газов. Активная среда возбуждается посредством электро-

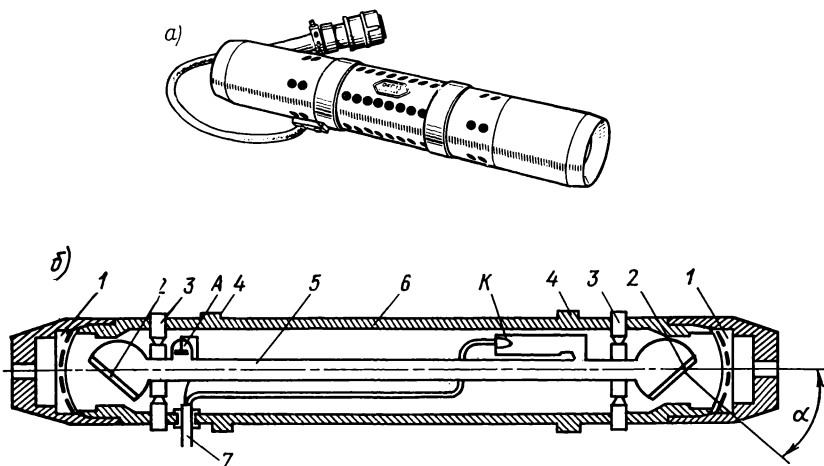


Рис. 1.20. Лазер ОКГ-13 без блока питания (*а*) и его схематический разрез (*б*):

1 — сферические полупрозрачные зеркала; 2 — окна Брюстера; 3 — винты для настройки оптического резонатора; 4 — посадочные кольцевые пояски; 5 — газоразрядная трубка; 6 — инварный корпус; 7 — кабель питания; А — анод; К — катод

статического поля, создаваемого подогреваемым катодом *К* и анодом *А* трубки. На концах трубки имеются сферические уширения с прозрачными окнами 2, установленными под углом Брюстера α , что обуславливает уменьшение потерь на отражение. При этом генерируемый лазером свет становится плоскополяризованным, что весьма ценно при применении лазеров в светодальномерах с модуляторами, основанными на двойном лучепреломлении.

Настройка лазера осуществляется наклоном трубки внутри корпуса *б* с помощью винтов 3. Кольцевые пояски 4 служат опорой при сопряжении лазера с уровнем или креплении лазера в лагерах. Как правило, при заводской настройке лазера стремятся установить параллельными образующую кольцевых поясков 4 с осью генерируемого луча с точностью до нескольких угловых минут.

В табл. 1.1 приведены некоторые параметры гелий-неоновых лазеров, выпускаемых отечественной промышленностью. Срок службы газовых лазеров в значительной степени зависит от устройства катода. К настоящему времени имеются лазеры с «холодным» като-

Таблица I.1

Тип лазера	Модовый состав излучения	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Расходимость, угл. мин	Диаметр пучка, мм	Рабочая тем-пература, °С	Время готов-ности, мин	Средний ре-сурс, ч	Срок нае-мост, мес.	Габариты излучателя, мм	Масса излу-чателя, кг	Цена, руб.
ЛЛ-16	Одномодовый	0,63	1	15	3	-55 ÷ +70	3	500	12	380×88×88	3,3	—
ЛЛ-18	Многомодовый	0,63	—	8	—	-30 ÷ +50	—	500	12	250×100×79	2	—
ЛЛ-28	»	0,63	2	6	—	-50 ÷ +50	—	100	12	300×30×50	1	—
ЛЛ-31	Одномодовый	0,44	20	2	2	-60 ÷ +85	10	500	12	2000×300×290	60	2800
ЛЛ-34	»	0,63	0,5	3	1,2	—	3	1000	12	400×122×88	3,6	—
ЛЛ-36	»	0,63	20	2	3	—	—	—	—	—	—	—
ЛЛ-36	Многомодовый	0,63	40	5	—	-50 ÷ +70	5	750	—	1530×270×290	50	—
ЛЛ-36А	Одномодовый	0,63	40	1,7	3	—	—	—	—	—	—	—
ЛЛ-36А	Многомодовый	0,63	80	5	6	0 ÷ +50	5	500	—	1880×270×290	80	—
ЛЛ-38	Одномодовый	0,63	50	2	3	0 ÷ +40	30	2000	12	2005×290×300	70	2530
ЛЛ-44	»	0,63	3	7	1	—	1	3000	12	∅ 100×570	5	900
ЛЛ-55	Многомодовый	0,63	2	15	1	—	0,25	500	—	—	—	—
ЛЛ-56	Одномодовый	0,63	—	1,7	1	—	—	—	18	—	—	—
ЛЛ-56	Многомодовый	0,63	2	3	2	-30 ÷ +50	5	7500	30	∅ 58×355	1	550
ЛЛ-63	Одномодовый	0,44	3	3	2	—	10	500	12	500×110×30	4	1900
ЛЛ-70	»	0,44	40	1,4	0,8	—	20	750	12	1000×283×230	25	5000
ЛЛ-75-1	Многомодовый	0,63	25	10	4	-10 ÷ +40	5	5000	60	∅ 103×114×1080	10	1065
ЛЛ-77	Одномодовый	0,63	0,25	0,9	0,5	+15 ÷ +25	10	4000	12	313×125×133	3	2300
ЛЛ-78	Многомодовый	0,63	2	5	1	-25 ÷ +40	0,5	5000	24	∅ 33×330×48	0,7	500
ЛЛ-106	Многомодовый	0,48	1000	4	—	+5 ÷ +35	5	30	—	1075×280×290	77	—
ЛЛ-126	Одномодовый	0,63; 1,15; 3,39	10	10	4	-40 ÷ +70	3	2000	12	1155×146×132	14,5	1800
ЛЛ-149	Многомодовый	0,63	2	—	—	+15 ÷ +35	30	500	—	820×292×180	30	—
ЛЛ-159	»	0,63	5	—	—	—	5	300	6	1945×290×270	75	—
ЛЛ-209	»	0,63	2	10	—	—	—	600	6	435×90×195	4,5	—
ОКЛ-11	»	0,63	2	10	—	-20 ÷ +40	—	1000	2	345×500×545	20	—
ОКЛ-12	»	0,63	15	12×45	—	-40 ÷ +50	0,16	500	12	1150×120×120	20	—
ОКЛ-12-1	»	0,63	15	20	—	-40 ÷ +50	0,16	500	12	1150×120×120	20	—
ОКЛ-13	»	0,63	0,5	10	—	-30 ÷ +40	0,16	1000	12	261×46,5×55	1,5	—

дом, срок службы которых возрастает в несколько раз, достигая десятка тысяч часов непрерывной работы.

Рабочая смесь газовых лазеров в основном возбуждается в процессе электрического разряда.

Малогабаритный блок питания представляет собой усилитель мощности с широтно-импульсной модуляцией и автономным задающим генератором. В результате излучение модулируется частотой 17—20 кГц. Наиболее часто в геодезических приборах используют гелий-неоновые лазеры ОКГ-13 и ЛГ-78. Они питаются от малогабаритных блоков массой не более 1 кг, а в качестве источников питания служат аккумуляторы напряжением 12 В.

Лазеры полупроводниковые. Эти лазеры были созданы сравнительно недавно, когда газовые и рубиновые лазеры уже успешно работали, хотя «лазерные свойства» полупроводников известны давно. Такое запоздание связано с технологическими трудностями изготовления нужных полупроводниковых материалов.

Основные достоинства полупроводниковых лазеров — миниатюрность и простота «накачки» (возбуждения), осуществляемая пропусканием электрического тока через полупроводник, а также высокий КПД. Считается, что можно достичь КПД почти 100%. В действующих лазерах в самых благоприятных условиях КПД составляет около 50%. Излучение полупроводниковых лазеров хорошо модулируется на высоких частотах изменением величины тока возбуждения.

Первый полупроводниковый лазер был разработан на основе арсенида галлия (GaAs). Небольшое количество примесей, например цинка, в арсениде галлия приводит к образованию *p*- и *n*-областей. Эти примеси, добавленные в различные части полупроводника, образуют области проводимости, одна из которых является электронной (*n*-областью), а другая — дырочной проводимостью (*p*-областью). Часть кристалла между *p*- и *n*-областями называют *p-n-переходом*. Электрическое поле, приложенное к полупроводнику, вызывает движение электронов и дырок навстречу друг другу, при этом происходит рекомбинация пары электрон—дырка, сопровождающаяся излучением фотона.

Для получения индуцированного излучения необходимо создать на *p-n*-переходе очень большую плотность тока, порядка нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. С повышением плотности тока накачки увеличивается интенсивность выходного сигнала. Для получения генерации необходима обратная связь, т. е. *p-n*-пе-

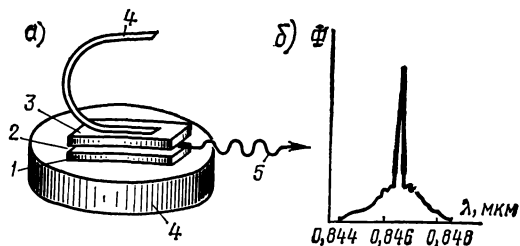


Рис. 1.21. Схема конструкции полупроводникового лазера (а) и спектр излучения (б): 1 — *n*-область; 2 — *p-n*-переход; 3 — *p*-область; 4 — контакты; 5 — излучение

реход нужно поместить в оптический резонатор, роль которого в данном случае выполняют зеркально отполированные грани полупроводникового кристалла. Размеры кристалла не превышают $1 \times 1 \times 1$ мм.

Имеется ряд полупроводниковых материалов, на которых изготавливаются лазеры. Лучшие результаты получены на лазерном *p-n*-переходе в арсениде галлия; на этом переходе можно получить излучение мощностью до 10 Вт при температуре жидкого азота примерно -77°C с рабочего тела очень малых размеров. Толщина *p-n*-перехода около 2 мкм; длина излучающей части не более 1 мм; направленность излучения несколько градусов. При комнатной температуре мощность излучения составляет десятые или сотые доли ватта. На рис. 1.21 схематично показана конструкция полупроводникового лазера на основе арсенида галлия и спектр его излучения (зависимость мощности излучения Φ от длины волны λ).

Полупроводниковые лазеры применяют в светодальномерах с небольшой дальностью действия, в том числе и в светодальномерах, предназначенных для инженерно-геодезических целей.

Глава II

ПРИБОРЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ II.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

Приборы для измерения длин линий, применяемые в настоящее время в инженерной геодезии, можно условно разделить на две большие группы (рис. II.1): механические и физико-оптические.

Механические мерные приборы представляют собой линейные меры различной длины, изготавливаемые чаще всего из металла в виде лент, рулеток, проволок и т. п., служащие для непосредственного измерения длины линии путем последовательного отложения длины мерного прибора в створе измеряемой линии. Результат измерений получают суммированием количества отложенных в принятых единицах измерений.

Измерения производят либо по поверхности земли, либо подвешивая мерный прибор на небольшой высоте (1—1,5 м) на специальных штативах. В обоих случаях вместо прямой — кратчайшего расстояния между конечными точками линии — измеряют некоторую ломаную линию. Поэтому для получения горизонтального проложения измеряют углы наклона линии или отдельных ее частей.

Ленты землемерные (ГОСТ 10815—64). Отечественная промышленность выпускает землемерные ленты двух типов: ЛЗ — лента землемерная и ЛЗШ — лента землемерная штриховая. Их номинальная длина может быть 20, 24 и 50 м.

Рулетки измерительные металлические (ГОСТ 7502—69). Для измерений в строительстве наиболее удобны стальные рулетки типов: РС — рулетка самосвертывающаяся, РЖ — рулетка желобчатая, РЗ — рулетка в закрытом корпусе, РК — рулетка на крестовине, РВ — рулетка на вилке и РЛ — рулетка с грузом.

В зависимости от положения начала шкалы на измерительной ленте рулетки ГОСТ предусматривает выпуск рулеток в двух исполнениях: А — начало шкалы сдвинуто от торца измерительной ленты; Б — начало шкалы совпадает с торцом измерительной ленты.

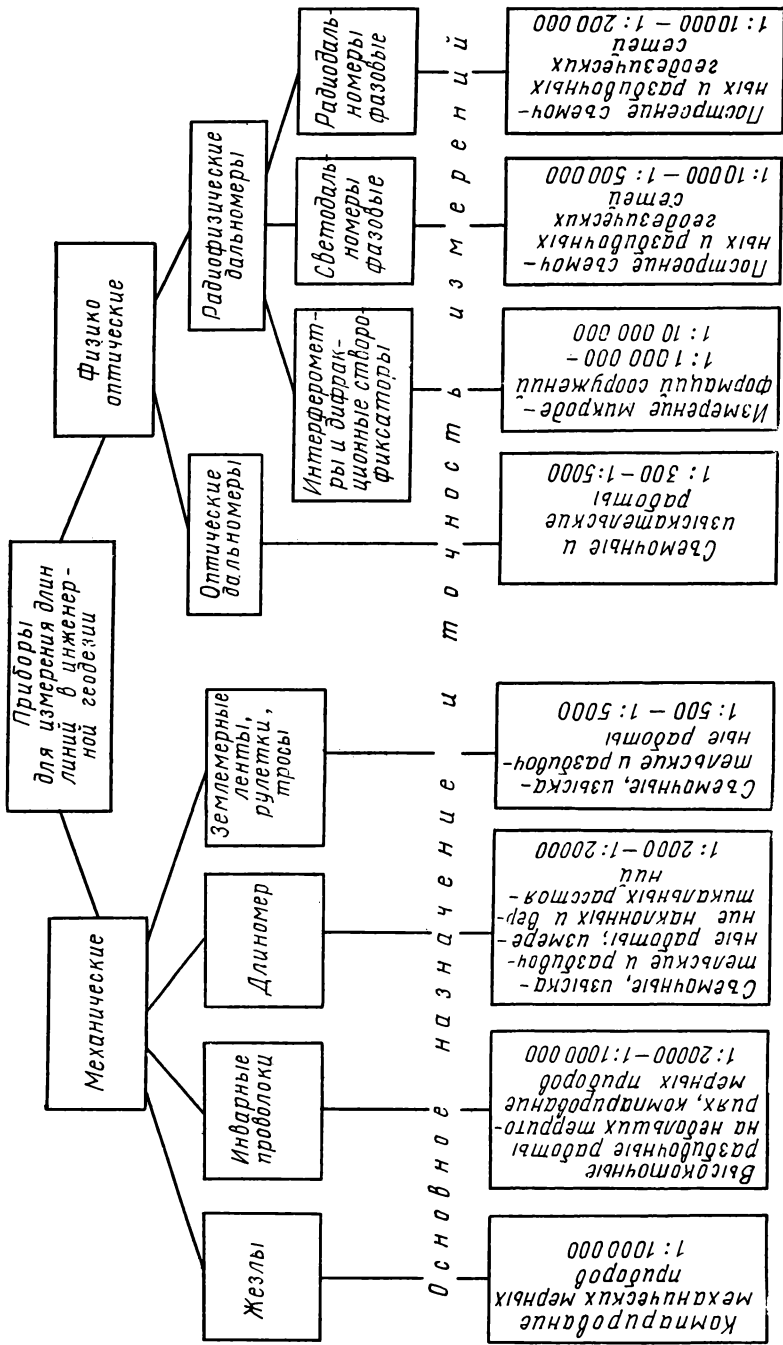


Рис. II.1. Классификация приборов для линейных измерений

По точности нанесения шкал рулетки могут изготавливаться трех классов: 1-го и 2-го классов — в исполнении А; 3-го класса типов РС, РЗ, РК и РВ — в исполнениях А и Б, типа РЖ — в исполнении Б. Начало шкалы рулеток типа РЛ должно совпадать с нижним концом груза.

Основные технические характеристики рулеток приведены в табл. II.1.

Таблица II.1

Технические характеристики	Тип рулетки					
	РС	РЖ	РЗ	РК	РВ	РЛ
Длина шкалы, м	1; 2	1; 2	2; 5; 10; 20; 30; 50	50; 75; 100	20; 30; 50	10; 20; 30; 50
Цена деления шкалы, мм						
на первом дециметре	1	1	1	1	1	1
на остальной части шкалы	1	1	1 или 10	1 или 10	1 или 10	1
Класс точности	3	3	1; 2; 3	1; 2; 3	1; 2; 3	3
Положение начала шкалы	А и Б	Б	А и Б	А и Б	А и Б	А

При выпуске с завода допустимые отклонения действительной длины шкал рулеток от номинального значения не должны превышать указанных в табл. II.2.

Таблица II.2

Интервалы шкалы	Допускаемое отклонение действительной длины (\pm), мм, для классов		
	1	2	3
Общая длина шкалы, м			
1	—	—	0,4
2	—	0,4	0,8
5	—	1,0	2,0
10	0,5	1,0	2,5
20	1,0	2,0	4,0
30	—	3,0	5,0
50	2,0	5,0	7,0
75	—	7,5	10,0
100	—	10,0	14,0
Отдельные дециметровые и метровые интервалы	0,2	0,3	0,4
Отдельное сантиметровое деление	0,1	0,2	0,3
Отдельное миллиметровое деление	0,05	0,1	0,2

Рулетки в зависимости от класса точности и материала изготовления обеспечивают производство линейных измерений с отно-

сительными ошибками от 1:2000 до 1:20000. При измерениях повышенной точности необходимы тщательное компарирование рулетки, измерение и учет температуры, а также постоянство натяжения. Уравнение длины рулетки составляется в том же виде, что и для землемерных лент.

Рулетки с учетом их технических характеристик (см. табл. II.1) можно рекомендовать для различных геодезических работ в строительстве: измерение линий, разбивочные работы, поэтажное пространство отметок, исполнительные съемки, различные обмеры габаритов конструкций и др.

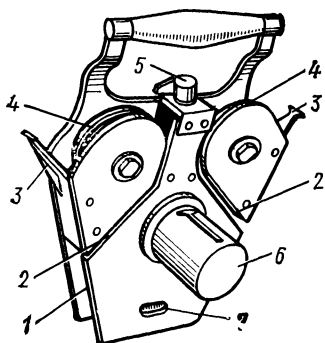


Рис. II.2. Длинномер АД 1М:

1 — мерный диск; 2 — щели; 3 — фиксаторы; 4 — направляющие ролики; 5 — тормозное устройство; 6 — счетный механизм; 7 — круговая шкала

Достоинства рулеток и землемерных лент — простота устройства и эксплуатации при сравнительно высокой точности измерений, особенно коротких линий. Недостатки — большая трудоемкость при измерении длинных линий, необходимость расчистки наземной трассы, вешения, измерения углов наклона отдельных участков линий и т. д.

Д л и н о м е р ы. Для измерения длинных линий в последние годы успешно внедряются в производство длинномеры.

Длинномер АД 1М (рис. II.2) представляет собой мерный эталонированный диск 1 со счетным механизмом 6, заключенный в дюралюминиевый корпус с двумя направляющими роликами 4, тормозным устройством 5 и рукояткой. Сущность измерения расстояния

длиномером состоит в определении длины предварительно натянутой между концами линии стальной проволоки путем прокатки по ней мерного диска длинномера. Длину проволоки определяют по количеству оборотов мерного диска, положение же самой проволоки относительно начальной и конечной точек линии фиксируют с помощью шкал, закрепленных на проволоке.

Мерный диск длинномера АД 1М изготовлен из стали и закален, проектная длина окружности его канавки равна 300 мм. Счетный механизм представляет собой типовой ступенчатый счетчик, связанный с мерным диском зубчатой передачей. Емкость счетчика 1000 м. Миллиметры и сантиметры отсчитывают по круговой шкале 7, жестко скрепленной с диском, а дециметры, метры, десятки и сотни метров — по счетчику. Контактное взаимодействие длинномера с точками обеспечивается двумя фиксаторами 3.

В ходе испытаний длинномера было установлено, что для измерений целесообразно использовать стальную проволоку диаметром 0,8 мм и создавать ей натяжение с силой 150 Н. Длина проволоки может быть неограниченной, но практически из-за большой стрелки провеса проволоку длиннее 500 м применять нецелесообразно.

В комплект АД 1М*, кроме самого длиномера 6 (рис. II.3) и бобины 8 с проволокой входят гиря 1 массой 15 кг, динамометр, две раздвижных стойки 2 и 9 для натяжения проволоки 7 по измеряемой линии, а также закрепляемые на проволоке две шкалы 5 длиной 20 см, оцифрованные через 10 мм.

Стойка 9 имеет устройство для закрепления бобины с проволокой и снабжена подвижным стремением 10 для ноги исполнителя. Стойка 2 в своей верхней части имеет блок 3, через который перекидывают проволоку при натяжении ее грузом.

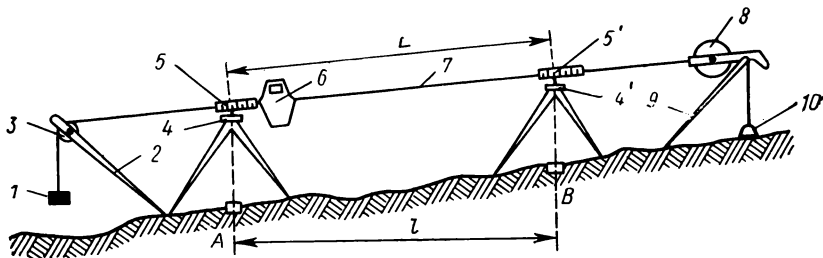


Рис. II.3. Измерение линии длиномером АД1М

Измеряют линию длиномером АД 1М в следующем порядке: центрируют на концах линии лот-аппараты** 4 и 4' и вдоль нее натягивают проволоку 7, закрепляя бобину 8 у переднего лот-аппарата 4';

вводят у заднего лот-аппарата 4, поддерживая груз, проволоку через щели 2 (см. рис. II.2) длиномера в направляющие ролики и канавку мерного диска, после чего дают проволоке полное натяжение;

закрепляют на проволоке около лот-аппаратов две шкалы 5 и 5', расположив их нулевыми штрихами друг к другу;

перемещают длиномер 6 к начальной точке А до контакта его фиксатора с нулем задней шкалы 5 и, остановив мерный диск тормозным устройством 5 (см. рис. II.2), берут начальный отсчет N_A по длиномеру;

освобождают мерный диск и, держа длиномер за ручку, прокатывают его по проволоке до совмещения фиксатора длиномера с нулевым штрихом шкалы 5' над точкой В; берут второй отсчет N_B по длиномеру;

* Комплект длиномера АД 1М — модернизация выпускавшегося ранее длиномера АД 1.

** Лот-аппарат — оптический центрир; при измерениях линий подвесными мерными приборами лот-аппараты используют для переноса конечных точек измеряемой линии с земли на головки штативов. Современные лот-аппараты имеют целик, который после центрирования прибора и приведения в отвесное положение оказывается на отвесной линии, проходящей через центр знака, над которым установлен лот-аппарат.

освобождают мерный диск и, не снимая длиномер с проволоки, берут одновременно отсчеты-домеры n_A и n_B по шкалам, фиксируя таким образом положение нулей шкал относительно центров пунктов.

Перечисленные операции составляют первый полуприем.

Смещают шкалы и аналогично измеряют длину линии в обратном направлении, заканчивая этим приемом.

В зависимости от требуемой точности измерений выполняют различное количество таких приемов, состоящих каждый из двух полуприемов. Окончательное значение длины измеренной наклонной линии с учетом всех выполненных полуприемов вычисляют по формуле

$$L = \frac{1}{m} \sum_1^m (N_B - N_A + n_A + n_B) + c + \Delta_R + \Delta_t + \Delta_F, \quad (\text{II.1})$$

где m — количество выполненных полуприемов (прокаток мерного диска); c — расстояние между фиксаторами прибора (постоянное слагаемое); Δ_R , Δ_t , Δ_F — поправки соответственно за компарирование мерного диска, его температуру и за провес проволоки.

Поправка Δ_R за компарирование мерного диска обусловлена отклонением радиуса мерного диска от его проектного значения и определяется компарированием — измерением проволоки известной длины. В полевых условиях компарирование выполняют на базе длиной 100—150 м, измеренном с относительной ошибкой в три-четыре раза меньше, чем допускаемая нормативной точностью измерений длиномером. Поправку за компарирование обычно получают в виде

$$\Delta_R = L_N(K - 1), \quad (\text{II.2})$$

где $L_N = N_B - N_A$; $K = b/L_N$; b — длина базы.

Поправка Δ_t за температуру мерного диска обусловлена изменением радиуса мерного диска из-за отличия температуры во время измерений от ее значения при компарировании:

$$\Delta_t = \alpha L_N(t - t_0), \quad (\text{II.3})$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения металла, из которого сделан мерный диск; t и t_0 — температура диска соответственно при измерении линии и при компарировании, град.

Поправка Δ_F за провес проволоки обусловлена тем, что при работе с длиномером непосредственно измеряется не отрезок прямой между целиками лот-аппаратов, а длина проволоки. Проволока же, подвешенная в двух точках, как гибкая нерастяжимая однородная нить, под действием собственного веса провисает по кривой, называемой *цепной линией*, вследствие чего в значение длины линии, измеренное длиномером, входит положительная ошибка; поэтому поправку Δ_F всегда вводят со знаком «—».

В реальных полевых условиях измеряемая линия обычно имеет какой-то угол наклона ν ; точки подвеса проволоки лежат на разных высотах. Это вызывает асимметрию цепной линии вдоль хорды; при этом длина дуги цепной линии уменьшается, а следовательно, должна быть уменьшена и абсолютная величина поправки за провес проволоки. С учетом асимметрии цепной линии поправка за провес проволоки

$$\Delta_F = \Delta_f \cos^2 \nu, \quad (\text{II.4})$$

где Δ_f — поправка за провес проволоки длиной L_N , натянутой между точками, лежащими на одной и той же высоте.

Величину Δ_f находят по специальным таблицам* или вычисляют по одной из следующих формул:

$$\Delta_f = -L_N^3 q^2 / (24P^2); \quad (\text{II.5a})$$

$$\Delta_f = -8f^2 / (3L_N), \quad (\text{II.5б})$$

где q — вес одного погонного метра проволоки, Н/м; P — сила натяжения проволоки (вес груза, с помощью которого осуществляется натяжение проволоки), Н; f — стрела провеса проволоки, натянутой между точками, лежащими на одной и той же высоте, м; находится по таблицам или вычисляется по формуле $f = L_N^2 q / (8P)$.

Если раньше уже была найдена поправка Δ_{f_0} за провес проволоки какой-то длиной L_0 , натянутой между точками, лежащими на одной и той же высоте, то Δ_f вычисляется проще:

$$\Delta_f = \Delta_{f_0} (L_N / L_0)^3. \quad (\text{II.5в})$$

Переход от значения длины наклонной линии L , вычисленного по формуле (II.1), к горизонтальному проложению l осуществляют через угол ее наклона ν :

$$l = L - 2L \sin^2(\nu/2) \quad (\text{II.6})$$

или через превышение h между конечными точками линии:

$$l = L - h^2 / (2L) - h^4 / (8L^3) - h^6 / (16L^5). \quad (\text{II.7})$$

Длинномером целесообразно измерять длины линий от 50 до 500 м. Он очень удобен для измерений через овраги, котлованы, канавы, ручьи и другие подобные препятствия; в этом случае прокатку мерного диска по проволоке осуществляют с помощью шнура, прикрепляемого к прибору. Незначительные препятствия обходят с длинномером, оттягивая проволоку в сторону; это вызывает лишь перемещение груза по высоте. Если примыкание к конечной точке измеряемой линии производится при натяжении проволоки в исходном положении, то такие отклонения от створа не вносят ошибок в измерения.

* Производственное наставление по применению длинмера АД 1. — Л., 1966.

Если по условиям местности свободный провес проволоки непосредственно не обеспечивается, т. е. проволока касается земли (на ровных участках это может иметь место при длине линии свыше 250 м), то в створе линии устанавливают штатив для поддержания проволоки. Методика измерений при этом остается прежней, но обязательно вводят поправки Δ_F за провес проволоки для каждой секции отдельно. Для определения длин секций у промежуточного штатива берут отсчет по длиномеру.

Точность измерений линий длиномером характеризуется относительными средними квадратическими ошибками: при натяжении проволоки гирей на весу 1 : 20 000; при натяжении динамометром 1 : 10 000.

В первом случае бригада состоит из пяти-шести человек, во втором — из трех человек. Масса комплекта АД 1М при использовании гири для натяжения проволоки составляет 23 кг, при использовании динамометра — 10 кг. Производственные испытания позволили рекомендовать длиномер для измерения длин сторон в полигонометрии I и II разрядов, а также в специальных разбивочных сетях на строительной площадке.

В Узбекском государственном институте инженерно-технических изысканий длиномер был применен для измерений длин линий полигонометрии II разряда, представлявшей собой свободную сеть из четырех замкнутых полигонов периметром 2,0—4,1 км; общая протяженность линий 10,4 км. В полигонах были получены относительные невязки от 1 : 33 000 до 1 : 65 000.

В 1968—1969 гг. длиномер был применен для создания планового съемочного обоснования и плановой привязки аэроснимков при крупномасштабной топографической съемке для мелиорации земель. Плановое съемочное обоснование развивалось проложением вытянутых теодолитных ходов, в которых измерили 710 линий длиной от 53 до 750 м; при средней длине хода 3,3 км относительная линейная невязка в ходах составила в среднем 1 : 5800. Такая же точность (в среднем) была получена и при плановой привязке аэроснимков в условиях труднопроходимого болота, где измерять линии землемерной лентой было бы просто невозможно; при средней длине теодолитного хода 6,0 км 50% ходов имели относительные невязки менее 1 : 5000.

Значительные исследования длиномера АД 1М выполнены в 1968—1972 гг. кафедрой геодезии Московского института инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ)*. Длинномер был успешно применен в производственных условиях для построения опорных геодезических сетей при сооружении тоннелей и мостов, измерения сторон строительной сетки, разбивки центров и осей мостовых опор. Кроме того длиномер применялся в геодезических сетях для съемки железнодорожных станций и узлов, а также при

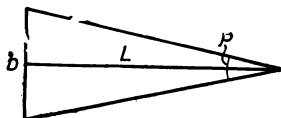
* Хренов Л. С., Романов Н. Г., Визиров Ю. В. Результаты опытно-производственного применения длиномера АД 1М. Тр. МИИТ, вып. 483, 1975.

беспикетном трассировании железнодорожной линии на стадии предварительных изысканий и при разбивке предпостроечного пикетажа.

§ II.2. ОПТИЧЕСКИЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

В ряде случаев при выполнении работ в труднодоступных районах, в таежной заболоченной местности, в горах, в городских условиях единственно возможным средством для измерения расстояний являются дальномеры.

Рис. II.4. Определение расстояния из параллактического треугольника:
 b — базис; β — параллактический угол; L — измеряемое расстояние



Дальномеры подразделяют на электронные и геометрические. Геометрический (оптический) дальномер представляет собой оптико-механическое устройство, принцип действия которого основан на решении параллактического треугольника, образуемого базой b и параллактическим углом β (рис. II.4). Из параллактического треугольника определяют измеряемое расстояние

$$L = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} + c, \quad (\text{II.8})$$

где c — расстояние от вершины угла до вертикальной оси вращения прибора (постоянная дальномера).

Одну из величин (b или β) принимают постоянной, другую измеряют. В зависимости от этого различают оптические дальномеры с переменной (измеряемой) базой b и постоянным углом β или с постоянной базой b и переменным (измеряемым) углом β .

Конструктивно оптические дальномеры могут быть выполнены в виде насадки на зрительную трубу, самостоятельного прибора, встроенного узла или в виде одного из элементов зрительной трубы.

Дальномер нитяной. Это наиболее простой дальномер с постоянным параллактическим углом. Нитяной дальномер имеется в зрительных трубах геодезических приборов. Он содержит стеклянную пластинку с нанесенными на ней тремя горизонтальными нитями, расположенными на равном расстоянии друг от друга. Пластинка помещается в окулярной части зрительной трубы геодезического инструмента.

При измерениях отсчет берут по вертикальной рейке по крайним нитям сетки, а затем вычисляют расстояние

$$D = Kl + c, \quad (\text{II.9})$$

где $K = 100$ — коэффициент дальномера; l — разность отсчета по рейке; c — постоянная дальномера.

Точность определения расстояния нитяным дальномером характеризуется относительной ошибкой 1 : 300 и в основном зависит от ошибки отсчета по рейке.

Согласно ГОСТ 11356—65 выпускают дальномерные насадки типов ДН-04, ДНР-06, ДН-08, ДН-10 [22]. В основу шифров положена точность измерения расстояния в 100 м.

Дальномерная насадка ДН-04 предназначена для измерения расстояний до 125 м по горизонтальной рейке со средней квадратической ошибкой не более 4 см на 100 м; ДНР-06 — для измерения расстояний до 200 м со средней квадратической ошибкой не более 6 см на 100 м (буква «Р» обозначает, что дальномерная насадка редуционная, т. е. позволяет измерять горизонтальные проложения); ДН-08 — для измерения расстояний до 700 м со средней квадратической ошибкой не более 8 см на 100 м и ДН-10 — для измерения расстояний до 200 м со средней квадратической ошибкой 10 см на 100 м. В настоящее время насадку ДН-04 не изготавливают из-за отсутствия на нее спроса. В виде самостоятельных приборов выполнены оптические дальномеры ОТД и ДВ-20. В связи с появлением тахеометра ТВ серийное производство внутрибазного дальномера ДВ-20 прекращено.

Дальномерная редуционная насадка ДНР-06. К оптическим дальномерам с постоянным параллактическим углом относится дальномер ДНР-06 (рис. II.5), выполненный в виде насадки, закрепляемой на трубе геодезического прибора (тахеометра, теодолита, кипрегеля) с посадочным диаметром объектива 46 мм. В качестве измерительной базы используют вертикальную дальномерную рейку, представляющую собой брус, с обеих сторон которого натянуты инварные полосы. На рейке имеются нониусы, а также шкала с делениями (на двух сторонах), нанесенными через 2 см. Нулевым штрихом является верхний штрих нониуса (отмечен треугольником). Длина нониуса $l_{\text{нон}}$ и шкала рейки связаны зависимостью вида:

$$l_{\text{нон}} = a(n + 1)/V, \quad (\text{II.10})$$

где V — угловое увеличение зрительной трубы; a — длина одного деления шкалы рейки; $n = 10$ — число делений нониуса.

Шкала и нониус окрашены в черный и белый цвета, а обкладка на контрольной стороне рейки — в желтый цвет. Для исключения ошибок отсчитывания на контрольной стороне рейки нониус преднамеренно сдвинут на величину, соответствующую 11,111 м расстояния. На рейке имеется десятиминутный круглый уровень, а в верхней части — петля для подвешивания ее на крюке. Если необходимо поднять рейку над поверхностью земли, на ее наконечник надевают подставку длиной около 0,5 м, входящую в комплект прибора.

Оптический компенсатор дальномера ДНР-06 содержит дальномерный клин, задающий параллактический угол $\beta = 34'22,6''$ при $\alpha = 0^\circ$; подвесной клин, редуцирующий наклонные расстояния в пределах $\pm 12^\circ$, и телескопическую линзу, выполняющую роль

микрометра (рис. II.6). Дальномерный клин закрывает часть входного отверстия объектива трубы и поэтому луч AA' , проходящий через незакрытую часть объектива, составит параллактический угол β с лучом OA'' , проходящим через клин (рис. II.7). При

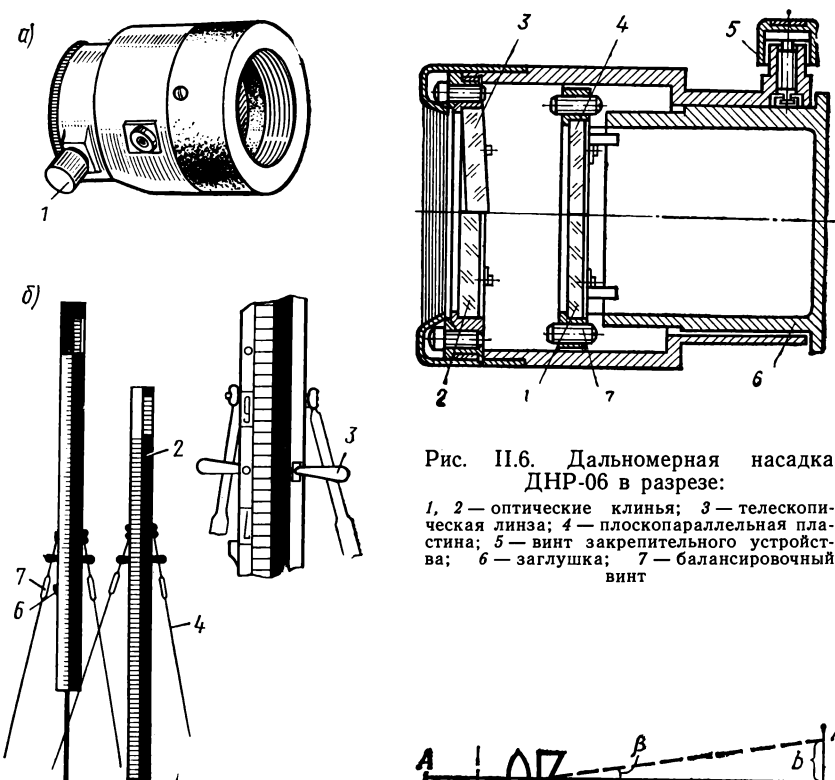


Рис. II.5. Дальномерная насадка ДНР-06 (а) и рейка к ней (б):
 1 — закрепительное устройство насадки; 2 — рейка; 3 — ручка; 4 — подставка; 5 — пятка; 6 — круглый уровень; 7 — рукоятка

Рис. II.6. Дальномерная насадка ДНР-06 в разрезе:
 1, 2 — оптические клинья; 3 — телескопическая линза; 4 — плоскопараллельная пластина; 5 — винт закрепительного устройства; 6 — заглушка; 7 — балансирующий винт

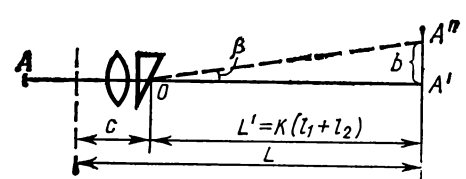


Рис. II.7. Определение расстояния с помощью клина

рассматривании рейки в трубу видны два изображения, сдвинутые относительно друг друга на величину b , равную отсчету по рейке. Подвесной (редуцирующий) клин служит для автоматического введения в отсчет поправки на наклон измеряемой линии. Клин покачивается вокруг горизонтальной оси, расположенной выше его центра тяжести. При изменении угла наклона визирного луча редуцирующий клин отклоняется и тем самым изменяется величина параллактического угла β .

При работе с дальномерной насадкой теодолит устанавливают на станции и приводят в рабочее положение, а рейку устанавливают по уровню над точкой, до которой требуется определить расстояние. Зрительную трубу наводят на рейку, чтобы центральная горизонтальная нить сетки нитей расположилась вблизи нулевого штриха нониуса, отмеченного треугольником, а какой-нибудь штрих нониуса совместился со штрихом шкалы рейки (рис. II.8).

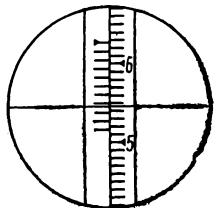


Рис. II.8. Отсчет по рейке дальномерной насадки ДНР-06

После этого берут отсчет, который включает в себя: а) целое число делений шкалы, равное номеру ее штриха, расположенных до нулевого штриха верньера (62); б) число десятых долей деления (7), равное номеру совмещенного штриха нониуса, считая от нулевого; в) число сотых долей деления (7), равное числу делений нониуса от его нулевого штриха до горизонтальной нити сетки; г) число тысячных долей деления (4), равное доле интервала нониуса, отсеченной горизонтальной нитью сетки (оценивается на глаз). На рис. II.8 отсчет по рейке равен 62,774.

Измеренное расстояние выражается суммой двух отсчетов, составляющих один прием.

Формула для определения расстояния имеет вид

$$L = K(l_1 + l_2) + c, \quad (\text{II.11})$$

где l_1 и l_2 — первый и второй отсчеты по рейке (по двухсантиметровой шкале);

Для контроля измерений сдвигают верньер и берут отсчеты по другой стороне рейки. К полученному расстоянию прибавляют величину 11,111 м.

Оптический дальномер ДНР-06 позволяет измерять расстояние от 20 до 200 м с относительной ошибкой 1 : 1600.

При больших углах наклона (свыше 13°) на результаты измерений начинает влиять редуционная ошибка, поэтому необходимо ввести поправку ΔL_α , которая берется по номограмме со знаком «+» независимо от знака угла наклона.

Дальномер с переменным параллактическим углом. К оптическим дальномерам с переменным параллактическим углом относится дальномер ОТД (рис. II.9), представляющий собой прибор, устанавливаемый на подставке. Он состоит из зрительной трубы, снабженной оптическим визиром, комбинационным компенсатором и отсчетным микроскопом, вертикального круга для измерения углов наклона линии визирования и алидадной части с осью вращения и винтами управления.

В комплект дальмера входит дальномерная рейка длиной 2 м, имеющая пять баз (интервалов), два круглых уровня, оптический визир и термометр. Во время работы рейка может быть установлена как горизонтально, так и вертикально на подставке,

имеющей встроенный оптический отвес. Более точные результаты получают по рейке, установленной горизонтально, так как меньше сказывается влияние дифференциальной рефракции.

Величину измеряемого расстояния L определяют с помощью ОТД из решения параллактического треугольника (рис. II.10):

$$L = NK/\beta + c + \delta L_\alpha + \delta L_t, \quad (\text{II. 12})$$

где N — количество интервалов рейки, использованных при измерении параллактического угла β ; δL_α и δL_t — поправки за наклон

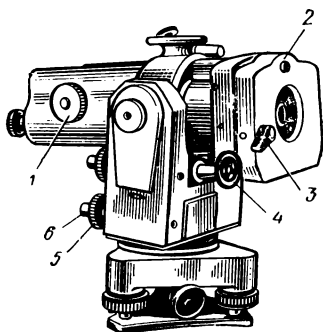


Рис. II.9. Дальномер ОТД:

1 — кремальера; 2 и 4 — винты наводящего устройства установочной и измерительной частей компенсатора; 3 — рычаг перекидного клина; 5 — винт наводящего устройства азимутального поворота; 6 — винт закрепительного устройства

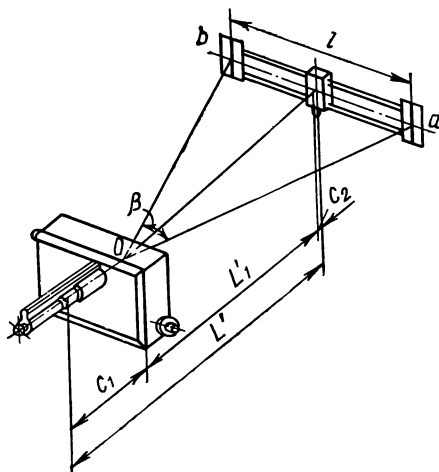


Рис. II.10. Схема измерения расстояний дальномером ОТД

линии визирования и температуру.

Поправка за наклон линии визирования при работе по горизонтальной рейке

$$\delta L_\alpha = 2L \sin^2(\alpha/2); \quad (\text{II. 13})$$

по вертикальной рейке

$$\delta L_\alpha = L \sin^2 \alpha. \quad (\text{II. 14})$$

Параллактический угол β измеряется с помощью комбинированного компенсатора, состоящего из клинового компенсатора, отклоняющего луч на постоянный угол β_k , и линзового компенсатора, позволяющего измерять переменную часть параллактического угла β_n . В общем случае измеряемый угол связан с β_k и β_n зависимостью

$$\beta = \beta_k + \beta_n. \quad (\text{II. 15})$$

Постоянный угол β_k и коэффициент дальномера K определяют по результатам измерений на базе, длины линий которого известны с точностью не ниже 1 : 20 000. Величину угла β_k определяют при измерении расстояния по двум сторонам рейки. Так как расстояние между марками на другой стороне рейки отличается на 1%, для вычисления среднего угла β пользуются формулой

$$\beta = (\beta_1 + 1,01\beta_2)/2. \quad (II.16)$$

С помощью ОТД можно измерять расстояния от 35 до 400 м с относительной ошибкой 1 : 5000, расстояния до 700 м — с относительной ошибкой 1 : 1500—1 : 2000. Если измерения выполняют по вертикально установленной рейке, то расстояния до 400 м можно измерять с относительной ошибкой 1 : 3000—1 : 2000.

Технические характеристики отдельных типов оптических дальномеров, применяемых при выполнении инженерно-геодезических работ, приведены в табл. II.3.

Таблица II.3

Технические характеристики	Типы оптических дальномеров			
	ДНР-06	ОТД	ДН-08	ДН-10
Увеличение Г, крат	—	31	—	—
Световой диаметр $D_{вх}$, мм	38	46	34	28
Посадочный диаметр оправы насадки, мм	46	—	46	38
Измеряемое расстояние, м:				
минимальное $D_{мин}$	20	35	50	20
максимальное $D_{макс}$	200	700	700	250
Диапазон работы по углу наклона, град	20	22	30	30
Постоянная дальномера c , м	0	0,12	0,10	0
Коэффициент дальномера K	100	—	—	200
Масса, кг:				
дальномера	0,17	4	0,5	0,09
противовеса	0,2	—	—	0,14
рейки	5,0	3,5	1,8	2,6
рейки в футляре	—	10,5	11,4	—
Длина рейки, м	2,4	2,02	1,2	1,7

Тахеометр ТВ авторедукционный внутрибазный (рис. II.11). Это один из наиболее производительных приборов, предназначенных для измерения горизонтальных проложений, углов, превышений. Его применяют при съемке труднодоступных объектов, съемках открытых горных выработок, городских съемках, при строительстве зданий и сооружений, при переносе проектов сооружения в натуру, съемке сильно пересеченной местности и др. Ниже приведены технические данные тахеометра ТВ:

Увеличение зрительной трубы, крат	15,7
Диапазон измеряемых расстояний, м:	
до недоступных точек	2—60 м
с применением рейки	до 180 м
Средняя квадратическая ошибка измерения:	
расстояния в 60 м, см	6
углов горизонтальных, с	30
» вертикальных, мин	1
Цена деления уровня при алидаде горизонтального	
круга, с	30
Длина, см:	
базы при инструменте	30,5
дополнительной горизонтальной рейки	60
Масса, кг:	
тахеометра	7,5
горизонтальной рейки со штативом	1,5

Пучок лучей от наблюдаемого предмета проходит в зрительную трубу двумя путями (рис. II.12). Один пучок лучей от объекта направляется от неподвижной пентапризмы 1 через юстировочный клин 2 на прямоугольную призму 5 с крышей и далее в зрительную трубу, состоящую из объектива 6, фокусирующей линзы 7, разделительного устройства 8 и окуляра 9. Другой пучок лучей проходит подвижную пентапризму 1, кольцеобразные ахроматические клинья 3 и 4, призму с крышей 5 и попадает в зрительную трубу.

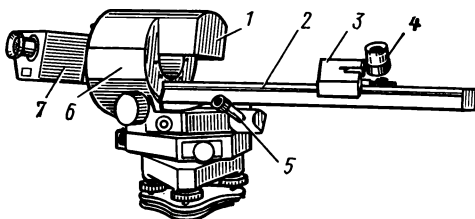


Рис. II.11. Тахеометр внутрибазный ТВ:
1 и 3 — корпуса неподвижной и подвижной пентапризм; 2 — базовая линейка; 4 — лупа; 5 — микроскоп; 6 — колонка; 7 — зрительная труба

При измерении расстояний подвижную пентапризму 3 (см. рис. II.11) перемещают вдоль базовой линейки до совмещения двух наблюдаемых полуизображений предмета и с помощью лупы 4 берут отсчет, соответствующий измеренному горизонтальному проложению в метрах, так как деления на шкале базовой линейки нанесены через 0,5 см, а номинальное значение коэффициента $K=200$. Наклонное расстояние преобразуется в горизонтальное проложение с помощью двух кольцевых оптических клиньев. Один из клиньев является одновременно вертикальным кругом, а изображение его штрихов передается в поле зрения окуляра зрительной трубы.

Перед отсчетом расстояния по шкале базовой линейки тахеометра необходимо следить, трансформировано ли изображение наблюдаемого предмета по высоте. Если изображение растянуто или сжато, то разъюстировка устраняется вращением рычажка, расположенного на неподвижной пентапризме.

Горизонтальное проложение вычисляют по формуле

$$L = Kl + c + \Delta L_c + \Delta L_l, \quad (\text{II.17})$$

где ΔL_c — поправка за теоретическую ошибку, снимаемая со шкалы на кожухе прибора; ΔL_t — поправка за температуру, вводимая в том случае, когда температура при измерении отличается от температуры при определении значения K больше, чем на 20°C .

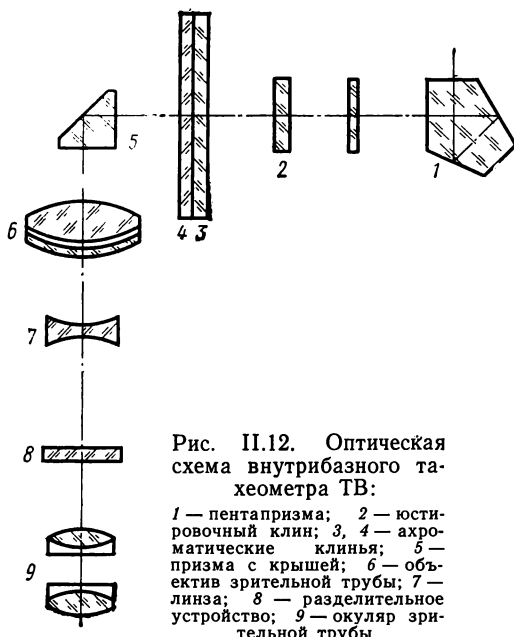


Рис. П.12. Оптическая схема внутрибазного тахеометра ТВ:

1 — пентапризма; 2 — юстировочный клин; 3, 4 — ахроматические клинья; 5 — призма с крышей; 6 — объектив зрительной трубы; 7 — линза; 8 — разделительное устройство; 9 — окуляр зрительной трубы

§ П.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

Электромагнитные дальномеры — это устройства для измерения расстояний по времени распространения электромагнитных колебаний между конечными точками линии. При этом скорость электромагнитных колебаний в момент измерений предполагается постоянной и известной. В зависимости от вида используемых электромагнитных колебаний электромагнитные дальномеры делят на светодальномеры и радиодальномеры. Свето- и радиодальномеры в зависимости от характера излучения разделяют на импульсные и фазовые.

Все электромагнитные дальномеры состоят из двух основных узлов — приемопередатчика, устанавливаемого на начальной точке, и отражателя, устанавливаемого на конечной точке линии. Назначение приемопередатчика — посылка электромагнитной энергии в направлении отражателя, прием отраженных электромагнитных волн и измерение времени распространения электромагнитных колебаний на двойном измеряемом расстоянии. Отражатель выполняет функцию отражения посланных на него электро-

магнитных волн в обратном направлении. В этом случае искомое расстояние может быть вычислено по формуле

$$L = v\tau/2, \quad (\text{II.18})$$

где v — скорость электромагнитных волн во время измерений; τ — время, потребное электромагнитным волнам на прохождение расстояния $2L$.

Точность измерения расстояний зависит главным образом от точности измерения времени распространения волн и определения их скорости на момент измерений. При ошибке измерения времени порядка $1 \cdot 10^{-10}$ с в длине линии возникает ошибка около 1—2 см, что в относительном значении составляет, например, 1 : 5000—1 : 10 000 при $L = 100$ м; 1 : 50 000—1 : 100 000 при $L = 1000$ м и т. д. Такие геодезические измерения по современным взглядам относятся к разряду точных.

Измерить время с указанной точностью можно косвенно-фазовым способом. Непосредственное измерение времени импульсным способом дает пока точность на один-два порядка грубее.

Для определения величины v в формуле (II.18) пользуются соотношением

$$v = c/n, \quad (\text{II.19})$$

где $c = 299\,792\,458$ м/с — скорость электромагнитных волн (скорость света) в вакууме; $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ — показатель преломления воздуха (μ — магнитная проницаемость, ϵ — диэлектрическая постоянная).

Для вакуума $n = 1$, так как $\mu = \epsilon = 1$. В воздухе же значения μ и ϵ (главным образом ϵ) зависят от его плотности и частоты используемых при измерениях электромагнитных колебаний. В наземных условиях при изменении температуры воздуха от -40 до $+40^\circ$, давления от 800 до 500 мм рт. ст. и влажности от 1 до 30 мм рт. ст. скорость электромагнитных волн изменяется на несколько сотен километров в секунду, достигая в наиболее неблагоприятном случае относительного значения 1 : 5000. Поскольку значение v входит в качестве постоянной в формулу (II.18), то при неучете состояния внешней среды такая же ошибка возникнет и в измеряемом расстоянии.

Для исключения ошибок, связанных с условиями распространения электромагнитных волн, при измерении расстояния с помощью метеорологических приборов определяют плотность воздуха, как функцию его температуры, давления и влажности. При надлежащем учете метеорологических факторов остаточная погрешность в расстоянии может быть сведена к величинам меньшим 1 : 500 000.

Следует отметить, что при измерении небольших расстояний (до 1—2 км), что имеет место в инженерной геодезии, точность измерений зависит, главным образом, от ошибок определения времени распространения колебаний. При измерениях расстояний в десятки километров точность измерений зависит в основном от

ошибок определения скорости распространения электромагнитных колебаний в воздухе.

Импульсный способ. Принципиальная структурная схема импульсного дальномера изображена на рис. II.13. Приемопередатчик устанавливают на начальной, а отражатель на конечной точках линии и взаимно ориентируют.

Импульсные дальномеры обладают невысокой точностью, с точки зрения инженерной геодезии, но имеют большую оперативность, что делает их очень удобными при измерениях расстояний до движущихся объектов. Обычно импульсные дальномеры ис-

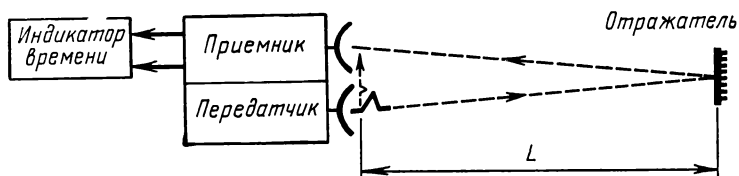


Рис. II.13. Структурная схема импульсного дальномера

пользуют как локаторы, т. е. определяют не только расстояние, но и направление на объект. В зависимости от вида колебаний импульсные дальномеры называют радиолокаторами или оптическими локаторами.

Приемопередатчик представляет собой источник электромагнитных колебаний (генератор) с устройством для формирования импульсов, коллимирования и посылки энергии в заданном направлении. Приемник — это чувствительный элемент с устройством для приема электромагнитных колебаний и преобразования их в вид, удобный для измерений.

Отражатель может быть пассивным (зеркально-линзовый, трипельпризменный и т. д.) или активным (ретранслятор-усилитель). При использовании мощных источников излучения (лазеров) возможна работа дальномера без установки специального отражателя на точке, если отражающая способность объекта составляет 15—20% (стена побеленного здания, металлическая обшивка самолета и т. д.).

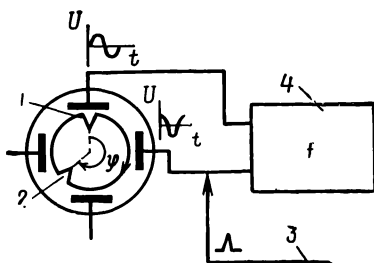
В качестве измерителя времени часто используется электроннолучевая трубка, на электроды которой подается напряжение опорного генератора с частотой f . В результате на экране трубки создается круговая или линейная развертка электронного луча с заданной частотой опорного генератора (рис. II.14).

Дальномер работает следующим образом. С помощью передатчика излучается импульс энергии. Часть энергии импульса кратчайшим путем (опорный сигнал) направляется в приемник и после соответствующей переработки поступает в виде дополнительного напряжения на пару электродов электроннолучевой трубки. В результате на развертке образуется так называемый

опорный выброс 1 (рис. II.14). Остальная энергия импульса, достигнув отражателя и возвратившись к приемнику (т. е. пройдя расстояние $2L$), через время τ создает на развертке отраженный выброс 2. Импульсы излучаются через равные промежутки времени со скважностью (промежутком времени между двумя импульсами) большей, чем период развертки, но меньшей, чем время послесвечения экрана. Вследствие этого изображения опорного и отраженного выбросов остаются на экране видимыми в течение всего времени работы дальномера.

Рис. II.14. Структурная схема индикатора времени:

1 и 2 — зондирующий и отраженный выбросы; 3 — сигнал от приемника; 4 — генератор



Опорный выброс всегда неподвижен, а отраженный неподвижен при неизменном расстоянии и перемещается, если объект движется. Зная направление развертки электронного луча и измерив угол φ (или длину дуги окружности) между опорными и отраженным выбросами (см. рис. II.14), найдем

$$\tau = [\varphi / (2\pi)] (1/f) = [\varphi / (2\pi)] T, \quad (\text{II.20})$$

где f — частота развертки; T — период развертки.

Подставив значение τ в формулу (II.18), получим

$$L = [vT / (4\pi)] \varphi. \quad (\text{II.21})$$

В формуле (II.21) величина $vT / (4\pi)$ представляет собой некоторую постоянную для данных условий внешней среды. Поэтому измерение расстояния сводится к определению величины φ .

Обычно на экран электроннолучевой трубки накладывают прозрачную шкалу, разделенную для некоторого среднего значения скорости v электромагнитных волн и частоты f . Центр шкалы совмещают с центром круговой развертки. Если $T > \tau$, то электронный луч за время τ успевает пробежать только часть окружности, и отсчет по шкале дает значение расстояния в линейной мере. При $T < \tau$ электронный луч за время τ успевает сделать несколько полных оборотов N и какую-то долю оборота φ , в результате искомое расстояние определится из соотношения

$$L = [vT / (4\pi)] (N + \varphi), \quad (\text{II.22})$$

где N — целое, но неизвестное число, которое может принимать значения 1; 2; 3...

Для определения числа N , т. е. для «разрешения многозначности», нужно в дальномере создать условие $T > \tau$. Это достига-

ется применением нескольких частот развертки. При разработке дальномера задаются наибольшим измеряемым расстоянием. Тогда для выполнения условия $T > \tau$ нужно, чтобы $T \geq 2L/v$, откуда

$$f \leq v/(2L). \quad (\text{II.23})$$

Например, при $L = 15$ км и $v = 3 \cdot 10^8$ м/с имеем $f = 10$ кГц.

Частота развертки — один из факторов, влияющих на точность измерений. Практически найдено, что отсчет угла φ по шкале электроннолучевой трубки может быть выполнен с точностью $1/100$ окружности. Цена окружности на частоте f составляет $S = v/(2f)$, а ошибка измерения расстояния $m_D = (1/100)[v/(2f)]$. Например, при $f = 10$ кГц цена окружности равна 15 км, а ошибка измерения расстояния 150 м. Для повышения точности измерений нужно увеличивать частоту развертки. Обычно, для удобства используют дискретные частоты, отличающиеся друг от друга в целое число раз, например в десять. В таком случае при частоте $f = 100$ кГц ошибка измерений составит 15 м; при $f = 1000$ кГц — 1,5 м и т. д.

Таким образом, разрешение многозначности и точное измерение расстояния складываются из последовательных операций, выполняемых на нескольких частотах развертки. Основной (масштабной) частотой, определяющей точность измерений, является наибольшая частота развертки; остальные частоты вспомогательные и служат для определения числа N [см. (II.22)].

Импульсные дальномеры пока находят ограниченное применение для инженерно-геодезических работ в строительстве из-за сравнительно низкой точности. Рассмотренная схема увеличения точности измерений с повышением частоты развертки трудно реализуема и приведена в данном случае в методико-познавательных целях. Основную трудность достижения высокой точности представляет формирование коротких импульсов (порядка $1 \cdot 10^{-9}$ с) прямоугольной формы. Длительные с пологим и меняющимся по форме передним фронтом импульсы создают на экране расплывчатое изображение выбросов, точность отсчета по которым значительно снижается.

Наиболее точные импульсные дальномеры применяют в настоящее время при аэрофотосъемке. Их используют как высотомеры для определения высоты полета в момент фотографирования. Такие данные нужны для последующей обработки аэрофотоснимков и стереоскопической рисовки рельефа при создании топографических планов. Например, радиовысотомер РВТД, разработанный в ЦНИИГАиК, представляет собой импульсный радиодальномер с пассивным отражателем, которым служит поверхность земли (трава, листья деревьев и др.). РВТД имеет длительность импульса $0,4 \cdot 10^{-6}$ с, частоту повторений $16 \cdot 10^3$ имп/с, мощность в импульсе около 500 Вт, диаграмму направленности излучения около 120° . Средняя квадратическая ошибка измерения высоты в равнинно-холмистых и песчаных районах 1,2 м, в горных (не ска-

листных) — 2 м. Имеются экспериментальные разработки лазерных высотометров, дающих среднюю квадратическую ошибку измерений около 0,5 м.

Большим достижением отечественной науки и техники явилось создание лазерного локатора для измерения расстояния до советского Лунохода-1, на борту которого был смонтирован французский трипелъпризменный отражатель. Лазерные локаторы имеют большую перспективу применения в космической геодезии.

Фазовый способ. Принципиальная схема фазового дальномера изображена на рис. II.15. Передатчик непрерывно излучает неза-

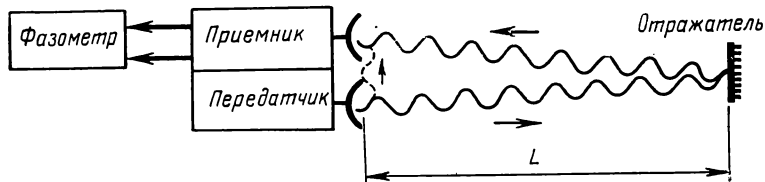


Рис. II.15. Структурная схема фазового дальномера

тухающие электромагнитные колебания с частотой f , направляемые на отражатель. После выхода из передатчика энергия расщепляется, и часть ее (опорный сигнал) поступает в приемник и на фазометр. Отраженные электромагнитные колебания после прохождения пути $2L$ через время τ после выхода из передатчика поступают в приемник и на тот же фазометр. Таким образом, на фазометр поступают колебания, разность фаз которых при неизменном расстоянии и неизменной частоте остается постоянной (когерентные колебания).

При неизменном значении частоты изменение фазы опорного колебания $\varphi_{\text{оп}}$ к моменту t_2 , когда к приемнику приходит отраженное колебание $\varphi_{\text{отр}}$, излученное передатчиком в момент t_1 , определяется разностью времени $\tau = t_2 - t_1$. Значения времени t_1 и t_2 не являются постоянными и не могут быть измерены непосредственно с необходимой точностью. Однако их разность τ , определяющая расстояние до отражателя, остается постоянной в пределах постоянства скорости распространения электромагнитных волн в процессе измерений.

В отдельный момент времени на фазометр поступают колебания от опорного сигнала в фазе и от отражателя в фазе:

$$\varphi_{\text{оп}} = 2\pi f t + \psi; \quad (\text{II.24})$$

$$\varphi_{\text{отр}} = 2\pi f (t - \tau) + \psi, \quad (\text{II.25})$$

где ψ — начальная фаза (при $t = 0$).

Разность фаз этих колебаний $\varphi_{\text{оп}} - \varphi_{\text{отр}} = 2\pi f \tau$, откуда

$$\tau = [(\varphi_{\text{оп}} - \varphi_{\text{отр}}) / 2\pi] (1/f) = [(\varphi_{\text{оп}} - \varphi_{\text{отр}}) / 2\pi] T, \quad (\text{II.26})$$

где T — период колебаний.

Разность фаз ($\varphi_{\text{пол}} - \varphi_{\text{отр}}$) в общем случае состоит из целого числа N периодов колебаний и дробной части Δ периода. Выразив Δ в долях периода колебаний, имеем

$$\tau = (N + \Delta)T = N(1/f) + \Delta(1/f). \quad (\text{II.27})$$

Таким образом, при известной частоте колебаний определение времени τ сводится к определению целого числа периодов N и доли периода Δ . Величину Δ часто называют *домером фазового цикла*. В фазовых дальномерам имеется возможность непосредственно измерять только величину Δ . Используя (II.27), формула (II.18) для вычисления расстояния принимает вид

$$L = (v/2)(N + \Delta)(1/f) = (\lambda/2)(N + \Delta), \quad (\text{II.28})$$

где v — скорость электромагнитных волн; $\lambda = v/f$ — длина волны электромагнитного колебания; Δ — измеренное значение домера фазового цикла; N — неизвестное целое число.

Достоинство фазовых дальномеров — возможность измерения величины Δ или сведения ее к некоторым частным значениям, например нулю, 180° и другим, с большой точностью. Современная техника позволяет измерять Δ с точностью $1/1000$ — $1/1500$ периода колебаний (около $0,2^\circ$ в угловой мере). Так как основная ошибка измерения времени m_τ заключается в ошибке m_Δ определения величины Δ , то можно считать, что время измеряется с точностью около $(1/1000) T$.

В фазовых дальномерам частота, на которой производится измерение, выбирается примерно равной 10^7 — 10^8 Гц, тогда $T \approx 1 \cdot 10^{-7} \div 10^{-8}$ с, а ошибка $m_\tau = 1 \cdot 10^{-10} \div 10^{-11}$ с, за это время электромагнитные колебания пройдут в воздухе путь в 3 — $0,3$ см, что эквивалентно ошибке в $1,5$ — $0,15$ см в расстоянии. *Фазовый способ обеспечивает измерение расстояний с погрешностью в несколько миллиметров, что в большинстве случаев пригодно для инженерно-геодезических целей.*

§ II.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ФАЗОВЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

С помощью радиофизических дальномеров измеряют длину пути, проходимого электромагнитными волнами. В воздушной среде этот путь представляет собой сложную пространственную кривую. Наименьшее время распространения электромагнитных колебаний соответствует пути с наименьшей диэлектрической постоянной воздуха, причем чем выше частота электромагнитных колебаний, тем меньше зависимость скорости их распространения от состояния внешней среды и прямолинейнее путь.

Недостаток применения коротких и ультракоротких радиоволн (от 100 до 1 м) — их малая направленность, способность отражаться и огибать препятствия, в силу чего в точку приема могут приходиться как прямые, так и отраженные от земли и местных предметов (ломаные) лучи, прошедшие другой путь, что существ-

венно снижает точность измерений. Направленность излучения увеличивается, а интенсивность отражений уменьшается с переходом в область радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов и в область световых волн. Но непосредственное измерение разности фаз на волнах этого диапазона затруднительно.

Указанное противоречие и недостатки в значительной мере устраняются при использовании в качестве несущей частоты светового (светодальномеры) и ультракороткого — сантиметрового радиоволнового — (радиодальномеры) диапазонов. Для измерительных целей характер излучения периодически меняется — модулируется по синусоидальному закону. Модуляция может осуществляться по амплитуде, фазе или частоте колебаний. Частота модуляции выбирается в пределах, удобных для фазовых измерений (10—150 МГц). Модулирующую частоту часто называют *масштабной*.

Достоинство светодальномеров — возможность сведения светового потока с помощью сравнительно простых и небольших по размеру оптических систем (антенн) в узконаправленный луч с высокой плотностью энергии в его поперечном сечении. Это позволяет осуществлять измерения с маломощными источниками света и пассивными отражателями, что в целом миниатюризирует светодальномерную аппаратуру и упрощает организацию геодезических работ. Кроме того, для светодальномеров характерны практическая прямолинейность распространения света, малая зависимость скорости света в воздухе от влажности — наиболее непостоянного и трудно учитываемого метеорологического фактора, что определяет и потенциальную точность светодальномеров, приближающуюся в относительном значении к точности определения скорости света и при прочих равных условиях в 3—10 раз выше, чем при измерениях радиодальномерами.

К недостаткам светодальномеров относится значительное затухание световых колебаний в пыльном и влажном воздухе, в связи с чем максимальная наземная дальность действия этих приборов в наиболее благоприятных ночных условиях достигает 20—30 км при использовании тепловых источников света и 40—60 км — при лазерных источниках света. В дневных условиях из-за светлого фона, снижающего контрастность изображения полезного светового сигнала, дальность действия снижается в 2—5 раз.

Достоинство радиодальномеров — возможность выполнения измерений при любой погоде и круглосуточно, независимо от наличия оптической видимости между конечными точками, что обусловлено малым затуханием радиоволн в воздухе. В ряде случаев радиодальномерами можно измерять расстояние сквозь препятствия: кусты или неширокие полосы деревьев. Дальность действия радиодальномеров достигает сотен километров.

Недостаток радиодальномеров — сравнительно широкая диаграмма направленности (6—10°) излучения. Это вынуждает применять активные стражатели — ретрансляторы (усилители), что в целом делает радиодальномерную аппаратуру более громоздкой,

чем светодальномерную. Значительная диаграмма направленности является основной причиной отражения радиоволн от подстилающей поверхности, снижающей точность измерений. Скорость радиоволн сильно зависит от влажности воздуха.

На инженерно-геодезических работах в строительстве главным образом применяют фазовые светодальномеры.

§ II.5. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ УЗЛОВ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ И ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Принципиальная схема фазового светодальномера изображена на рис. II.16. Свет от источника *ИС* поступает в модулятор и с помощью оптической системы передатчика направляется на отра-

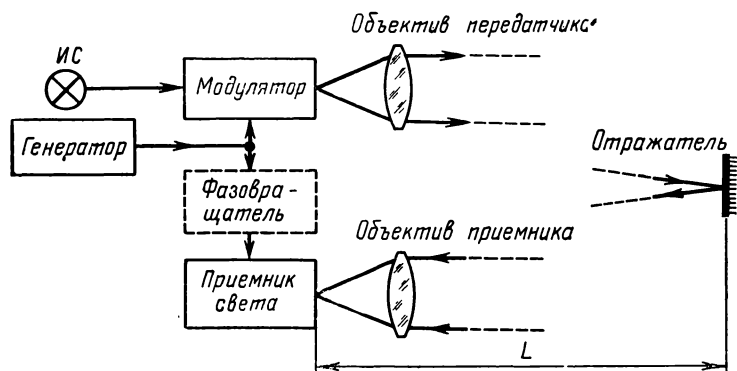


Рис. II.16. Принципиальная схема фазового светодальномера

жатель. Отраженный в обратном направлении световой поток улавливается объективом приемника и направляется в приемник света, где происходит его фазовое детектирование, т. е. сравнение фаз выходящего из модулятора и поступившего в приемник светового потока. Для обеспечения синхронности модуляции и фазового детектирования на модулятор и фазовый детектор подается одно и то же напряжение с частотой f от генератора. Напряжение, подаваемое на фазовый детектор, называется *опорным*.

Фазовое детектирование может осуществляться визуально, непосредственной оценкой интенсивности демодулированного светового потока, или фотоэлектрически — с помощью фотоумножителя, преобразующего световой поток в электрическое напряжение. В зависимости от этого светодальномеры разделяют на визуальные и фотоэлектрические.

Источники излучения. В качестве генераторов световых колебаний применяют тепловые, газоразрядные, лазерные (оптические квантовые генераторы) и полупроводниковые источники рекомбинационного излучения (ПИРИ).

Характеристики тепловых излучателей (ламп накаливания) определяются их температурой. Поскольку излучение происходит в режиме спонтанного перехода атомов и электронов с высоких энергетических уровней на более низкие, оно занимает широкий спектр частот, является некогерентным и рассеивается равномерно во все стороны. Тепловые излучатели удобны в эксплуатации, но имеют малую интенсивность излучения и поэтому применяются в светодальномерах с небольшой дальностью действия.

В газоразрядных излучателях (ртутные и аргоноциркониевые лампы) используется излучение газов или паров металлов, возникающее под действием проходящего через них электрического тока. Излучение спонтанно, в общем случае с линейчатым спектром, может быть сделано частично направленным. Газоразрядные лампы обладают более высоким КПД, чем тепловые излучатели. Недостаток газоразрядных ламп — необходимость иметь специальное пусковое устройство. Газоразрядные лампы — дуговая аргоноциркониевая лампа ДАЦ-50 и ртутная СВДШ-100 — используют в светодальномерах СВВ-1 и ЭОД-1.

Лазеры относят к источникам стимулированного излучения, которое характеризуется монохроматичностью, когерентностью, высокими направленностью и интенсивностью. Эти качества позволяют положительно решать такие задачи, как большая дальность действия, помехоустойчивость и более высокая точность измерений, чем при использовании других источников света. Имеется возможность высокочастотной модуляции лазерного излучения за счет применения пьезоэлектрических элементов, помещаемых в резонаторе, или за счет выделения биений аксиальных мод. Газовые лазеры с непрерывным режимом излучения применяют в светодальномерах с большой дальностью действия. Имеются экспериментальные образцы безмодуляторных светодальномеров, основанных на биениях аксиальных мод. К недостаткам лазеров относится сложность их питания и сравнительно высокая стоимость, доходящая до $\frac{1}{4}$ стоимости комплекта светодальномера.

Из полупроводниковых источников излучения применяют источник рекомбинационного излучения (ПИРИ) на основе арсенида галлия (AsGa), представляющего собой плоскостной диод, p - n -переход которого образует потенциальный барьер, препятствующий проникновению электронов в p -область, а дырок в n -область полупроводника (рис. II. 17, а). Если подать смещение в прямом на-

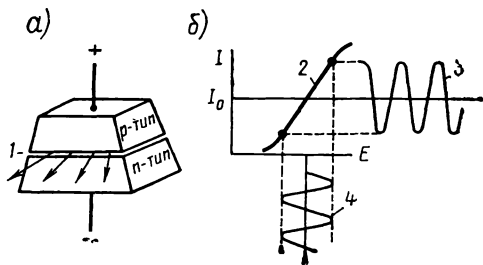


Рис. II.17. Полупроводниковый источник рекомбинационного излучения:

а — общий вид (1 — p - n -переход); б — статическая и модуляционная характеристики (2 — вольт-амперная; 3 — амплитудно-модулированного излучения; 4 — модулирующего напряжения)

правлении, то потенциальный барьер исчезает, электроны инжектируются в p -область, где они рекомбинируют (заполняют) дырки. В результате рекомбинации из узкой области активной зоны вблизи p - n -перехода (ширина зоны около 2 нм) происходит излучение фотонов, т. е. преобразование энергии электрического тока в световую. Излучение узкополосно и невидимо. Интенсивность его почти линейно зависит от проходящего через диод тока (рис. II.17, б). Это дает возможность производить амплитудную модуляцию излучения в ПИРИ путем изменения питающего диод тока. Время рекомбинации носителей тока меньше $1 \cdot 10^{-10}$ с, в связи с чем частота модуляции света может достигать сотен мегагерц. Величина питающего ПИРИ тока находится в пределах 1А при напряжении 1—2 В. Таким образом, потребляемая мощность очень мала (1—3 Вт), что позволяет осуществить миниатюрный светодальномер, питаемый от сухих элементов. Мощность излучения в непрерывном режиме работы находится в пределах 0,0002—0,0005 Вт; излучение спонтанное, частично направленное. При работе в импульсном режиме со значительной скважностью удается снять мощность в несколько раз большую. Геометрические размеры ПИРИ примерно $1 \times 1 \times 1$ мм.

Недостаток ПИРИ — низкий КПД при комнатной температуре. Для повышения КПД на один порядок диод нужно охлаждать до температуры жидкого азота (77 К).

ПИРИ — весьма перспективный излучатель для светодальномеров малой дальности действия. Его применяют в светодальномерах МСД-1 и КДГ-3.

В табл. II.4 приведены сравнительные энергетические характеристики источников света. При составлении таблицы для перехода от световых единиц к энергетическим принято, что люмен — единица светового потока при длине волны $\lambda = 555$ нм (максимум спектральной чувствительности глаза) эквивалентен 0,015 Вт; интенсивность излучения пересчитана для телесного угла в один стерадиан.

Как следует из табл. II.4, интенсивность излучения лазеров на несколько порядков больше, чем других источников света. Это дает основание применять их в светодальномерах с большой дальностью действия и для работ в дневных условиях.

Очевидно по случайному обстоятельству земная атмосфера имеет «окно прозрачности» в области длины волны света 633 нм, поэтому излучение гелий-неоновых лазеров на длине волны 632,8 нм испытывает меньшее молекулярное затухание, что дает светодальномерам на лазере дополнительное преимущество.

Модуляция света. Под модуляцией света понимают изменение излучения по амплитуде, фазе, частоте или плоскости поляризации. Различают внешнюю и внутреннюю модуляцию. При внешней модуляции изменение характера излучения производится устройством, носящим общее название модулятора, отделенного от источника света и работающего независимо. При внутренней модуляции излучение и его модуляция являются функциями одной и

Таблица II.4

Источник света	Мощность излучения		Угол излучения		Интенсивность излучения, Вт/ср	Спектр излучения, нм	Применение источника света в светодиоде
	лм	Вт	плоский, град	телесный, ср			
Лампа накаливания СТ-2	88	—	360	12,6	0,1	Непрерывный в оптическом диапазоне	СТ
Газоразрядная аргоно-циркониевая лампа ДАЦ-50	—	1,4	45	0,6	2,3	Непрерывный в оптическом диапазоне	СВВ-1
Газоразрядная ртутная лампа высокого давления СВДШ-100	1200	—	180	6,3	3,0	Линейчатый 548; 580	ЭОД-1
Лазер малогабаритный гелий-неоновый ОКГ-16	—	5·10 ⁻⁴	0,2	12·10 ⁻⁶	42	632,8	Экспериментальный образец СВВ-1М
Лазер гелий-неоновый ЛГ-75	—	25·10 ⁻³	0,2	12·10 ⁻⁶	2000	632,8	Кварц
Полупроводниковый диод на арсениде галлия ПИРИ	—	3·10 ⁻⁴	4	48·10 ⁻⁴	0,06	910	МСД-1; КДГ-3; ДНК-02

той же переменной; источник излучения и модулятор представляют собой чаще всего единое целое.

При оценке способов модуляции и их применимости для светодальномерной техники исходят из следующего:

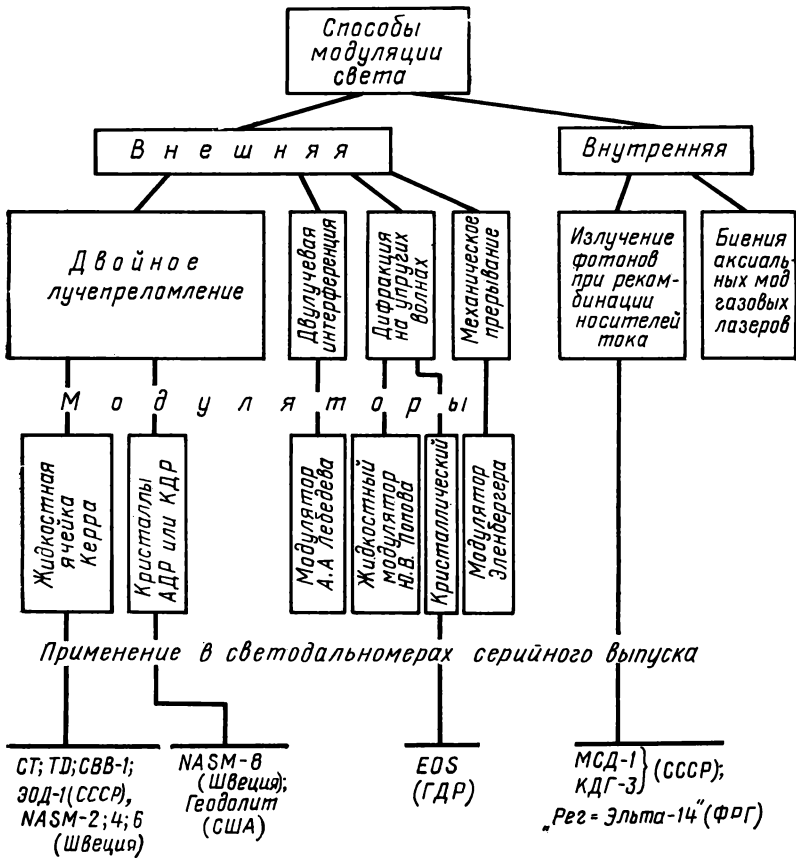


Рис. II.18. Классификация модуляторов света

- 1) должна представляться возможность модуляции на высоких (до 100—150 МГц) частотах в непрерывном режиме работы;
- 2) желательно применение широкополосных модуляторов, т. е. устройств, допускающих модуляцию в плавном диапазоне или на нескольких фиксированных частотах;
- 3) потери света при модуляции должны быть малыми;
- 4) способ модуляции должен быть экономичным по затрате электроэнергии;
- 5) модулятор должен быть несложен в обращении и легко воспроизводим при серийном изготовлении.

Классификация способов модуляции и модуляторов, используемых в серийных и опытных приборах, приведена на рис. II.18. Наибольшее применение в данное время получили модуляторы, основанные на двойном лучепреломлении и среди них — жидкостная ячейка Керра. Основное достоинство ячейки Керра — широкополосность, возможность модуляции сходящегося светового потока, малые геометрические размеры, простота в изготовлении и эксплуатации; недостатки — сравнительно большая потребляемая мощность (5—20 Вт) и небольшое ($\sim 25\%$) светопропускание.

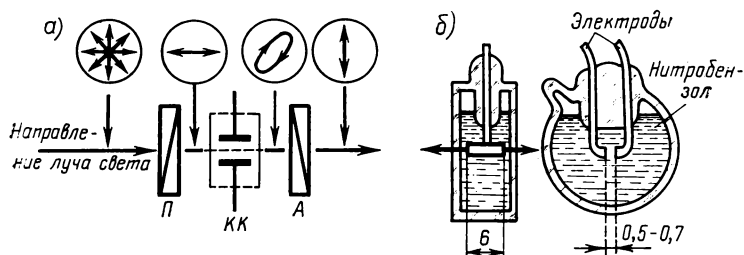


Рис. II.19. Ячейка Керра:

а — схематическое изображение ячейки Керра и характера поляризации света; б — конденсатор Керра и размеры его электродов (в мм)

Одиночная ячейка Керра (рис. II.19, а) состоит из двух поляризующих устройств *П* и *А* и конденсатора Керра *КК*. Первое по ходу луча света поляризующее устройство называют *поляризатором П*, второе — *анализатором А*. В качестве поляризатора и анализатора применяют поляриды, призмы Риттер — Франка и Николя. Конденсатор Керра представляет собой стеклянный прозрачный сосуд (рис. II.19, б) с двумя никелевыми электродами, наполненный нитробензолом*. Рабочая часть электродов плоская, полированная до блеска.

Межэлектродное пространство представляет собой щель в виде геометрически правильного прямоугольника или трапециевидальной призмы. При наложении на электроды электрического напряжения в промежутке между электродами создается *поперечное* электрическое поле, силовые линии которого перпендикулярны к плоскостям электродов и параллельны между собой.

Ячейку Керра применяют в отечественных светодальномерах СВВ-1, ТД-1, СТ, «Кристалл» и др.

Модуляторы на кристаллах АDP и KDP** основаны на *эффекте Погкельса* — изменении показателя преломления пьезокристал-

* Нитробензол — оптически прозрачная биполярная жидкость из семейства нитросоединений ароматического ряда.

** АDP — дигидрофосфат аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$); KDP — дигидрофосфат калия (KH_2PO_4).

ла, находящегося в электрическом поле, пропорциональном первой степени напряжения.

Ячейка Поக்கельса (рис. II.20) так же, как и ячейка Керра, состоит из поляризатора P и анализатора A , установленных на скрещивании осей, и пьезокристалла ADP или KDP, зажатого между двумя электродами. В отличие от ячейки Керра, в ячейке Поக்கельса применяют продольное силовое поле, причем направление силовых линий совпадает с направлением распространения света. Поэтому электроды используют в виде металлической решетки или кольца, сквозь отверстия которых проходит параллельный световой поток.

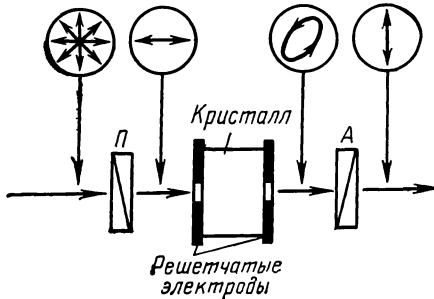


Рис. II.20. Ячейка Поக்கельса

При отсутствии напряжения на электродах кристалл одноосен (изотропен) и световой поток, прошедший поляризатор, гасится анализатором. При наложении напряжения кристалл становится двuosным (анизотропным); вошедший в него луч расщепляется на два — обыкновенный и необыкновенный, — имеющие разную скорость распространения. После выхода из кристалла имеет место интерференция двух лучей и в зависимости от приобретенной разности фаз Ψ сквозь анализатор проходит составляющая в плоскости его оси. Диаграмма изменения характера поляризации дана в верхней части рис. II.20.

Достоинство модулятора на кристаллах ADP и KDP — малая инерционность продольного электрооптического эффекта, позволяющая осуществлять модуляцию света до частот в десятки гигагерц. Недостаток — малая механическая прочность и гигроскопичность. Оптические поверхности этих кристаллов требуют защиты от воздействия атмосферной влаги.

В последние годы в электрооптических модуляторах используют кристаллы сегнетоэлектрических перовскитов (ниобат лития, танталат лития). В отличие от кристаллов дигидрофосфатов они имеют более высокую прочность, меньше подвержены влиянию температуры, негигроскопичны; в отличие от кристаллов KDP и ADP имеют значительно меньшие значения полуволнового напряжения*. Модуляторы, созданные на основе кристаллов сегнетоэлектрических перовскитов, имеют значительную полосу пропускания (до 200 МГц), пропускают видимый свет без заметных потерь (до 3 дБ).

* Полуволновое, или критическое, напряжение — это минимальное напряжение, необходимое для изменения коэффициента пропускания модулятора от минимального до максимального или изменения фазовой задержки на π рад.

В СССР выпускается несколько типов электрооптических модуляторов света. В табл. II.5 приведены технические характеристики этих модуляторов.

Т а б л и ц а II.5

Тип модуляторов	Кристаллы	Полоса прозрачности (длины волны), мкм	Полоса пропускания, МГц	Полуволновое напряжение В. Длина волны, мкм
МЛ-1	KDP	0,35—1,2	0—10	2700 (0,63)
МЛ-3	KDP	0,35—1,2	0—100	730 (0,63)
МЛ-4	ниобат лития	0,5—4,5	0—10	180 (0,63)
				120 (0,51)
МЛ-5	ниобат лития	0,5—4,5	0—200	185 ± 10 (0,63)
МЛ-7	арсенид галлия	0,85—16	0—25	3000 (10,6)

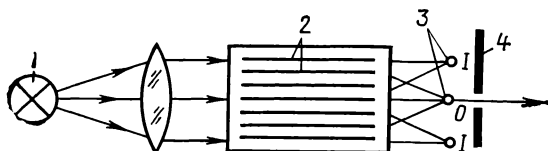


Рис. II.21. Принципиальная схема кристаллического дифракционного модулятора:

1 — источник света; 2 — стоячие ультразвуковые волны в кристалле; 3 — дифракционные максимумы; 4 — диафрагма

Модулятор с дифракцией света основан на создании в оптически прозрачной среде упругих продольных волн, вызывающих периодическое по пространству изменение показателя преломления. Параллельный поток света, распространяясь в такой среде, дифрагирует на неоднородностях коэффициента преломления. Образуется ряд максимумов излучения с разными направлениями светового потока. Суммарная интенсивность по максимумам постоянна и равна интенсивности падающего света. Распределение же энергии по максимумам зависит от интенсивности упругой волны. Дифракционный модулятор можно осуществить при использовании жидкой и твердой (кристаллической) среды.

Наиболее выгодным оказалось использование твердой среды — кристаллов с пьезоэффектом — и создание в них стоячих упругих волн за счет резонансных колебаний самого кристалла. При этом значительно снижается мощность генератора модулирующего напряжения и возрастает глубина модуляции светового потока. На рис. II.21 изображена принципиальная схема кристаллического дифракционного модулятора.

Световой поток с помощью оптической системы формируется в параллельный и направляется в кристалл кварца X-среза в направлении, перпендикулярном к направлению распространения в нем

упругих волн. Размеры кристалла, его температура, частота возбуждения и другие параметры подбираются такими, чтобы в нем образовалось стоячее волновое поле, возникающее и исчезающее каждые полпериода. Например, при использовании в качестве кристалла пластины кварца X-среза и частоте возбуждения порядка 5 МГц в пластине возникают упругие колебания с длиной волны около 1 мм.

Если стоячего поля нет, то большая часть светового потока проходит кристалл без изменений и небольшая часть — через отверстие диафрагмы. При возникновении стоячего поля свет дифрагирует и образуется ряд максимумов 0-, 1-, 2-го и т. д. порядков. При переменном поле дифракционные максимумы пульсируют, т. е. модулируют по амплитуде с удвоенной частотой возбуждения. С помощью диафрагмы выделяется один из максимумов (обычно нулевого порядка), который и используется далее для измерений. Одновременное использование нескольких максимумов невозможно, так как все они имеют разную фазу модуляции.

Достоинство кристаллического дифракционного модулятора — отсутствие поляризирующих устройств, что увеличивает световой поток по сравнению с ячейками Керра и Поккельса в два-три раза. Недостатки — возможность возбуждения кристалла и модуляции только на одной частоте. При необходимости иметь в светодальномере несколько фиксированных частот (для разрешения многозначности), нужно иметь количество кристаллов, равное количеству частот. Скорость распространения упругих волн в кристалле сильно зависит от его температуры; изменение температуры на 2—3° приводит к срыву модуляции. Поэтому кристаллы помещают в термостат, что в целом делает конструкцию модулятора технически сложной.

Генераторы. В светодальномерах используют разные по назначению и устройству генераторы. В общем случае генератор должен состоять из следующих узлов: задающий генератор, буферный каскад, умножитель частоты и усилитель мощности (рис. II.22). На этом же рисунке схематически показаны и диаграммы напряжений. Наличие нескольких каскадов обусловлено необходимостью получения высоких модулирующих напряжений, устранения склонности зсей схемы к самовозбуждению и уменьшения влияния изменения нагрузки выходного каскада (усилителя мощности) на частоту задающего генератора.

Задающий генератор является источником незатухающих колебаний. Основное требование, предъявляемое к нему, — обеспечение высокой стабильности частоты генерируемых колебаний, такой, чтобы за время, проходящее от фиксации наблюдателем экстремума (или равенства световых потоков) до момента отсчета частоты, уход частоты составлял не более $2 \cdot 10^{-6}$. Изменение частоты достигается применением конденсаторов переменной емкости или изменением индуктивности колебательного контура. Сравнительно просто удастся получить изменение частоты в пределах 8—10% от номинального ее значения.

Приемники света. В современных светодальномерах применяют визуальную и фотоэлектрическую индикации светового потока. При визуальном способе наблюдений фазовые соотношения оцениваются по зрительному ощущению наблюдателя. При фотоэлектрическом — по значению фототока, вызываемого полезным световым сигналом.

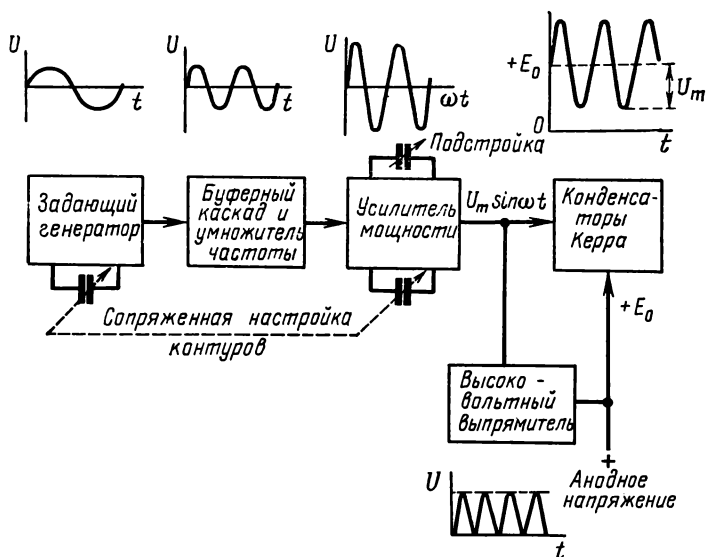


Рис. П.22. Схема генератора модулирующего напряжения с плавным диапазоном частоты

При визуальных наблюдениях перед глазом устанавливают прозрачное демодулирующее устройство.

Глаз — весьма совершенный орган, приспособленный для работы в огромном диапазоне яркостей и обладающий очень низким абсолютным порогом чувствительности. Он может различать полезный световой сигнал на фоне других освещенных предметов, чем обуславливается работа со светодальномером в дневных условиях при сравнительно маломощных источниках света. Механизм зрительного восприятия состоит в том, что свет воздействует на окончания нервных волокон, расположенных на сетчатке глаза. Глаз человека имеет два вида таких окончаний: колбочки и палочки. В зависимости от раздражения тех или иных нервных волокон различают *колбочковое* — дневное зрение и *палочковое* — ночное.

Общий диапазон освещенности j на зрачке, при которых возможна работа человеческого глаза, составляет 10^{-8} — 10^3 лк. Максимальная чувствительность колбочек приходится на длину волны 556 нм (желто-зеленый цвет); максимальная чувствительность палочек — 507 нм (зелено-голубой цвет) (рис. П.23). При работе со

светодалиномером освещенность на сетчатке, обусловленная полезным световым сигналом, меняется и в зависимости от расстояния, прозрачности атмосферы и других факторов, находится в пределах 10^{-6} —1 лк. Если освещенность больше оптимальной, то диафрагмированием оптической системы ее можно уменьшить до желаемой величины.

При измерении больших расстояний ночью работает смешанное зрение; при измерении небольших расстояний ночью и днем — колбочковое зрение. Таким образом, в зависимости от условий наблюдений положение максимума спектральной чувствительности глаза непостоянно, что приводит к возникновению небольшой по величине субъективной ошибки.

Инерционность зрительного восприятия характеризуется постоянной времени глаза. При большой освещенности постоянная времени около 0,03 с, при малой — до 0,25 с. *Адаптация* — изменение чувствительности глаза — связана с изменением диаметра зрачка и переходом от колбочкового зрения к палочковому. Темновая адаптация требует большего времени, чем световая.

Для оценки точности визуальных измерений нужно знать разрешающую способность глаза по амплитуде или так называемую *контрастную чувствительность*. На рис. II.23, б приведена кривая контрастной чувствительности в зависимости от освещенности на зрачке глаза. Как следует из рисунка, при освещенности

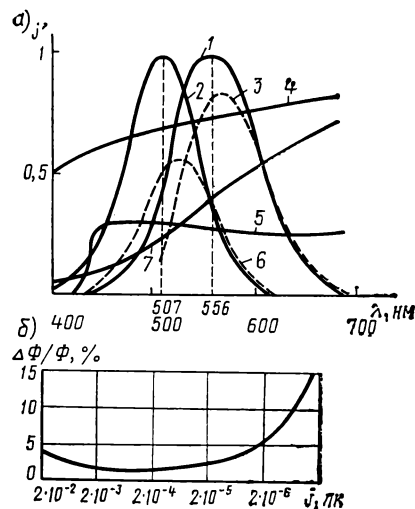


Рис. II.23. Кривые видности j (а) и контрастной чувствительности $\Delta\Phi/\Phi$ (б):

1 и 2 — колбочкового (дневного) и палочкового (ночного) зрения; 3 и 6 — суммарной спектральной чувствительности глаза при дневном и ночном зрении; 4 — спектральной прозрачности атмосферы для горизонтального луча; 5 — спектральной прозрачности конденсатора Керра и поляридов; 7 — спектральная характеристика тепловых источников света

в пределах 10^{-3} — 10^{-4} лк контрастная чувствительность составляет около 2% по отношению к суммарному световому потоку. Для сравнения укажем, что освещенность такого порядка создается световым потоком от Венеры в ее максимальной фазе.

Весьма важным для характеристики визуальных наблюдений является психофизиологический закон Вебера — Фехнера, согласно которому при изменении освещенности в геометрической прогрессии субъективные ощущения изменяются в арифметической прогрессии. Так, если оптимальная освещенность на зрачке, созданная полезным световым сигналом, изменяется в 10 раз в большую или меньшую сторону, то точность наблюдений остается практически постоянной. Действие закона Вебера — Фех-

нера нашло свое проявление в независимости фазовой ошибки светодальномерных измерений от расстояния.

Для определения длины волны света λ , при которой имеет место максимум спектральной чувствительности глаза [λ_v в формуле (1.3)], нужно перемножить ординаты (см. рис. II.23, а), соответствующие избранным значениям длины волн. Такое перемножение на рис. II.23, а выполнено отдельно для дневного (кривая 6) и ночного (кривая 7) зрения. Из рисунка видно, что максимум спектральной чувствительности смещается вправо в сторону более длинных волн. Поскольку при визуальных наблюдениях работает смешанный аппарат колбочко-палочкового зрения, для расчета показателя преломления n [см. (1.3)] принимается максимум спектральной чувствительности, равный 560 нм.

При использовании в визуальных светодальномерах монохроматических источников света показатель преломления должен рассчитываться для длины волны этого излучения.

Фотоэлектрическая регистрация светового сигнала. Достоинством фотоэлектрического способа регистрации фазы по сравнению с визуальным является более высокая (в 2—5 раз) точность и возможность автоматизации процесса наблюдений.

Наиболее чувствительный преобразователь световой энергии в электрическую — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Пороговая чувствительность ФЭУ имеет тот же порядок, что и пороговая чувствительность глаза (около 10^{-11} лм), но инерционность ФЭУ значительно меньше инерционности глаза. Это дает фотоэлектрической индикации дополнительное преимущество. Флуктуации светового сигнала, вызываемые динамическими процессами в атмосфере, имеют частотный спектр с максимумом на частоте в несколько герц. При визуальных наблюдениях эти флуктуации мешают работе, так как глаз реагирует на них. При фотоэлектрической регистрации фазовое сравнение можно производить на частоте, значительно большей, чем верхняя граница спектра флуктуаций, и таким образом избавиться от этого вида помех.

Разрешающая способность фотоэлектрического приемника (ФЭП) при слабых сигналах определяется отношением полезного сигнала к шуму на выходе приемника. При сильных сигналах она определяется в основном параметрами индикаторного устройства и может быть весьма высокой, тогда как для глаза разрешающая способность не превышает определенного предела (см. рис. II.23, б).

ФЭП в общем случае состоит из светочувствительного элемента (ФЭУ), усилителя фототока и индикаторного устройства.

Измерители частоты. Так как частота модуляции непосредственно входит в формулу для определения расстояния, то в момент фазового детектирования нужно знать значение частоты с относительной точностью в два-три раза большей, чем заданная результирующая точность измерения расстояния.

В светодальномерах с фиксированными частотами для получения модулирующих колебаний используют кварцевые генераторы, стабильность частоты которых поддерживается с точностью поряд-

ка $2 \cdot 10^{-7}$ в течение длительного времени. Числовое значение частоты определяют ее эталонированием — сравнением с частотой эталонных колебаний, подаваемых в эфир по радио или в лаборатории по проводам. Эталонирование и установка частоты в номинал производится два-три раза в год.

Эталонирование частот кварцевых генераторов. Несмотря на принимаемые меры по термостатированию и стабилизации питающих напряжений, частота кварцевого генератора с течением времени изменяется. Основная причина этого — «старение» кварцевой пластинки, т. е. изменение со временем ее микроструктуры, температуры термостатирования, положения в пружинном держателе и давления на нее и т. п. В результате совместного действия отмеченных факторов частота кварцевого генератора может меняться от включения к включению в пределах нескольких герц. Поэтому возникает необходимость периодической проверки (несколько раз в течение полевого сезона) и установки в номинал частоты кварцевого генератора по какому-либо эталону.

В настоящее время в СССР через специальные и широкоэвещательные радиостанции передаются *эталонные* частоты f_a , относительная нестабильность которых не ниже $1 \cdot 10^{-7}$. Ведется передача частоты 25, 100 и 200 кГц; 5, 10, 15 и 20 МГц. Аппаратура и методика поверки частот наиболее проста, если поверяемая и эталонная частоты равны или кратны друг другу. Поэтому в большинстве светодальномеров стараются применять кварцевые генераторы с частотой, совпадающей или кратной одной из этих частот. Эталонирование частот целесообразно выполнять в поле непосредственно в районе работ, чтобы исключить возможные ее уходы, связанные с тряской прибора при транспортировке. Особенно это относится к высокочастотным светодальномерам.

Для проверки частоты целесообразно иметь специальный приемник прямого усиления с фиксированной настройкой на избранную частоту (рис. II.24, а). Это особенно относится к приему длинных и средних волн. Сравнение частот производится с помощью электроннолучевой трубки по фигурам Лиссажу или стробоскопическим методом по наблюдениям яркостных меток. В последнем случае на экране трубки создается эллиптическая или круговая развертка с эталонной или кратной ей частотой, а напряжение поверяемой частоты подается на управляющий электрод трубки, модулируя луч по яркости. В случае кратности частот, когда $f_k = z f_a$ (z — целое число), на линии развертки будут видны неподвижные яркие пятна — метки (рис. II.24, б), число которых равно коэффициенту кратности z . Если частота f_k несколько отличается от номинала, то метки перемещаются вдоль линии развертки. Направление перемещения определяет знак отклонения частоты, скорость — величину этого отклонения.

Оптические системы. Назначение оптических систем в светодальномерах — передача, отражение и прием светового потока. Общее требование — обеспечение максимальной направленности светового излучения и минимального светопоглощения.

Полезный световой поток Φ , поступающий на светочувствительный элемент приемника, в зависимости от параметров оптической системы можно представить формулой

$$\Phi = BK [(S_{\text{пер}} S_{\text{отр}} S_{\text{пр}}) / (L^4 \alpha_{\text{отр}})], \quad (\text{II.29})$$

где B — яркость источника света; K — коэффициент, зависящий от прозрачности оптической системы и атмосферы, «прозрачности» модулятора и демодулятора света и т. п.; $S_{\text{пер}}$, $S_{\text{отр}}$, $S_{\text{пр}}$ — площади передающего объекта, отражателя и приемного объекта; L — измеряемое расстояние; $\alpha_{\text{отр}}$ — угол рассеяния света отражателем.

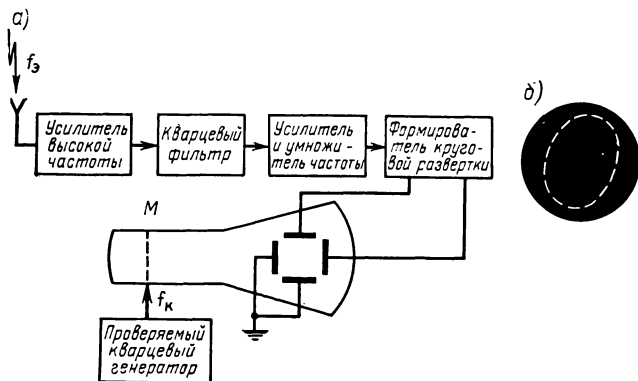


Рис. II.24. Приемник эталонной частоты:

a — схема приемника прямого усиления с использованием электроннолучевой трубки; *б* — изображение ярких меток на экране электроннолучевой трубки при сравнении частот стробоскопическим методом

Использование формулы (II.29) предполагает отсутствие виньетирования света, т. е. соответствие апертурных углов модулятора и передающей оптики и демодулятора и приемной оптики. Поскольку площадь объектива при постоянном значении апертурного угла зависит от фокусного расстояния, то, как следует из (II.29), для получения большего светового потока выгодно применять длиннофокусные оптические системы. Световой поток очень сильно зависит от расстояния: если, например, увеличить расстояние в два раза, то световой поток уменьшится в 16 раз.

Приемная и передающая оптические системы соединены обычно в одном блоке — приемопередатчике. По способу разделения передаваемого и принимаемого светового потока оптические системы подразделяют на двухтрубные, однотрубные коаксиальные (сососные) или разделенные, однотрубные совмещенные, а по используемым оптическим элементам — на линзовые и зеркально-линзовые.

Двухтрубная линзовая оптическая система (рис. II.25, *a*) широко применяется в отечественных светодальномерах (СВВ-1, СТ, СГ-3 и др.). Ее достоинства — простота конструкции, помехоустойчи-

вость против паразитных засветок и дешевизна изготовления; недостаток — значительные продольные габариты. Зеркально-линзовая коаксиальная оптическая система (рис. П.25, б), применяемая в шведских светодальномерах Геодиметр, имеет уменьшенный продольный габарит. Зеркально-линзовая совмещенная оптическая система (рис. П.25, в) применяется в светодальномере «Кристалл». В ней роль скрещенных поляризатора и анализатора выполняет биполяризатор, оба канала которого пропускают световые потоки,

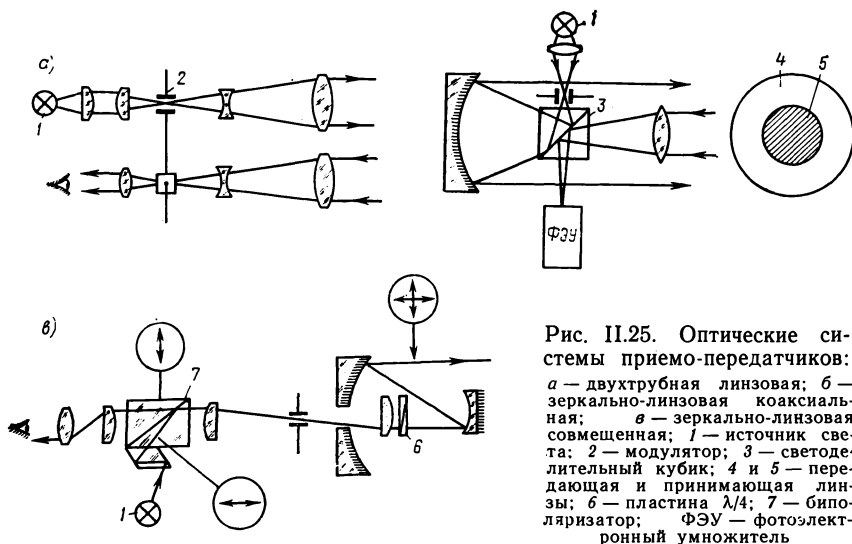


Рис. П.25. Оптические системы приемо-передатчиков: а — двухтрубная линзовая; б — зеркально-линзовая коаксиальная; в — зеркально-линзовая совмещенная; 1 — источник света; 2 — модулятор; 3 — светодетельный кубик; 4 и 5 — передающая и принимающая линзы; 6 — пластинка $\lambda/4$; 7 — биполяризатор; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель

поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Чтобы создать условия, аналогичные установке под углом 90° модулирующего и демодулирующего конденсаторов Керра, на пути светового потока установлена четвертьволновая пластинка ($\lambda/4$). При двойном прохождении светового луча эта пластинка работает как полуволновая, в результате чего плоскость поляризации вышедшего и вошедшего в конденсатор Керра луча будет повернута на 90° , чем обеспечиваются условия, необходимые для наблюдений экстремума компенсационным способом.

Достоинства совмещенной оптики — малый продольный габарит и возможность использования одного конденсатора Керра для модуляции и демодуляции светового потока. Недостатки — обилие разделов стекло — воздух, на каждом из которых происходит частичное отражение и деполяризация света. Это же явление имеет место и в биполяризаторе (рассеяние на неоднородностях), в результате чего появляется постоянная составляющая светового потока в плоскости луча, выходящего к наблюдателю, что создает значительный светлый фон, понижающий контрастность полезного светового сигнала.

К отражателям для светодальномеров предъявляют требования: простота установки (ориентирования), малый угол рассеяния, а к отражателям для визуальных светодальномеров — дополнительное требование — отсутствие деполяризации света при отражении.

На рис. II.26, а изображена зеркально-линзовая отражательная оптическая система с плоским зеркалом, установленным в фокусе линзы. Отражатели такого типа просты в изготовлении, если $d/f \leq 1:10$ (d — диаметр; f — фокусное расстояние объектива). Для получения обратного светового потока с потерей (из-за неточной ориентировки) не более 3% достаточна ориентировка с точностью 1°. Общие потери света в зависимости от прозветления оптики и качества зеркала составляют 12—20%. Недостатки зеркально-линзового отражателя — значительный продольный габарит.

На рис. II.26, б изображен сферический отражатель, а на рис. II.26, в — трипельпризменный.

Луч света, падающий на входную грань призмы по нормали, претерпевает в призме трехкратное полное внутреннее отражение и, пройдя внутри призмы путь, равный двум ее высотам h , выходит смещенным по вертикали и горизонтали, но параллельным падающему лучу. Максимальное смещение луча может достигать диаметра d окружности, вписанной во входную грань призмы (рис. II.26, в). При измерениях малых расстояний (до 100 м) отраженный луч может не попадать в приемный объектив светодальномера; для исключения этого явления применяют оптические клинья, надеваемые на призму и отклоняющие отраженный луч в нужном направлении.

В последние годы все большее применение получают уголковые отражатели, представляющие собой блок из нескольких трипельпризм (рис. II.27).

При использовании трипельпризм в визуальных светодальномерах отражающие грани призм металлизуются, что устраняет деполяризацию света, имеющую место при полном внутреннем отражении. Отражающая способность трипельпризм при этом снижается и составляет около 60—65%.

Достоинства трипельпризм — малая чувствительность их к точности ориентировки в направлении на приемопередатчик (допустима ошибка в несколько градусов) и малые геометрические размеры. Недостатки — большая стоимость изготовления и значительное светопоглощение в стекле и при отражениях (в металлизированной призме). Тем не менее ведутся интенсивные работы по усовершен-

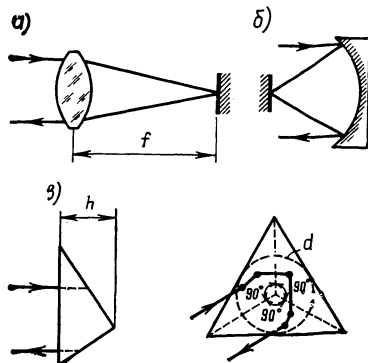


Рис. II.26. Оптические системы отражателей:

а — зеркально-линзовая; б — сферическая; в — трипельпризменная

ствованию технологии их изготовления. Трипельпризменные отражатели являются в целом перспективными.

Тактико-технические данные некоторых отечественных светодальномеров, применяемых на инженерно-геодезических работах, приведены в табл. II.6. На рис. II.27 и II.28 показаны соответственно светодальномеры ТД-2 и МСД-1, последний во взрывобезопасном исполнении.

Применение светодальномеров на инженерно-геодезических работах в строительстве. Светодальномеры применяют при градостроительстве, промышленном, гражданском и гидротехническом строительстве, в маркшейдерии и т. д.

При работах в градостроительстве светодальномеры используют для развития геодезических сетей методом полигонометрии. В этом отношении типичны работы, выполненные в Москве, Новосибирске, Балахне, Иноземцеве и других городах с помощью светодальномеров. Светодальномерная полигонометрия в городах оказалась целесообразной по условиям организации работ, выгод-

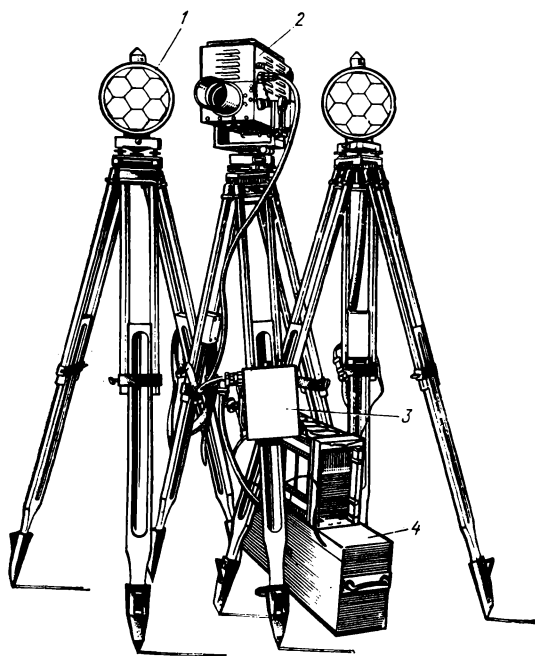


Рис. II.27. Светодальномер ТД-2

1 — трипельпризменный отражатель (шесть призм);
2 — приемопередатчик; 3 — блок питания; 4 — аккумулятор

ной экономически (экономия до 25%) и вполне обеспечивающей регламентированную для градостроительства точность. Большая экономия и удобство возникают при использовании светодальномеров для привязки городской геодезической сети к пунктам государственной геодезической сети. На строительных площадках целесообразно применять светодальномеры для построения *геодезической строительной сетки*, представляющей собой обычно сеть, квадратов или прямоугольников с измеренными сторонами и углами. Вследствие занятости площадки вспомогательными сооружениями измерение длины сторон сетки лентами или проволоками непосредственно по земле представляет значительную трудность. Применение светодальномеров позволяет решить эту задачу проще и быстрее. Во-первых, для измерения длины линий светодальномерами не требуется подготовки наземной трассы; во-вторых, возможно при-

менение новых схем построения в виде сети трилатерации или линейно-угловых засечек. Так, например, при создании геодезической строительной сетки на Волжском автомобильном заводе с помощью

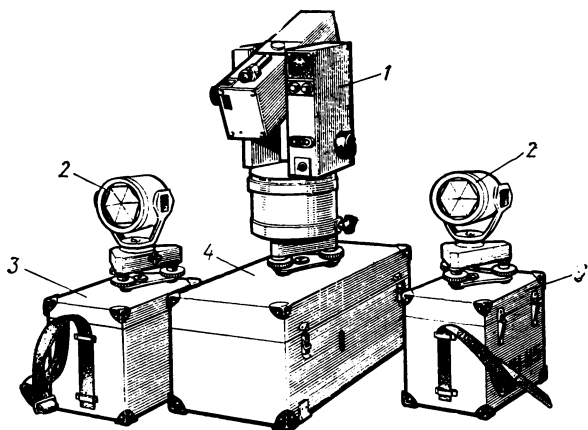


Рис. II.28. Светодальномер МСД-1:

1 — приемопередатчик с блоком питания во взрывобезопасном исполнении; 2 — трипельпризменный отражатель (одна призма); 3 и 4 — упаковочные ящики отражателей и приемопередатчика

Таблица II.6

Тип светодальномера	Модулятор и фазовый детектор	Способ наблюдений	Дальность, км	Точность измерений, см	Потребляемая мощность, Вт	Масса комплекта, кг
ТД-2	Синхронно работающие Керра	Визуальный	0,1—5	1—2	90	105
СТ-62М	Синхронно работающие Керра	То же	0,1—5	2—10	30	70
МСД-1	ПИРИ на AsGa и ФЭУ	Инструментальный	0,005—0,5	0,1—0,2	4	35
КДГ-3	ПИРИ на AsGa и ФЭУ	То же	0,02—1,2	2—5	5	37
2СМ-2	ПИРИ на AsGa и ФЭУ	То же	0,002—2	2	25	64

светодальномера СТ-64 был применен способ линейно-угловых построений (рис. II.29), давший вполне удовлетворительные результаты по точности и двукратное повышение производительности труда.

В маркшейдерских работах особую трудность представляют

линейные измерения в подземных условиях. До последнего времени бóльшая часть таких работ выполнялась с помощью стальных рулеток и лент. Применение светодальномеров облегчает и упрощает технику линейных измерений, поскольку отпадают такие опера-

ции, как провешивание и секционирование линий, превышающих длину рулетки, что весьма важно, если принять во внимание сильную вентиляционную струю воздуха и все возрастающую интенсивность движения рудничного транспорта.

Светодальномеры применяют для определения глубины шахтного ствола. Высокоточные светодальномеры используют для определения деформаций и сдвигов горных пород, гидротехнических сооружений, движения земной коры.

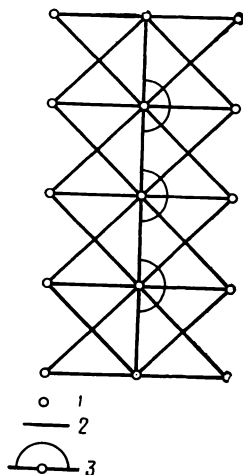


Рис. П.29. Схема создания геодезической строительной сетки способом линейно-угловых построений: 1 — пункты строительной сетки; 2 и 3 — измеренные стороны и углы

§ П.6. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Для компарирования мерных приборов и точного измерения небольших расстояний применяют интерферометры. В последнее время эти приборы используют для измерения деформаций сооружений, а также для изучения поверхности строительных материалов, контуров на поверхности кристаллов и т. д. Измерения с помощью интерферометров характеризуются относительной погрешностью 10^{-7} — 10^{-8} .

Интерферометрами называют приборы, служащие для пространственного разделения двух световых лучей и создания между ними определенной разности хода с целью получения интерференционной картины, по которой определяют измеряемое расстояние или изменение расстояния. До появления лазеров в интерферометрии применялись источники света с узким волновым спектром.

В 1960 г. на Международной генеральной конференции, посвященной вопросам метрологии, в качестве эталона единицы длины приняли длину волны излучения оранжевой линии изотопа криптона с массовым числом 86 (^{86}Kr) равную $6067,8021 \cdot 10^{-10}$ м, а ошибку ее воспроизведения — $5 \cdot 10^{-15}$ м (или $1 \cdot 10^{-8}$ в относительных единицах). При измерениях в вакууме в 1 м укладывается 1650763,73 длин волн излучения этой линии изотопа криптона.

При использовании в интерферометре монохроматического света яркость полос интерференционной картины зависит от яркости источника света и разности хода оптических лучей. Если источник света имеет широкую полосу излучения, т. е. излучение состоит из волн различной длины, то интерференционная картина менее ярка и окрашена, так как для различных длин волн положение максимумов (или минимумов) смещено относительно друг друга. Вели-

чина смещения полос интерференционной картины для различных длин волн возрастает с увеличением разности хода и ширины спектральной полосы. В идеальном случае (если бы источник света излучал на одной частоте) можно было бы наблюдать интерференционную картину при неограниченной разности хода световых лучей.

Ширина волнового спектра для различных источников света неодинакова и поэтому неодинакова *длина когерентности*. Длина когерентности характеризует ту максимально допустимую разность хода световых лучей, при которой еще наблюдается картина интерференции. Для определения длины ΔL когерентности необходимо определить время Δt когерентности источника, связанное с шириной $\Delta \nu$ спектральной линии излучения соотношением $\Delta t = 1/(\Delta \nu)$, откуда $\Delta L = c\Delta t$, где c — скорость света.

Лазерные источники обладают значительно большей длиной когерентности, чем другие источники света. Линия излучения газовых лазеров предельно узка, а следовательно, велика длина когерентности. Так, при сравнительно легко достижимой ширине линии излучения газового лазера порядка 1 МГц время когерентности $\Delta t = 1/(\Delta \nu) = 1/1 \text{ МГц} = 10^{-6} \text{ с}$, что соответствует длине когерентности $\Delta L = c\Delta t = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} = 300 \text{ м}$.

Однододовые гелий-неоновые лазеры имеют и более узкую ширину линий излучения. Так, достигнута кратковременная ширина излучения гелий-неонового лазера, равная 2 Гц. Обычные источники света обеспечивают в лучшем случае время когерентности 10^{-8} с и, следовательно, длину когерентности порядка 3 м.

Погрешности измерений интерферометрическим методом в основном обусловлены нестабильностью частоты источника света, так как эталон длины — длина волны света. При изменении этого эталона длины, т. е. при уходе частоты, возникают ошибки измерений. Нестабильность частоты $S_\nu = \Delta \nu/\nu$, где ν — средняя частота излучения, генерируемая лазером; $\Delta \nu$ — величина флуктуации частоты за время наблюдений.

Обычно стабилизация частоты лазеров достигается путем стабилизации длины оптического резонатора, так как изменение длины резонатора лазера вызывает изменение частоты излучения. Достигнутая точность стабилизации частоты составляет 10^{-9} , следовательно, и потенциальную погрешность в измерении длины интерференционным методом можно охарактеризовать такой же величиной.

Таким образом, лазерные источники света по своим качествам значительно превосходят обычные источники, применяемые ранее в интерферометрах; лазеры обладают значительно большей интенсивностью, монохроматичностью и когерентностью. По этой причине с появлением лазеров интерференционные методы измерений начали интенсивно развиваться и применяются не только для научных исследований, но и в производстве.

В течение длительного времени для высокоточных измерений применяют интерферометр Майкельсона (рис. II.30, а). Парал-

лельный пучок света от источника S делится полупрозрачной плоскопараллельной пластинкой A на два пучка 1 и 2 , направленных под прямым углом друг к другу. Световой пучок 1 попадает на зеркало C_1 , отразившись от которого, вновь попадает на пластинку A и, еще раз отразившись, попадает в объектив D прибора. Световой пучок 2 достигает зеркала C_2 , отразившись от него проходит полупрозрачную пластинку и попадает в объектив D . Вследствие разности хода d_1 и d_2 световых лучей 1 и 2 они интерферируют между

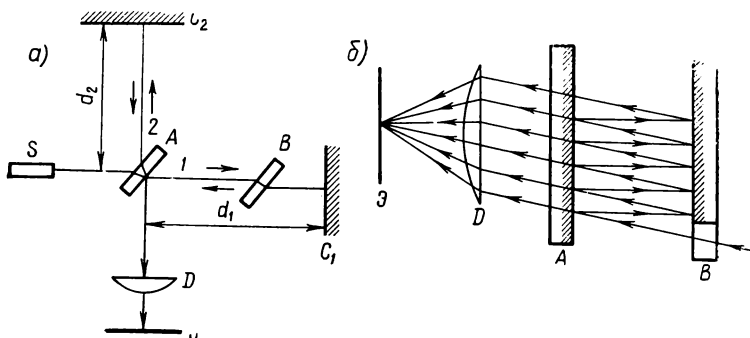


Рис. П.30. Схемы интерферометров Майкельсона (а) и Фабри — Перо (б):
 A и B — зеркала

собой. На экране \mathcal{E} наблюдается интерференционная картина, состоящая из темных и светлых полос или колец (если угол между пучками 1 и 2 не равен 90° , то наблюдается система полос, если этот угол прямой, то система колец).

На пути светового пучка 1 устанавливают плоскопараллельную пластинку B , по толщине равную пластинке A . Пластинка B играет роль компенсатора, служащего для уравнивания оптической длины обоих плеч интерферометра, так как пучок 1 прошел пластинку A один раз, а пучок 2 — три раза.

Перемещение полос интерференционной картины вызывается смещением зеркал; при этом перемещение зеркала на половину длины световой волны вызывает сдвиг интерференционной картины на одну полосу. Зная длину волны излучения и подсчитав число переместившихся полос, можно определить величину смещения зеркала при условии, что другое зеркало остается неподвижным. Подсчет числа полос можно производить визуально или автоматически с помощью фотоприемника, перед которым установлена диафрагма, пропускающая только одну полосу. При автоматической регистрации на выходе фотоприемника будет фиксироваться изменение сигнала при смещении полосы (максимум сигнала соответствует максимуму освещенности).

В последние годы созданы лазерные интерферометры, позволяющие с высокой точностью измерять перемещения и расстояния в

Таблица П.7

Страна	Фирма	Модель	Пределы измерения, м	Цена деления индикаторного устройства, мкм	Точность измерения	Скорость перемещения огранижителя, мм/мин	Способ введения поправок за изменение показателя преломления
СССР	ИАЭ СО АН	ИПЛ	0—1	0,1	$\pm (1 \text{ отсчет} + 5 \cdot 10^{-7} L)$	1,5	Ручной ввод по таблицам
США	Перкин—Эльмер	5900-R	0—0,60	0,8; 0,1; 1,0	То же	9	Автоматический
США	Хьюлетт—Паккард	HP5525H	0—60	0,1; 0,01	»	18	Полуавтоматический
США	Катлер—Хаммер	Марк II	0—45	0,1; 0,2	»	10	Автоматический
Англия	Тейлор Гобсон	МК-1	0—5	0,1	$\pm 1 \text{ мкм}$	18	По таблицам
ФРГ	Сименс—Лейтс	65-Л	0—10	0,1	1 мкм на 1 м	18	Полуавтоматический
СССР	ИАЭ СО АН	ДИП-2	0—60	0,01	$10^{-7} L + 2 \cdot 10^{-9}$	—	»
ЧССР	Метра—Бланко	LA-3000	0—10	0,1	$5 \cdot 10^{-7} L$	—	По таблицам
СССР	Хабаровский филиал ВНИИФТРИ	—	0—50	0,01	0,01 мкм	2·10—3	»

пределах нескольких десятков метров. В табл. II.7 приведены технические характеристики некоторых типов лазерных интерферометров.

В качестве источника света в интерферометрах, как правило, используют гелий-неоновые лазеры с длиной волны $0,6328 \text{ мкм}$, у которых стабильность частоты излучения обеспечивается постоянством длины оптического резонатора. Постоянство длины достигается с помощью пьезокерамики, используемой для малых смещений зеркал резонатора.

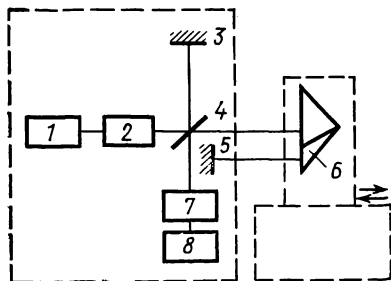


Рис. II.31. Схема лазерного интерферометра:

1 — лазер; 2 — телескоп; 3, 5 — зеркала; 4 — светоделительная пластина; 6 — трипельпризма, установленная на исследуемом объекте; 7 — фотоприемное устройство; 8 — блок индикации

На рис. II.31 показана оптическая схема лазерного интерферометра. Гелий-неоновый лазер 1 генерирует световой пучок, который, пройдя телескопическую систему 2, становится практически параллельным. Светоделительная пластина 4 расщепляет пучок лучей на два. Один из них отражается от неподвижного зеркала 3, другой проходит трипельпризму 6, установленную на подвижном основании, отражается от неподвижного плоского зеркала 5 и возвращается к светоделительной пластине 4. Оба отражен-

ных пучка интерферируют в фотоприемном устройстве 7, состоящем из двух фотоприемников. С фотоприемников снимаются сигналы, отличающиеся по фазе на 90° .

Чтобы получить требуемую ширину наклона интерференционных полос, поворачивают пластину 4 или зеркало 3. Максимальная скорость продольного смещения трипельпризмы обычно не превышает $\sim 20 \text{ м/мин}$, что обусловлено инерционностью фотоприемников. В то же время разворот отражателя не изменяет наклона и ширины полос интерференционной картины, так как трипельпризма обладает свойством отражать луч света параллельно направлению входа луча.

Точность интерференционных измерений существенно зависит от точности определения показателя преломления воздуха. Во многих лазерных интерферометрах используют устройства, обеспечивающие определение показателя преломления воздуха с точностью порядка 10^{-7} . Прецизионные измерения с точностью порядка 10^{-7} и выше можно производить либо в термостатированных помещениях, либо используя вакуумный световод.

Интерферометр с вакуумным световодом разработан в Хабаровском филиале ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он предназначен для измерения медленных смещений земной коры, регистрации сейсмических волн, изучения осадок и деформаций сооружений.

Технические данные интерферометра с вакуумным световодом приведены ниже:

Максимально измеряемое расстояние L , м	50
Длина волны излучения лазера λ , мкм	0,6328
Мощность лазерного излучения P , мВт	0,5
Угловой растрор светового пучка на выходе:	
из лазера, мин	6
из коллиматора, с	36
Ширина спектра излучения Δf , МГц	менее 0,5
Дрейф средней частоты, МГц/ч	0,8
Пороговая чувствительность, мкм/ч	1
Точность отсчета, мкм	0,01
Максимальная скорость смещения, мм/мин	2

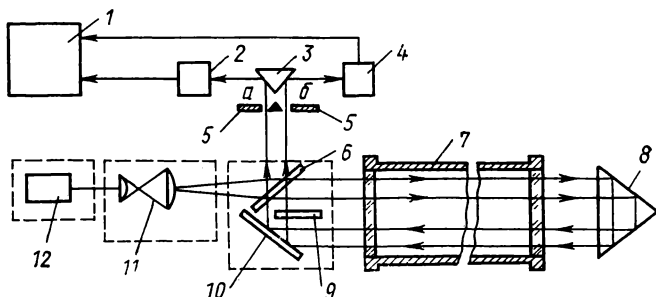


Рис. П.32. Схема лазерного интерферометра с вакуумным световодом:

1 — регистрирующее устройство; 2, 4 — фотоприемники; 3 — светоделительная призма; 5 — диафрагмы с отверстиями a и b ; 6 — светоделительная пластина; 7 — вакуумный световод; 8 — отражатель, устанавливаемый на исследуемом объекте; 9 — стеклянная пластина; 10 — зеркало; 11 — телескоп; 12 — лазер

Принцип действия такого интерферометра аналогичен принципу действия интерферометра, описанного выше.

Направление перемещения отражателя 8 определяется по знаку разности фаз интерференционных картин, наблюдаемых в сечениях a и b диафрагмы 5 (рис. П.32).

Для того чтобы фазы интерферирующих лучей были различными в сечениях a и b диафрагм между светоделительной пластиной 6 и зеркалом 10 помещена стеклянная пластина 9, сдвигающая разность фаз интерферирующих лучей на $\pi/4$ (рис. П.33). Интерферирующие лучи направляются с помощью призмы 3 на вход фотоприемников 2 и 4 (см. рис. П.32), в качестве которых использованы фотоэлектронные умножители ФЭУ-15. Сигналы с ФЭУ регистрируются с помощью самописца типа Н3020-3.

Отражатель 8 перемещают с помощью микрометренного винта. Величина смещения равна произведению числа периодов на величину $\lambda/2$.

Вакуумный световод собран из секций стальных труб диаметром 60 см и длиной 3,5 м каждая. Секции соединены между собой

через вакуумный уплотнитель. Внутри световода для исключения влияния внешних условий на результаты измерений создан вакуум порядка 1 Па.

Полевые испытания показали, что основным фактором, влияющим на результаты измерений, являются температурные деформации фундамента, на котором установлен лазерный интерферометр, а максимально измеряемая скорость смещения определяется быстродействием регистрирующей аппаратуры (самописца). За время измерений дрейф частоты излучения должен быть меньше величины $v\Delta L/L$, где v — средняя частота генерации; ΔL — измеряемое смещение отражателя.

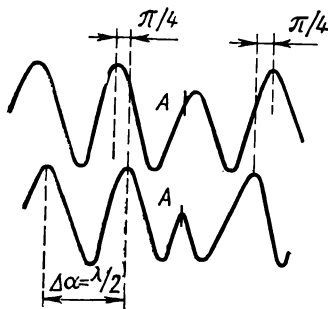


Рис. П.33. Фрагмент записи информации о движении объекта на ленте самописца (в точке А произошло изменение направления движения)

Более высокая точность достигается при выполнении измерений на различных длинах волн λ_1 , λ_2 и λ_3 . В этом случае определяют число полос интерференционной картины и дробную часть интерференционной полосы для каждой из волн, а затем вычисляют три значения измеряемого расстояния. За окончательное значение определяемой величины принимают среднее из трех значений измеряемого расстояния.

В интерферометре Майкельсона в образовании интерференционной картины участвуют только два пучка, получаемые при делении полупрозрачной пластинкой А, поэтому такой интерферометр называют *двухлучевым*. В действительности имеет место многократное отражение лучей на светоделительной пластинке А. Однако эти лучи имеют очень малую интенсивность и поэтому практически не влияют на освещенность интерференционной картины. В других типах интерферометров, называемых *многолучевыми*, учитывается влияние многократных отражений.

С помощью многолучевых лазерных интерферометров, созданных на базе интерферометра Фабри — Перо, можно изучать поверхность строительных материалов, при этом точность характеризуется величиной порядка 0,0015 мкм. Эти же приборы используются как эталоны длины для компарирования мерных приборов.

Интерферометр Фабри — Перо состоит из двух плоских или сферических зеркал, обращенных друг к другу зеркальными покрытиями (рис. П.30, б). Интерференционная картина, наблюдаемая на экране Э, образуется лучами, многократно отраженными от первого и второго зеркал. Чтобы интерференционная картина была резкой, отражающий слой делают тонким, а коэффициент отражения наибольшим. В этом случае (если зеркала расположены параллельно друг другу) на экране наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся световых и темных колец. При изменении расстояний между зеркалами эти кольца на экране

смещаются, что можно наблюдать визуально, регистрировать при помощи фотоприемника или фотографировать.

Эталонами Фабри — Перо называют интерферометры с неподвижными зеркалами. Обычно эти эталоны применяют в интерференционных измерениях по методу оптического умножения расстояний. По этому методу сравнивают два эталона Фабри — Перо, причем длина b_2 одного эталона примерно в два раза больше длины b_1 другого эталона (рис. II.34, а). Сравнимые эталоны устанавли-

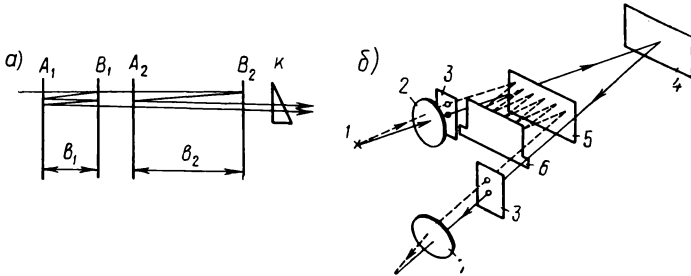


Рис. II.34. Схема оптического умножения расстояния при интерферометрических измерениях:

а — по способу Фабри — Перо; б — по способу Вейсала

вают таким образом, чтобы их зеркала были параллельны. При освещении белым световым пучком часть лучей проходит через зеркала A_1 и B_1 и, отразившись по одному разу от зеркал A_2 и B_2 , попадает в объектив, а другая часть лучей, отразившись по два раза от зеркал A_1 и B_1 , проходит через зеркала A_2 и B_2 и также попадает в объектив. Если световой пучок падает нормально к поверхности зеркал эталонов, то разность хода первой и второй частей пучка $\Delta b = 4b_1 - 2b_2$. Для световых пучков, падающих на поверхность зеркал под углом α , разность хода $\Delta b = (4b_1 - 2b_2) \cos \alpha$.

Для определения разности хода на пути световых лучей, прошедших оба эталона, устанавливают оптический клин K . Разность хода лучей Δb компенсируется в том месте клина, где его толщина равна $\Delta b/2$. В этом месте наблюдается белая интерференционная полоса. Для удобства измерений оптический клин градуируют и по положению белой полосы определяют разность хода световых лучей. Определив длину b_2 второго эталона, сравнивают его с другим эталоном, имеющим в два раза большую длину и т. д.

По описанному методу можно сравнивать измеряемую линию с эталоном, длины которых находятся в отношениях 3 : 1; 4 : 1; 5 : 1 и т. д. При этом наблюдается интерференция лучей, отразившихся по три, четыре и т. д. раз от зеркал первого эталона и по одному разу от зеркал второго эталона. Обычно кратность длины сравниваемых эталонов не превышает 6—8, так как многократно отраженный световой пучок сильно ослабляется по сравнению с однократно отраженным, что затрудняет наблюдение интерференцион-

ной картины. Этот способ сравнения длины эталонов требует высокой точности при установке зеркал взаимно параллельно.

При менее точной установке зеркал в интерференционных компараторах эталоны сравнивают по способу Вьясала (рис. II.34, б).

Лучи, выходящие из точечного источника 1 белого света, с помощью коллиматора 2 делаются параллельными и разделяются диафрагмой 3 на два световых пучка. Один из них многократно отражается от зеркал 5 и 6 и попадает в объектив 7, а другой — отражается зеркалом 4 и попадает в тот же объектив 7 зрительной трубы. Если расстояние между зеркалами 4 и 6 в целое число раз больше расстояния между зеркалами 5 и 6, то в фокусе объектива наблюдается интерференционная картина. Расстояние между зеркалами 5 и 6 обычно берут равным 1 м или 1 м 20 см.

Способом Вьясала выполняют высокоточные измерения контрольных линий длиной до 864 м.

Глава III

УГЛОМЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

§ III.1. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕОДОЛИТЫ

Одним из наиболее массовых видов геодезических работ в строительстве являются угловые измерения, которые обычно выполняют с помощью технических теодолитов, обеспечивающих измерения вертикальных и горизонтальных углов с точностью порядка 10—30".

Главной частью любого теодолита является угломерный круг, который может быть металлическим или стеклянным. Согласно ГОСТ 105 29—63 отечественная промышленность выпускает только оптические теодолиты со стеклянными кругами. Эти теодолиты обладают рядом преимуществ по сравнению с теодолитами, имеющими металлические круги [19, 22].

Оптические теодолиты обеспечивают высокую стабильность результатов измерений, надежны в работе, имеют малую массу и размеры, просты и удобны в обращении. Благодаря унификации узлов и деталей их можно оснащать различными дополнительными приспособлениями и принадлежностями (дальномерными насадками, накладными уровнями, марками и т. д.), позволяющими расширить круг выполняемых работ. Наличие у некоторых типов оптических теодолитов компенсаторов вместо цилиндрического уровня при алидаде вертикального круга позволяет обеспечить автоматическую стабилизацию места нуля прибора. Благодаря этому отпадает необходимость каждый раз перед производством отсчета по вертикальному кругу устанавливать пузырек уровня на середину. Погрешность компенсатора не превышает 1—2", поэтому он обеспечивает не только удобство и быстроту действий, но также исключает ошибки, вызванные неточностью установки пузырька уровня, и дает возможность производить теодолитом нивелирование.

В настоящее время выпускают два типа технических теодолитов — Т30 и Т15. Цифры 30 и 15 обозначают средние квадратические ошибки измерения углов одним приемом, характеризующие инструментальные составляющие ошибок измерений.

ТЕОДОЛИТ Т30 (рис. III.1) — оптический штриховой теодолит повторительного типа с односторонней системой отсчета по лимбам. Он предназначен для измерения вертикальных и горизонтальных углов с точностью порядка 30", измерения расстояний по нитяному дальномеру и дальномерной насадкой ДН10, определения магнитных азимутов, нивелирования горизонтальным лучом визирования

с помощью уровня УТ20-Т2 при трубе. Технические данные теодолита Т30 приведены ниже:

Увеличение зрительной трубы, крат	20
Посадочный диаметр объектива, мм	38
Диаметр объектива, мм	27
Эквивалентное фокусное расстояние объектива, мм	157
Длина зрительной трубы, мм	105
Наименьшее расстояние визирования, м	1,2
Цена деления:	
лимба, мин	10
уровня при алидаде, с/2 мм	45
Высота теодолита, мм:	
общая	220
до горизонтальной оси	175
Масса теодолита (штатива), кг	2,2(3,8)

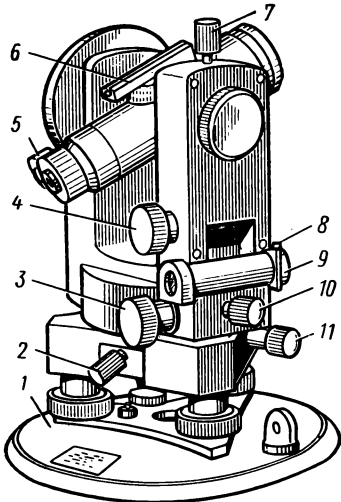


Рис. III.1. Общий вид теодолита Т30:

1 — дно футляра; 2 — закрепительный винт горизонтального круга; 3 и 4 — винты наводящего устройства горизонтального круга и зрительной трубы; 5 — окуляр отсчетного микроскопа; 6 — оптический визир; 7 — винт закрепительного устройства зрительной трубы; 8 — юстировочный винт цилиндрического уровня; 9 — цилиндрический уровень; 10 — винт закрепительного устройства алидады горизонтального круга; 11 — винт наводящего устройства горизонтального круга

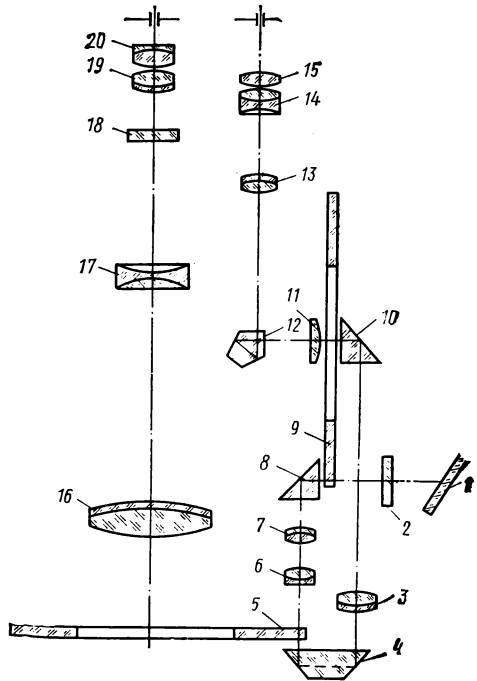


Рис. III.2. Оптическая схема теодолита Т30:

1 — зеркало; 2 — матовое стекло; 3, 6, 7, 13 — линзы объектива отсчетной системы; 4 — призма; 5 — горизонтальный круг; 8, 10 — призмы; 9 — вертикальный круг; 11 — коллектив-сетка; 12 — пентапризма; 14, 15 — линзы окуляра оптической системы; 16 — объектив зрительной трубы; 17 — фокусирующая линза зрительной трубы; 18 — сетка; 19, 20 — линзы окуляра зрительной трубы

Зрительная труба теодолита (рис. III.2) астрономическая, с внутренней фокусировкой, может использоваться как оптический центр. В этом случае ее устанавливают вертикально объективом вниз и визируют на точку через отверстие в полой вертикальной оси.

Отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам производят с точностью до одной минуты с помощью индекса по одному концу диаметра лимба (рис. III.3).

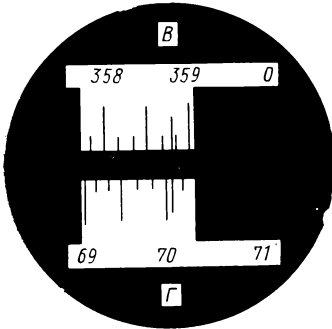


Рис. III.3. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т30:

отсчет по горизонтальному кругу (Г) $70^{\circ}03'$; по вертикальному (В) $338^{\circ}48'$

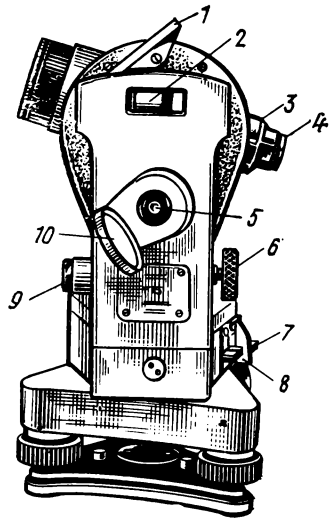


Рис. III.4. Общий вид теодолита Т15:

1, 10 — зеркала; 2 — окно уровня; 3 — колпачок; 4 — диоптрийное кольцо; 5 — иллюминатор; 6 — водоотталкивающее устройство; 7 — клавиша; 8 — закрепительное устройство; 9 — окуляр оптического центра

Горизонтальные углы измеряют обычным способом. Перед отсчетом по вертикальному кругу необходимо следить за тем, чтобы пузырек уровня при алидаде горизонтального круга был на середине.

Вертикальные углы измеряют: при обоих положениях зрительной трубы —

$$\nu = (Л - П - 180^{\circ})/2;$$

при одном (Л или П) положении зрительной трубы —

$$МО = (Л + П + 180^{\circ})/2; \nu = Л - МО; \nu = МО - П - 180^{\circ},$$

где Л и П — отсчеты при вертикальном круге слева и справа; МО — место нуля вертикального круга.

При вычислении углов наклона по данным формулам к отсчету Л или П, меньшему 90° , прибавляют 360° .

Например, при $Л = 1^{\circ}40'$ и $П = 178^{\circ}16'$ угол наклона $\nu = (1^{\circ}40' + 360^{\circ} - 178^{\circ}16' - 180^{\circ})/2 = 1^{\circ}42''$; место нуля $МО = (1^{\circ}40' + 360^{\circ} + 178^{\circ}16' + 180^{\circ})/2 = -2'$.
Проверка: $\nu = 1^{\circ}40' - (-2') = 1^{\circ}42''$; $\nu = -2' - 178^{\circ}16' + 180^{\circ} = 1^{\circ}42''$.

Измерение углов наклона удобнее выполнять, когда значение MO близко к нулю. Если значение MO необходимо уменьшить, на вертикальном круге устанавливают отсчет $L - MO$ и затем с помощью юстировочных винтов сетки нитей смещают ее до тех пор, пока перекрестие не совпадет с точкой, на которую визировали при определении MO .

Для определения расстояния L между теодолитом и рейкой с помощью нитяного дальномера обычно применяют формулу

$$L = (Kb + c) \cos^2 \alpha,$$

где b — разность отсчетов по рейке.

Для теодолита Т30 коэффициент дальномера $K = 100 \pm 0,5\%$, а постоянное слагаемое $c = 0$.

ТЕОДОЛИТ Т15 (рис. III.4) — оптический шкаловый теодолит повторительного типа с односторонней системой отсчета по лимбу. Он предназначен для измерения вертикальных и горизонтальных углов с точностью порядка $10-15''$, измерения расстояний по нитяному дальномеру и дальномерными насадками ДНР-06 и ДДЗ, нивелирования горизонтальным лучом визирования с помощью уровня УТ20-Т2 при трубе, определения магнитных азимутов. Технические данные теодолита Т15 приведены ниже:

Увеличение зрительной трубы, крат	25
Посадочный диаметр объектива, мм	46
Диаметр объектива, мм	34
Эквивалентное фокусное расстояние объектива, мм	200
Длина зрительной трубы, мм	154
Наименьшее расстояние визирования, м	1,2
Цена деления:	
лимба	1°
шкалы микрометра, мин	1
уровня при алидаде, $c/2$ мм	45
уровня при вертикальном круге, $c/2$ мм	30
Высота теодолита, мм:	
общая	260
до горизонтальной оси	210
Масса теодолита (штатива), кг	3,1(5,3)

Зрительная труба теодолита Т15 прямая, астрономическая, с внутренней фокусировкой, состоит из объектива, выполненного из трех линз, отрицательного фокусирующего двухлинзового компонента, сетки нитей с дальномерными штрихами и симметричного окуляра. Вертикальная ось теодолита полая с опорой на подшипник в нижней части. Полость внутри оси использована для оптического центрира, окулярная часть которого расположена на алидаде. Увеличение оптического центрира $2,5\times$, пределы работы $0,8-2,0$ м.

На рис. III.5 показана оптическая схема отсчетной системы теодолита Т15. Для отсчитывания по лимбу применяют шкаловый микроскоп, в поле зрения которого видны одновременно изображения штрихов обоих угломерных кругов (рис. III.6). Угломерные круги разделены через 1° , и каждый штрих оцифрован. Шкалы микроскопа содержат по 60 основных делений и по 2 дополнительных. Деления размещены в нижней и верхней половинах поля зрения мик-

роскопа. Подписи делений шкалы возрастают в направлении, обратном возрастанию подписей делений лимба. Цена деления шкалы $1'$, доли деления отсчитываются на глаз с точностью порядка $0,1'$. Отсчитывание производится только по одной стороне лимба по гра-дусному штриху.

При измерении углов наклона необходимо пузырьки уровня при алидаде вертикального круга привести в нуль-пункт. Углы наклона вычисляют по тем же формулам, что и для теодолита Т30.

ТЕОДОЛИТ Т15К — выпускается двух типов: повторительного и неповторительного. Он имеет в основном те же технические характеристики, что и теодолит Т15, но более высокопроизводителен благодаря самоустанавливающемуся оптическому компенсатору, который заменяет уровень при алидаде вертикального круга.

Принцип действия компенсатора основан на том, что призма, установленная на маятниковом подвесе, под действием силы тяжести стремится занять отвесное положение, компенсируя этим ошибку установки теодолита. Кроме того, зрительная труба прямого изображения позволяет быстрее найти визирную цель и исключает возможность ошибки определения цели, а секторная оцифровка вертикального круга сокращает объем вычислений при измерениях углов.

В Т15К основное положение вертикального круга — слева от наблюдателя. В этом случае при измерениях угла наклона угол имеет положительное значение, если цель выше горизонта, и отрицательное, — если цель ниже горизонта.

Для отсчитывания по вертикальному кругу (рис. III.7) шкала микроскопа имеет две оцифровки: верхняя — для отсчитывания положительных углов, когда в ее пределах находится штрих вертикального круга, не имеющий знака перед цифрой, и нижняя — для

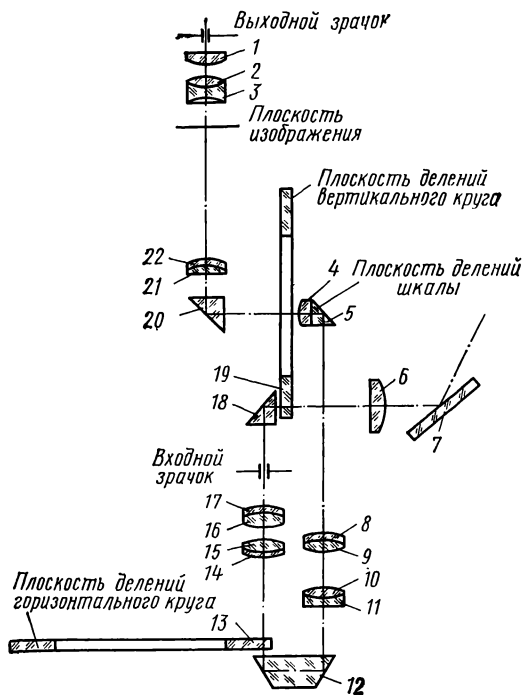


Рис. III.5. Оптическая схема отсчетной системы теодолита Т15:

1—3 — окуляры отсчетного микроскопа; 4 — коллектив с наклонной шкалой; 5, 12, 18, 20 — призмы; 6 — линза Френеля; 7 — зеркало; 8—11 — система объектива горизонтального круга; 13 и 19 — горизонтальный и вертикальный круги; 14—17 — система объектива вертикального круга; 21, 22 — объективы

отсчитывания отрицательных углов, когда в пределах шкалы расположен штрих, имеющий перед цифрой знак минус. Углы наклона вычисляют по формулам $v = (Л - П) / 2$; $v = Л - МО$; $v = МО + П$. Коэффициент нитяного дальномера теодолита Т15К равен $K = 100$, постоянное слагаемое $c = 0$.

Поверки теодолитов. При работе с теодолитами необходимо периодически, а также каждый раз после транспортировки выполнять проверки правильности работы его отдельных узлов.

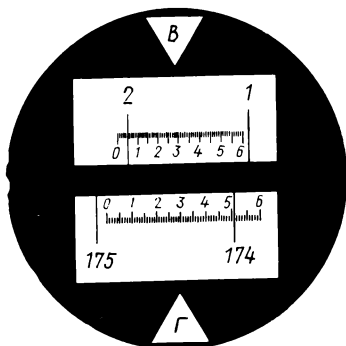


Рис. III.6. Поле зрения счетного микроскопа теодолита Т15: отсчет по горизонтальному кругу (Г) $174^{\circ}55,0'$; по вертикальному (В) $2^{\circ}05,2'$

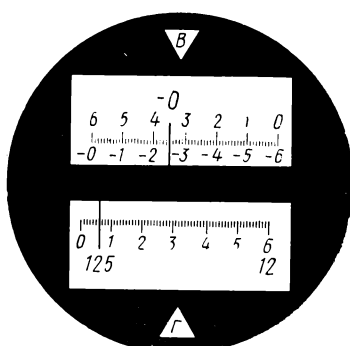


Рис. III.7. Поле зрения счетного микроскопа Т15К: отсчет по горизонтальному кругу (Г) $125^{\circ}05,2'$; по вертикальному (В) $0^{\circ}24,8'$

1. *Ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента.* При выполнении этой проверки уровень устанавливают по направлению двух подъемных винтов и, вращая их в различные стороны, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. Поворачивают алидаду на 180° . Если пузырек уровня отклонится от нуль-пункта больше, чем на одно деление, то выполняют юстировку юстировочными винтами уровня на половину дуги отклонения и двумя подъемными винтами выводят пузырек уровня в нуль-пункт. После этого алидаду поворачивают на 90° и третьим подъемным винтом приводят уровень на середину. При необходимости проверку повторяют. Поставленное условие считается выполненным, если при поворотах алидады по азимуту пузырек будет оставаться в нуль-пункте или отклонится не более, чем на одно деление. При выполнении последующих проверок вертикальную ось инструмента приводят в отвесное положение по отъюстированному уровню.

2. *Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна горизонтальной оси вращения трубы.* Несоблюдение этого условия влечет за собой *коллимационную ошибку*, под которой понимается угол между визирной осью и перпендикуляром к оси вращения зрительной трубы. Зрительную трубу при горизонтальном по-

ложении наводят на какой-нибудь удаленный предмет и берут отсчет L_1 по горизонтальному кругу, затем переводят трубу через зенит, наводят на ту же точку и берут отсчет P_1 .

Так как теодолиты Т15 и Т30 имеют одностороннюю систему отсчитывания, то для исключения эксцентриситета горизонтального круга необходимо взять еще два отсчета P_2 и L_2 , предварительно повернув алидаду на 180° .

Двойная коллимационная ошибка

$$2c = [(P_1 - L_1 \pm 180^\circ) + (P_2 - L_2 \pm 180^\circ)]/2.$$

Если значение двойной коллимационной ошибки превышает двойное значение ошибки отсчета по шкале микроскопа, то ее исправляют. В этом случае вычисляют среднее значение из отсчетов, полученных при двух положениях вертикального круга. Вращением винта наводящего устройства алидады устанавливают вычисленный отсчет ($2c$) и смотрят в трубу: перекрестие сетки нитей сместилось с наблюдаемой точки. Тогда боковыми юстировочными винтами сетки нитей наводят центральное перекрестие на точку. Затем поверку повторяют вновь до тех пор, пока коллимационная ошибка не будет превышать двойной точности прибора.

3. *Ось вращения трубы должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента.* Для проверки этого условия теодолит устанавливают на расстоянии 10—20 м от какого-либо высокого предмета, в верхней части которого выбирают точку; на нее наводят зрительную трубу. После этого опускают трубу вниз, отмечают на предмете проекцию этой точки и получают вторую проекцию этой же точки, предварительно перевернув зрительную трубу через зенит. Если проекции точки не совпадают менее, чем на ширину биссектора сетки нитей, то условие считается выполненным. В противном случае для юстировки инструмент сдают в специальные мастерские.

4. *Вертикальный штрих сетки нитей при вертикальном положении оси вращения теодолита должен занимать отвесное положение.* Установив вертикальную ось вращения теодолита в отвесное положение, наводят центр сетки нитей на какую-нибудь точку и вращают трубу вокруг ее горизонтальной оси. Если при этом вертикальный штрих сетки нитей не сходит с изображения точки, то условие считается выполненным. Если изображение точки смещается больше, чем на треть величины биссектора, то сетку нитей необходимо развернуть. При юстировке необходимо снять колпачок, закрывающий юстировочные винты сетки, слегка ослабить винты, скрепляющие окуляр с корпусом трубы, и развернуть окуляр вместе с сеткой нитей. После исправления поверку повторяют.

5. *Ось цилиндрического уровня, укрепленного на зрительной трубе, должна быть параллельна ее визирной оси.* Соблюдение этого условия позволяет правильно определить превышение при выполнении геометрического нивелирования с помощью оптических теодолитов, поэтому эта проверка аналогична проверке основного геометрического условия нивелира.

§ III.2. КОДОВЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

Теодолиты, содержащие преобразователь «угол — код», называются *кодowymi*. Они позволяют частично автоматизировать процесс угловых измерений. По степени автоматизации их можно условно разделить на две группы: 1) теодолиты с фотографической регистрацией; 2) теодолиты, позволяющие получать результаты измерений на цифровое табло или в виде кода во время наблюдений.

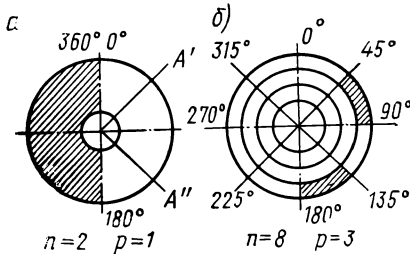


Рис. III.8. Кодовые диски:
а — разделенный на две части; б — с
кодowymi дорожками

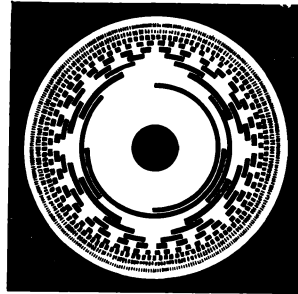


Рис. III.9. Кодовый диск
11-разрядного ($10'$) преобразователя «угол — код»

В кодовых теодолитах используют не традиционную систему деления угломерных кругов на градусы или грады, а такую систему обозначений, чтобы число знаков для передачи информации было наименьшим и чтобы получаемую информацию можно было ввести в автоматическое вычислительное устройство. Например, угол может быть представлен в двоичном коде исчислений: при этом лимб делят на чередующиеся равные черные и белые полосы, соответствующие двум знакам двоичного кода (0 и 1). При просвечивании такого лимба возникают только два сигнала, которые автоматически принимают и передают для дальнейшей обработки с помощью фотозлектрического устройства. В простейшем случае (рис. III.8, а) ошибка в определении направления может достигать 180° .

Для повышения точности на лимбе делают кодовые дорожки в виде кольца из чередующихся прозрачных и непрозрачных полей, причем на каждой дорожке число полей удваивают (рис. III.8, б). Имея лимб с двадцатью кодовыми дорожками, получают цену деления меньшего разряда (двадцатой кодовой дорожки), близкую к $1''$, т. е. $\Delta = 360^\circ / 2^{20} \approx 1,2''$.

Для записи значения направления в двоичном коде с такой точностью потребуется 20 двоичных знаков.

В кодовых теодолитах используют и другие методы кодирования лимбов, при которых обозначают отдельные участки лимба кодовыми комбинациями, расположенными по окружности.

При разработке кодовых лимбов (кодовых масок) возникают трудности, зависящие от конструирования и технологии. Обычно из-за конструкторских ограничений диаметр кодовой дорожки младшего разряда не превышает 400 мм, а минимальный интервал делений не может быть меньше нескольких мкм, что обусловлено шириной щели для считывания информации. Поэтому кодовые лимбы с 20 разрядами изготовить очень сложно.

В качестве примера на рис. III.9 показан 11-разрядный (10') кодовый диск, установленный в фотоэлектрическом преобразователе «угол — код» ФП11В, разработанном в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) [24].

Кодовый диск представляет собой стеклянный круг, по конструкции не отличающийся от стеклянных лимбов, на который нанесена кодовая маска в виде концентрических кодовых дорожек с прозрачными и непрозрачными зонами. Рисунок кодовой маски отображает принятый в преобразователе цифровой код, который считывается с помощью фотоэлементов (рис. III.10). Для уменьшения влияния эксцентриситета изображение одной половины кодового диска совмещают с изображением другой, диаметрально противоположной. Совмещение достигается при помощи оптической системы с увеличением, равным единице.

Для уменьшения числа делений кодового теодолита применяют устройства, позволяющие считывать порядковый номер интервала, а также измерять часть интервала. Для измерения части интервала его заполняют гармоническими колебаниями или импульсами с частотой, соответствующей требуемой ошибке Δ . Значение измеряемого направления получают, подсчитывая число целых интервалов и прибавляя число квантующих импульсов, соответствующих части интервала, или измеряя фазу колебаний, по которой вычисляют величину части интервала.

Высокую точность угловых измерений можно получить без кодового диска [10], используя строгую зависимость между углом поворота α и временем τ при условии, что угловая скорость ω (рад/с) постоянна:

$$\alpha = \omega\tau. \quad (\text{III. 1})$$

При этом методе в углоизмерительном устройстве задается опорное направление с помощью фотоприемника, связанного с основанием теодолита, и источника света, вращающегося с постоян-

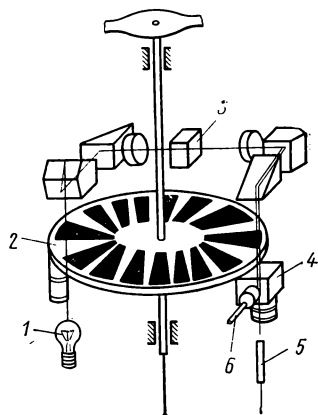


Рис. III.10. Схема считывающего фотоэлектрического устройства:

1 — источник света; 2 — кодовый диск; 3 — поляризующая призма Воллстона; 4 — разделительный блок; 5 и 6 — фотоэлементы

ной угловой скоростью. Другой фотоприемник жестко связан со зрительной трубой теодолита (рис. III.11). За один оборот сигнал от источника света попадает через щель на опорный фотоприемник и фотоприемник, жестко связанный со зрительной трубой. Временной интервал τ между двумя импульсами, регистрируемыми на выходе фотоприемников, прямо пропорционален измеряемому углу α .

Для получения высокой точности угловых измерений необходимо измерять время с относительной ошибкой не более 10^{-6} .

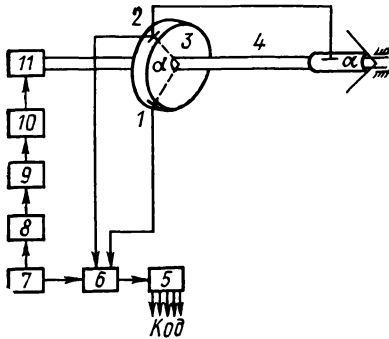


Рис. III.11. Схема аналого-цифрового преобразователя «угол — время — код»:

α — измеряемый угол; 1 и 2 — стартовый и стоповый датчики; 3 — задатчик; 4 — вал; 5 — счетчик импульсов; 6 — схема совпадения; 7 — генератор импульсов; 8 — делитель; 9 — фильтр; 10 — усилитель мощности; 11 — электродвигатель

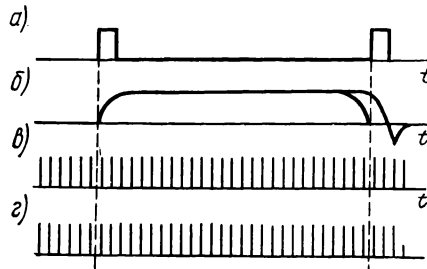


Рис. III.12. Сигналы преобразователя временного интервала в код:

a) — от опорного фотоприемника и сигнала фотоприемника, скрепленного со зрительной трубой теодолита; б) — составные триггера; в) — квантующие импульсы; г) — импульсы на входе счетчика

Оценим величину ошибки измерения угла при условии, что относительная ошибка измерения времени $\Delta\tau/\tau=10^{-6}$. Из (III.1) можно получить, что

$$\Delta\alpha = \alpha\Delta\tau/\tau. \quad (III.2)$$

Подставляя в (III.2) значения $\alpha=360^\circ=1\,296\,000''$ и $\Delta\tau/\tau=10^{-6}$, получим $\Delta\alpha \approx 1,3''$.

Для обеспечения такой высокой точности измерения времени преобразуют временной интервал в код (рис. III.12). При этом *старт-импульс* от опорного фотоприемника поступает на триггер T и устанавливает его в такое положение, чтобы управляемый им вентиль B был открыт (рис. III.13). На счетчик начинают поступать импульсы от кварцевого генератора $ГИ$. Счетчик работает до тех пор, пока *стоп-импульс* от фотоприемника, связанного со зрительной трубой, не закроет вентиль B . Число подсчитанных импульсов прямо пропорционально измеряемому временному интервалу τ , а следовательно, и углу α .

После подсчета числа импульсов показания счетчика могут быть выданы на цифровой индикатор или введены в запоминающее устройство ЭВМ. Чем больше частота вращения n , тем выше частота квантуемых импульсов

$$f_{кв} = 2\pi n / \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ — цена квантуемого импульса (угол, соответствующий одному квантуемому импульсу).

Например, при частоте вращения $n = 50 \text{ с}^{-1}$ и $\Delta\varphi = 1''$ частота $f_{кв} = 360 \cdot 60 \times 60'' \cdot 50 \text{ с}^{-1} / 1'' = 65 \text{ МГц}$.

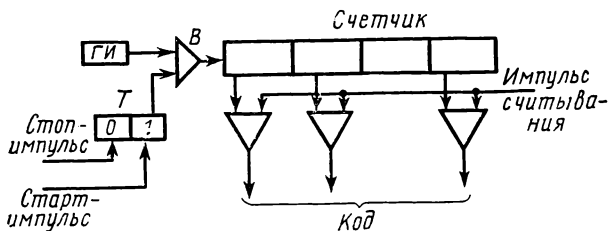


Рис. III.13. Схема преобразователя временного интервала в код

При этом методе измерений должна обеспечиваться высокая стабильность угловой скорости вращения. Эта задача решается путем использования синхронных многополюсных электродвигателей, частота питания которых стабилизирована от кварцевого генератора. Угловая скорость может поддерживаться с ошибкой 10^{-5} [8].

Кодовые теодолиты, разработанные в СССР и за рубежом, не позволяют полностью автоматизировать весь процесс измерений, так как операции, связанные с установкой теодолита в рабочее положение и с поиском цели и наведением на цель, выполняются наблюдателем.

Вместе с тем считается, что наиболее серьезные затруднения связаны именно с автоматизацией установки осей углоизмерительного инструмента и еще больше — с автоматизацией наведения на цель в случае ее произвольного положения в пространстве. Однако даже частичная автоматизация измерений позволяет улучшить результаты путем повышения числа измерений за короткий промежуток времени, что ведет к ослаблению влияния случайных ошибок. Кроме того, уменьшается влияние личных ошибок на результаты измерений.

Результаты измерений у кодовых теодолитов регистрируют в соответствующем коде на фотопленку, перфоленку, перфокарту или магнитную ленту. Указанные носители информации можно использовать для ввода в электронную вычислительную машину. Так как при работе с кодовыми теодолитами отпадает необходимость брать отсчеты и вести полевой журнал, то процесс полевых измерений оказывается менее трудоемким и более достоверным, менее утоми-

тельным и более объективным, чем процесс измерения с **обычными** теодолитами.

Автоматизированный углоизмерительный комплекс **обычно** включает в себя углоизмерительный прибор с преобразованием информации к виду, удобному для машинной обработки, и вычислительную машину. Использование кодового теодолита без ЭВМ нецелесообразно, так как требуется расшифровка закодированных результатов измерений и составление варианта **обычного** полевого журнала.

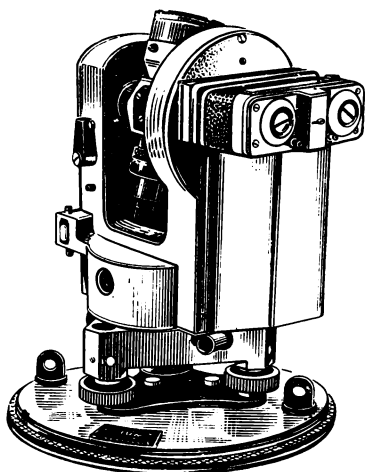


Рис. III.14. Кодовый теодолит ТК с фотографической регистрацией

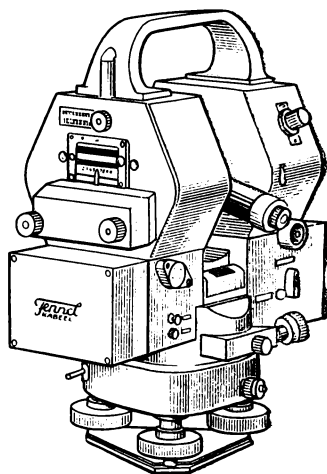


Рис. III.15. Кодовый теодолит FLT3K с фотографической регистрацией

ТЕОДОЛИТ ТК (рис. III.14) — кодовый, с фотографической регистрацией, разработан в СССР и отличается относительно **низкой** стоимостью. Он предназначен для измерения углов в теодолитных и тахеометрических ходах при создании съемочных сетей. **Основные** технические характеристики теодолита ТК:

Увеличение зрительной трубы, крат	25
Угол поля зрения	1°30'
Коэффициент нитяного дальномера	100
Диаметры вертикального и горизонтального кругов, мм	90
Увеличение проекционной системы кругов, крат	17

В теодолите применены угломерные круги, на каждом из **которых** нанесены две штриховые кодовые дорожки. На одной из них — дорожке грубого отсчета — нанесены 399 штрихов с интервалами 1^с00^с25^с, а на другой — дорожке точного отсчета — 400 штрихов с интервалом в 1^с. Нулевые штрихи расположены один над другим по радиусу делительной окружности. Диаметрально **противоположные** участки круга при помощи оптического моста совмещают-

ся, что позволяет исключить ошибку эксцентриситета и значительно повысить точность измерений.

Совмещенные изображения рабочих участков с кодовой маской проецируются в фокальную плоскость фоторегистратора, в окне диафрагмы которого расположен масштабный элемент (тактовая дорожка), состоящая из 400 чередующихся прозрачных и непрозрачных полос.

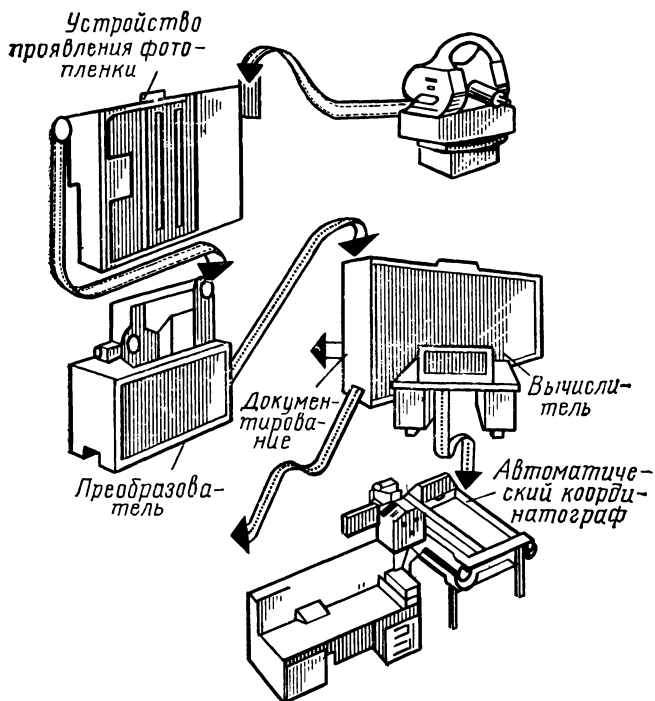


Рис. III.16. Схема процессов регистрации и обработки измерительной информации

Декодирование фотопленки с результатами измерений производится при помощи считывателя фильмов СФ-400 или вручную при наличии инструментального микроскопа.

ТЕОДОЛИТ FLTЗК (рис. III.15) — кодовый теодолит секундной точности, с фотографической регистрацией, разработан фирмой «Феннель» (ФРГ). Результаты полевых измерений, зафиксированных на 35-миллиметровую фотопленку, обрабатывают в вычислительном центре. Кассета теодолита содержит 10 м пленки, на которой делается 600 записей. После проявления пленку подают на вход преобразователя Z84 (рис. III.16), который автоматически считывает информацию с ленты со скоростью 80 записей в минуту. Одновременно преобразователь Z84 записывает информацию на перфо-

ленту. Затем перфоленту закладывают в вычислитель Z23, где код преобразователя Z84 преобразуется в код вычислителя Z23. С помощью вычислителя Z23 усредняются измеренные величины и обрабатывается полигон. В результате вычислений получают каталог координат точек полигона как в десятичной системе, так и на перфоленте. В свою очередь перфолента подается на вход автоматического координатографа.

В кодовом тахеометре фирмы Керн (Швейцария) также используют фотографическую регистрацию результатов. Он предназначен для съемки ситуации полярным способом и позволяет регистрировать все необходимые элементы в один прием. Дешифрирование фильма также выполняют с помощью преобразователя Z84.

Труба тахеометра подобна трубе редуccionного дальномера двойного изображения с вращающимися оптическими клиньями, позволяющими измерять параллактический угол на дальномерную рейку. Оправа клиньев соединена с диском, на который нанесен код, подобный коду лимба.

Горизонтальная рейка имеет три базиса: 60, 260 и 1000 мм, позволяющие измерять расстояния 2,5—150 м.

Во время измерений на фотопленке регистрируются цифровая и аналоговая информации для горизонтального и вертикального направлений, параллактического угла, а также тактовая дорожка, характеристика станции и длина используемого базиса.

Существенные недостатки кодовых теодолитов с фотографической регистрацией — отсутствие контроля измерений непосредственно в поле, сложность и громоздкость аппаратуры для камеральной обработки, задержка в получении окончательного результата, связанная с проявлением пленки. Кодовые теодолиты с фотоэлектрической регистрацией угла лишены указанных недостатков. Они позволяют преобразовывать значение угла в электрические сигналы в реальном масштабе времени. Для этой цели используют аналого-цифровые преобразователи *угол — код*, рассмотренные в начале данного параграфа.

ТЕОДОЛИТ КО-В1 — кодовый, с фотоэлектрической регистрацией угла, разработан фирмой МОМ (Венгрия). Отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам производятся автоматически, измеренные величины можно фиксировать на перфоленту, цифрпечатать или передавать в телеграфную сеть. При наблюдении неподвижных целей регистрируют одиночные отсчеты, либо серии, состоящие из двух, трех или пяти отсчетов. Помимо регистрации значений горизонтальных и вертикальных углов, на перфоленту вносятся с помощью специального устройства данные о станции. Время, необходимое для одной регистрации, составляет 0,2 с.

Величину измеряемого угла (направления) можно получить и визуально с цифрового индикатора, который имеет семь ламп. Первые три индикатора высвечивают градусы, четвертый — десятки минут и три последних — сотни, десятки и единицы секунд десятиминутного интервала. Технические данные кодового теодолита КО-В1 приведены ниже:

Увеличение зрительной трубы, крат	36
Наименьшее расстояние визирования, м	2,5
Среднеквадратическая ошибка однократно измеренного угла, с:	
горизонтального	0,7
вертикального	1,0
Температурный диапазон работы прибора, °С	-15 ÷ +50
Масса теодолита (полного комплекта в транспортном ящике), кг	12,5 (21,5)
Масса блока питания нетто (брутто), кг	13,5 (21)
Потребляемая мощность, Вт	70
Напряжение питания, В	12

Электронные тахеометры. Наибольшая автоматизация процессов полевых измерений достигается при использовании электронных тахеометров, представляющих собой кодовые теодолиты, конструктивно объединенные со светодальномерами. Они измеряют и автоматически регистрируют горизонтальные, зенитные и наклонные расстояния. Электронные тахеометры можно использовать для съемки участков, сгущения опорных сетей, а также при инженерных изысканиях в промышленном и гражданском строительстве.

ТАХЕОМЕТР «Рег-Эльта 14» (рис. III.17) был создан в ФРГ фирмой «Оптон» в 1968 г. [18]. Источником излучения в этом приборе является светодиод арсенида галлия, благодаря которому конструкция светодальномерной части весьма компактна. В комплект тахеометра входят собственно тахеометр, перфоратор для ленты с источником питания и уголковые отражатели. Технические характеристики электронного тахеометра «Рег-Эльта 14» приведены ниже:

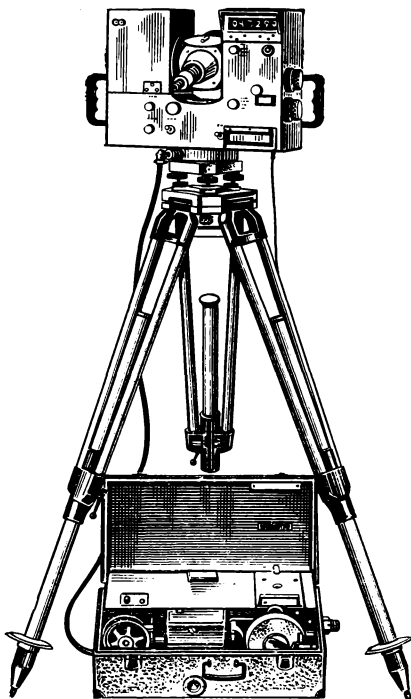


Рис. III.17. Электронный тахеометр «Рег-Эльта 14»

Увеличение зрительной трубы, крат	25
Диаметр входного отверстия, мм	35
Наименьшее расстояние визирования, м	3
Дальность действия, м	2000
Источник излучения	светодиод арсенида галлия
Ошибка:	
однократно измеренного расстояния, мм	5—10
измерения угла горизонтального, с	3
измерения угла вертикального, с	5
Масса приемопередатчика, кг	20

ТАХЕОМЕТР Геодиметр 700 (рис. III.18) позволяет автоматически измерять расстояния до 5 км и углы. Он состоит из приемопередатчика, блока электроники и перфоратора. Для расстояния до 100 м можно использовать отражающую фольгу, до 500 м — рефlector из пластика, до 1700 м — одну отражающую призму и до 5000 м — шесть призм.

Счетчик электронного тахеометра имеет три программы, в зависимости от которых на цифровом индикаторе высвечиваются результаты: 1) горизонтального и вертикального углов; 2) вертикального угла и наклонного расстояния; 3) горизонтального угла и горизонтального расстояния до 500 м. (Практика показала, что при съемках полярным способом и выполнении разбивочных работ расстояния более 500 м измеряются крайне редко, так как при больших расстояниях наблюдатель, стоящий у инструмента, теряет обзор местности).

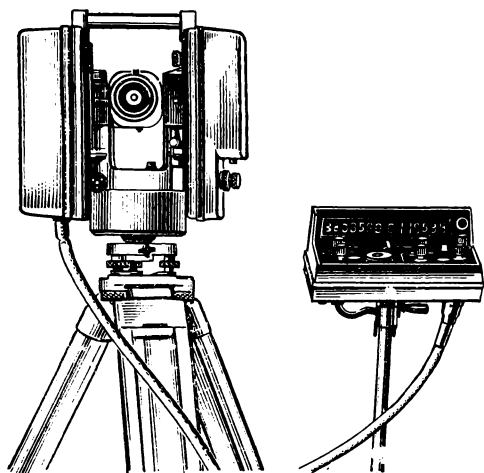


Рис. III.18. Электронный тахеометр «Геодиметр 700»

При изготовлении счетное устройство прибора можно отградуировать так, чтобы угловые величины были либо градусными, либо

градусными, а расстояние — либо в метрах, либо в футах.

Электронные блоки выполняют в виде панелей с печатными и интегральными схемами. Благодаря этому можно легко проводить контроль и заменять электронные узлы. Питание прибора осуществляется от свинцового аккумулятора 12—6В, обеспечивающего приблизительно 300 измерений. Технические характеристики электронного тахеометра Геодиметр 700 приведены ниже:

Увеличение зрительной трубы, крат	30
Диаметр входного отверстия, мм	60
Наименьшее расстояние визирования, м	1,7
Дальность действия, км	до 5
Источник излучения	Ge-Ne-лазер
Ошибка:	
однократно измеренного расстояния L	$5 \text{ мм} + 10^{-6} L$
измерения горизонтального угла, градусные с	$10^{\circ\text{с}}$
измерения вертикального угла, градусные с	$5^{\circ\text{с}}$
Масса приемопередатчика, кг	14,2

Как показал опыт работ, применение электронных тахеометров оправдано в техническом и экономическом отношениях. В частности, при крупномасштабных съемках четырех объектов прибором «Рег-Эльта 14» можно одновременно со съемкой определять положение пунктов съемочного обоснования.

По сравнению со съемкой обычным тахеометром производительность полевых работ повышается примерно на 15%. Однако из-за значительной стоимости тахеометра «Рег-Эльта 14» желательно организовать работу так, чтобы инструмент был максимально загружен (например, проводить работу в две-три смены).

Недостатки прибора — большая масса, недостаточная емкость аккумуляторов, периодические неполадки в работе перфорирующего устройства, необходимость наведения на отражатель.

Производительность измерений электронным тахеометром зависит от снимаемой местности и степени подготовки оператора. Например, при съемке сложной местности (обрыва, деревьев, построек) можно определить за день 250 точек, на открытой местности — 100 точек за час, на строительной площадке — 260 точек за три часа.

Для повышения производительности работ при съемке предлагается использовать сборные вышки высотой 4—10 м для установки инструмента и сборные рейки высотой до 7,5 м, снабженные трехгранными призмами в качестве цели для визирования (масса рейки 3 кг). Измеренные данные и кодовые обозначения автоматически регистрируются на табло тахеометра и переносятся на перфоленгу, которую можно ввести в ЭВМ для дальнейшей обработки. Работа тахеометра «Рег-Эльта 14» была проверена на большом количестве контрольных съемок, выполненных в густо застроенных районах. Средние квадратические ошибки определения углов зданий составляют $\pm 1,8$ см (при использовании обычного редуцированного тахеометра $\pm 2,3$ см). Стоимость полевых работ сокращается на $\frac{1}{3}$ несмотря на то, что использование электронного тахеометра в течение 8 ч обходится в 11 раз дороже использования обычного редуцированного тахеометра. Трудовые затраты на камеральную обработку данных по сравнению с обычными методами сокращаются на 73%, а стоимость — на 51%. Значительное сокращение затрат на камеральную обработку данных, измеренных «Рег-Эльта 14», практически уравнивает электронную тахеометрическую съемку с фотограмметрической, которая рентабельнее при составлении карт на большие районы.

§ III.3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При решении ряда практических задач требуется непрерывно определять либо угловые координаты движущегося объекта, либо в течение длительного времени угловые координаты неподвижного объекта. Использование кодовых теодолитов или электронных тахеометров для этих целей практически невозможно, так как при наведении на подвижный объект возникают значительные личные ошибки, а непрерывное длительное наблюдение объекта очень трудоемко.

Для решения подобных задач созданы лазерные сканирующие теодолиты. Реальная возможность их создания [6] связана с разра-

боткой лазеров, обеспечивающих высокую угловую разрешающую способность.

Лазерные сканирующие теодолиты позволяют автоматически осуществлять ряд операций, включая регистрацию, обработку результатов измерений, поиск цели и наведение на нее. В результате этого скорость измерений достигает нескольких сотен в секунду и практически не зависит от числа наблюдаемых целей.

Наиболее простыми являются углоизмерительные устройства, в которых используются методы угловых измерений, основанные на сканировании пучком лазерного излучения.

Лазерный пучок необходимо развертывать по известному закону в пространстве измерений. В результате развертки облучаются визирные цели, на которых установлены отражатели. Отраженные световые сигналы принимаются с помощью фотоприемников. Изменяя время между световыми импульсами, отраженными от визирных целей, и зная закон сканирования, определяют угол между соответствующими направлениями из центра сканирования на визирные цели:

$$\alpha = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt, \quad (III.3)$$

где $\omega(t) = \omega$ — угловая скорость сканирования, рад/с; t_1 и t_2 — время, соответствующее моменту приема сигналов соответственно от первой и второй визирных целей, с.

Для упрощения аппаратуры сканирование лазерным пучком осуществляют по периодическому закону

$$\omega(t) = \omega(t + T), \quad (III.4)$$

где T — период сканирования.

Выбор того или иного закона сканирования зависит от конкретных условий поставленной задачи, а также от простоты реализации выбранного закона сканирования, позволяющего сравнительно легко осуществлять переход от измеренных временных интервалов к определенным углам без использования ЭВМ.

При линейном законе сканирования угол

$$\alpha = \omega\tau, \quad (III.5)$$

где τ — временный интервал между отраженными от визирных целей импульсами, мкс.

В связи с тем что расстояния до визирных целей, как правило, различны, при измерениях угла возникают искажения, вызываемые запаздыванием светового сигнала на трассе. Обычно начальное (опорное) направление задается в приборе и, следовательно, расстояние до цели во много раз превышает опорное.

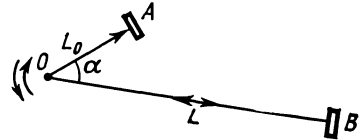
Действительно, если путь $AO = L_0$ лазерного пучка (рис. III.19) не равен пути $OB = L$, то значение угла, полученное согласно (III.5), будет искажено:

$$\vec{\alpha}_1 = \vec{\omega}_1 \vec{\tau}_1 = \vec{\omega}_1 (\vec{\tau}_{01} - L_0/v + 2L/v), \quad (III.6)$$

где $\vec{\alpha}_1$ — значение угла, полученное при сканировании лазерным пучком по часовой стрелке; $\vec{\omega}_1$ — угловая скорость сканирования; $\vec{\tau}_1$ и $\vec{\tau}_{01}$ — временные интервалы, соответствующие измеряемому углу и измеряемому углу без учета времени запаздывания сигнала на трассе; L_0 и L — расстояния до опорного фотоприемника и до визирной цели (отражателя); v — скорость света.

Путь света до опорного фотоприемника, установленного в приборе, очень мал и не превышает 10—15 см. Следовательно, запаздывание сигнала по пути к опорному фотоприемнику мало и не превышает $0,5 \cdot 10^{-9}$ с. Принимая во внимание то обстоятельство, что

Рис. III.19. Измерение угла на основе сканирования лазерным пучком



точность измерения временного интервала обычно не превышает 10^{-8} с, запаздыванием сигнала в приборе можно пренебречь и, следовательно, выражение (III.6) можно представить в виде:

$$\vec{\alpha}_1 = \vec{\omega}_1(\vec{\tau}_{01} + 2L/v). \quad (\text{III.7})$$

При скорости сканирования $\vec{\omega}_2$ получим другое значение $\vec{\alpha}_2$ этого же угла:

$$\vec{\alpha}_2 = \vec{\omega}_2 \vec{\tau}_2 = \vec{\omega}_2(\vec{\tau}_{02} + 2L/v). \quad (\text{III.8})$$

Так как $\vec{\tau}_{01}$ и $\vec{\tau}_{02}$ — временные интервалы, соответствующие измеряемому углу без учета времени запаздывания, то

$$\vec{\omega}_1 \vec{\tau}_{01} = \vec{\omega}_2 \vec{\tau}_{02}. \quad (\text{III.9})$$

С учетом (III.7) — (III.9) получим

$$L = (\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2) v / [2(\vec{\omega}_1 - \vec{\omega}_2)] = (\vec{\omega}_1 \vec{\tau}_1 - \vec{\omega}_2 \vec{\tau}_2) v / [2/(\vec{\omega}_1 - \vec{\omega}_2)], \quad (\text{III.10})$$

а значение угла α найдем из выражения

$$\alpha = (\vec{\alpha}_2 \vec{\omega}_1 - \vec{\alpha}_1 \vec{\omega}_2) / (\vec{\omega}_1 - \vec{\omega}_2) = \{[\vec{\alpha}_1 + \vec{\alpha}_2 - (\vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2)] 2L/v\} / 2. \quad (\text{III.11})$$

При сканировании лазерным пучком против часовой стрелки будет измеряться дополнение угла α до 360° . Значение угла α , измеренного при вращении лазерного пучка против часовой стрелки, можно определить как

$$\vec{\alpha}_1 = 360^\circ - |\vec{\omega}| \vec{\tau} = 360^\circ - |\vec{\omega}| (\vec{\tau}_0 - 2L/v). \quad (\text{III.12})$$

Если сканирование осуществляется по часовой, а затем против часовой стрелки, то

$$L = (\vec{\alpha} - \vec{\alpha}) v / [2(\vec{\omega} - \vec{\omega})]; \quad (\text{III.13})$$

$$\alpha = \{[\vec{\alpha} + \vec{\alpha} - (\vec{\omega} + \vec{\omega})] 2L/v\} / 2, \quad (\text{III.14})$$

В общем виде

$$L = (\alpha_1 - \alpha_2)v / [2(\omega_1 - \omega_2)]; \quad (III.15)$$

$$\alpha = [\alpha_1 + \alpha_2 - (\omega_1 + \omega_2)2L/v]/2. \quad (III.16)$$

Если измерения выполняют при одинаковых по модулю угловых скоростях сканирования, но в противоположных направлениях, т. е. $|\omega_1| = |\omega_2| = \omega$, то

$$L = (\alpha_1 - \alpha_2)v / (4\omega); \quad (III.17)$$

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2. \quad (III.18)$$

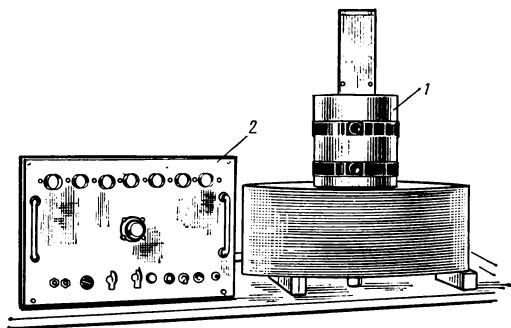


Рис. III.20. Лазерный сканирующий теодолит ЛСТ1:

а — приемопередатчик; 2 — блок индикации

Внешний вид углоизмерительного устройства, реализующего метод угловых измерений на основе кругового сканирования лазерным пучком, показан на рис. III.20, а его структурная схема — на рис. III.21.

Лазерный сканирующий теодолит работает следующим образом. Световой пучок от лазера 1 проходит оптическую систему, состоящую из сферической короткофокусной линзы 2 и длиннофокусной цилиндрической линзы 3, в результате чего приобретает веерообразную форму. Линза 3 жестко скреплена с передающим зеркалом 4, которое закреплено под углом 45° к оси вала электродвигателя 8. Для увеличения поля обзора цилиндрическая линза установлена относительно передающего зеркала 4 таким образом, чтобы отраженный от зеркала пучок имел больший угловой растр в вертикальной плоскости и меньший — в горизонтальной. При включении электродвигателя 8 в сеть зеркало 4 вращается с постоянной угловой скоростью ω , в результате чего с той же угловой скоростью разворачивается лазерный пучок в горизонтальной плоскости. Для по-

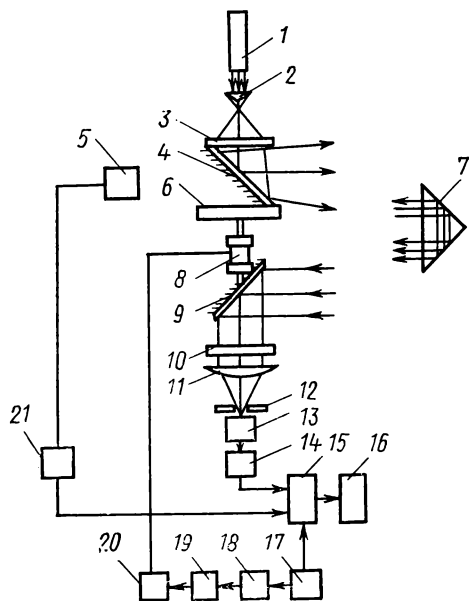


Рис. III.21. Схема лазерного сканирующего теодолита ЛСТ1

вышения стабильности угловой скорости развертки на валу электродвигателя укреплен маховик 6. В результате развертки лазерный пучок периодически попадает на отражатель 7, установленный на визирной цели, и опорный фотоприемник 5. Отраженные от визирной цели сигналы попадают на приемное зеркало 9, установленное на выходном конце вала электродвигателя таким образом, чтобы его поле зрения совпадало с полем зрения передающего зеркала.

Приемное устройство лазерного сканирующего теодолита состоит из сигнального фотоприемника 13, перед которым установлен интерференционный светофильтр 10, отсекающий световой фон и пропускающий полезный сигнал. За светофильтром 10 установлен объектив 11, в фокальной плоскости которого установлена диафрагма 12, ограничивающая мгновенное поле зрения приемника, что ведет к улучшению отношения сигнал/шум. Сигналы с выхода опорного и сигнального фотоприемников после усиления в усилителях 14 и 21 поступают на вход измерителя временных интервалов 15, подключенного к блоку индикации 16.

Для преобразования временного интервала τ , соответствующего измеряемому углу α , использован метод последовательного счета. При этом временной интервал между старт-импульсом от опорного фотоприемника и стоп-импульсом от сигнального фотоприемника (см. рис. III.12) заполняется от кварцевого генератора 17. С помощью счетчика, входящего в блок измерителя временных интервалов 15, подсчитывается число квантовых импульсов, которое укладывается во временном интервале.

Для стабилизации угловой скорости сканирования частота питающего напряжения электродвигателя 8 стабилизирована кварцевым генератором 17, подключенным к электродвигателю через делитель частоты 18, узкополосный фильтр 19 и усилитель мощности 20.

ТЕОДОЛИТ ЛСТ4 (рис. III.22) — компактный лазерный сканирующий теодолит с совмещенной оптикой.

Точность измерения углов с помощью ЛСТ4 зависит от стабильности угловой скорости ω сканирования и точности измерения временных интервалов. Средняя квадратическая ошибка измеряемого угла

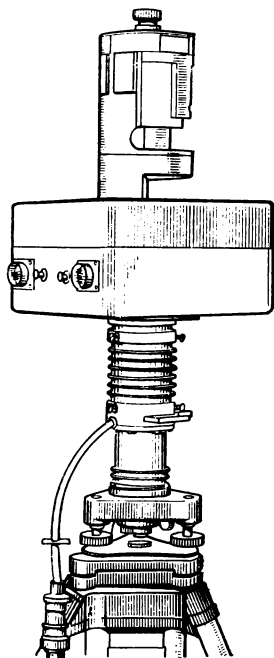


Рис. III.22. Лазерный сканирующий теодолит ЛСТ4

$$m_{\alpha} = \sqrt{m_{\omega}^2 \tau^2 + m_{\tau}^2 \omega^2}, \quad (\text{III. 19})$$

где m_ω и m_τ — средние квадратические ошибки угловой скорости сканирования ω и временного интервала τ .

Стабильность угловой скорости сканирования зависит от ряда факторов и является функцией времени (рис. III.23). Эта функция имеет монотонное изменение, а также статистические флуктуационные изменения. Угловая скорость (рад/с)

$$\omega = \omega(t) = \omega_{\text{ном}} + a \omega_{\text{ном}} t + \Delta\omega(t), \quad (\text{III.20})$$

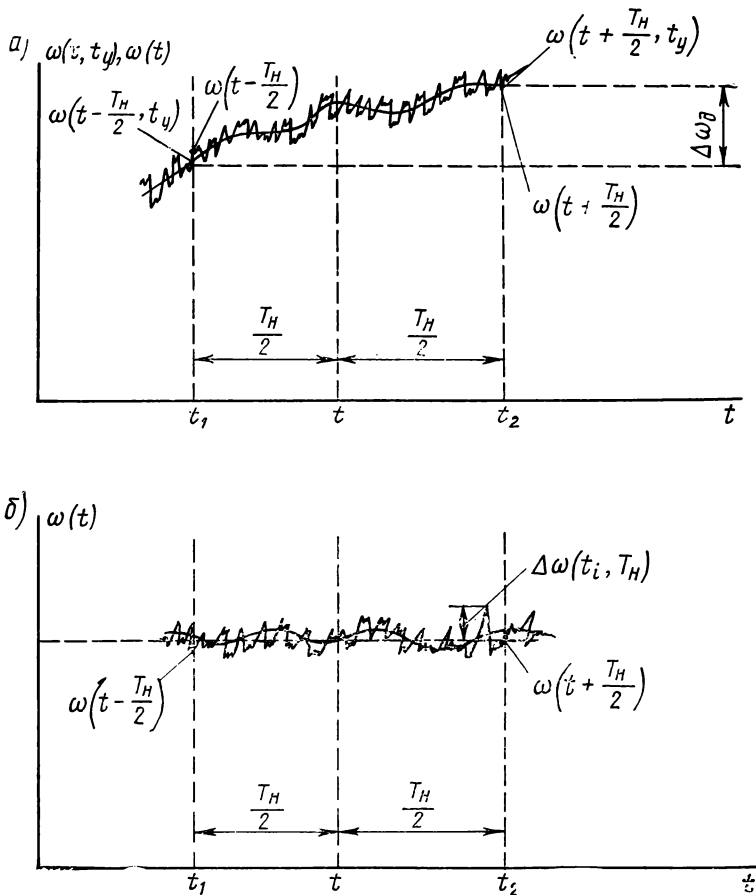


Рис. III.23. Графики функции долговременной (а) и кратковременной (б) нестабильностей угловой скорости сканирования

где $\omega_{\text{ном}}$ — номинальное значение угловой скорости сканирования; $a\omega_{\text{ном}}t$ — систематическое изменение угловой скорости сканирования (в общем случае коэффициент a зависит от времени t); $\Delta\omega(t)$ — флуктуационные изменения угловой скорости сканирования, центрированные относительно усредненного значения скорости сканирования в интервале времени наблюдения T_H .

Долговременная нестабильность угловой скорости сканирования $\Delta\omega_d = a\omega_{\text{ном}}t$ определяется как разность двух усредненных значений угловой скорости сканирования, взятых в начале и в конце интервала измерения $T_{\text{И}}$ (см. рис. III.23):

$$\Delta\omega_d = \omega(t + 0,5T_{\text{И}}, t_y) - \omega(t - 0,5T_{\text{И}}, t_y), \quad (\text{III.21})$$

где t_y — время усреднения, которое для электронного частотомера равно времени счета, причем $t_y \ll T_{\text{И}}$.

Кратковременная нестабильность $\Delta\omega(t)$ носит хаотический, подобный шумам характер. Средние квадратические флуктуации угловой скорости сканирования могут быть найдены согласно формуле Бесселя

$$m_{\Delta\omega} = \sqrt{[v\omega]/(n-1)}, \quad (\text{III.22})$$

$$\text{где } v_i = \omega(t_i, T_{\text{И}}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i(t_i, T_{\text{И}}).$$

Долговременная нестабильность $\Delta\omega_d$ связана с систематическим изменением угловой скорости ω сканирования в течение длительного времени, а кратковременная нестабильность $\Delta\omega(t)$ определяется флуктуационными изменениями скорости. Для радиотехнической аппаратуры обычно применяют границы разделения долговременной и кратковременной нестабильности частоты в интервале 100—1000 с. По аналогии подобные границы разделения приняты для угловой скорости сканирования.

Частота сканирования лазерным пучком при угловых измерениях обычно составляет десятки, сотни и даже тысячи герц, а время, затрачиваемое на многократное измерение одного и того же угла — единицы секунд. За это время систематическое изменение угловой скорости сканирования очень мало, поэтому на результаты измерений влияют в основном флуктуационные изменения угловой скорости сканирования. Следовательно,

$$\omega(t) = \omega_{\text{ном}} + \Delta\omega(t). \quad (\text{III.23})$$

Кратковременная нестабильность угловой скорости сканирования для электромеханических дефлекторов характеризуется относительной величиной $10^{-4} - 10^{-5}$, средняя квадратическая ошибка угловой скорости сканирования может быть принята равной $5 \cdot 10^{-5} \omega / 3$. Ошибка измерения временных интервалов с помощью радиотехнических средств обычно составляет 10^{-8} с, следовательно $m_{\tau} = 10^{-8} c / 3$ [1].

Когда измерения временного интервала и скорости сканирования выполняются независимо, а угол определяется при одном направлении сканирования, т. е. величиной запаздывания сигнала можно пренебречь, ошибка m_{α} измерения угла находится согласно (III.19).

Чтобы оценить точность угловых измерений, полученных с помощью сканирующего теодолита, примем угловую скорость сканирования $\omega = 2\pi \cdot 100$ рад/с

(период сканирования $T=0,01$ с), измеряемый угол $\alpha=180^\circ$, т. е. $\tau=0,02$ с, $m_\omega=5 \cdot 10^{-5} \omega/3$, $m_\alpha=10^{-8}$ с/3. Используя (III.19), получим

$$m_\alpha = \sqrt{(5 \cdot 10^{-5} \cdot 2\pi \cdot 100/3)^2 (1/200)^2 + (2\pi \cdot 100)^2 (10^{-8}/3)^2} = 11''.$$

Обычно у лазерных сканирующих теодолитов точность однократно измеренного угла характеризуется величиной $0,5 - 1,0''$, что соответствует точности технических теодолитов.

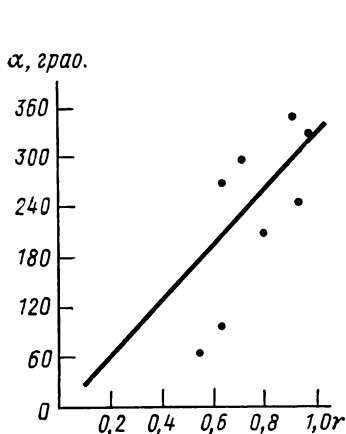


Рис. III.24. Зависимость между величиной угла α и коэффициентом корреляции r

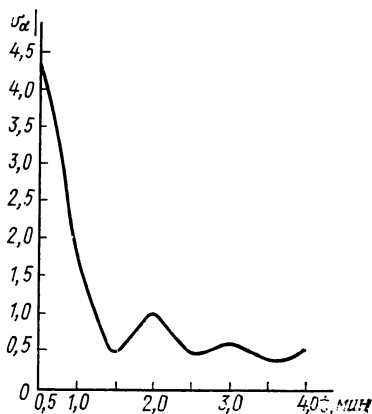


Рис. III.25. Зависимость ошибки измерения угла m_α от времени t с момента включения прибора

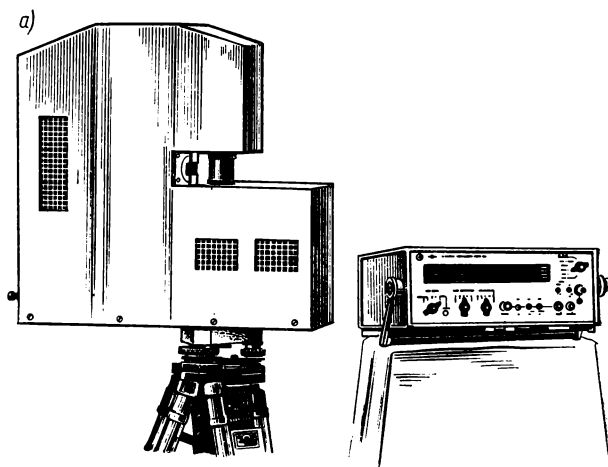
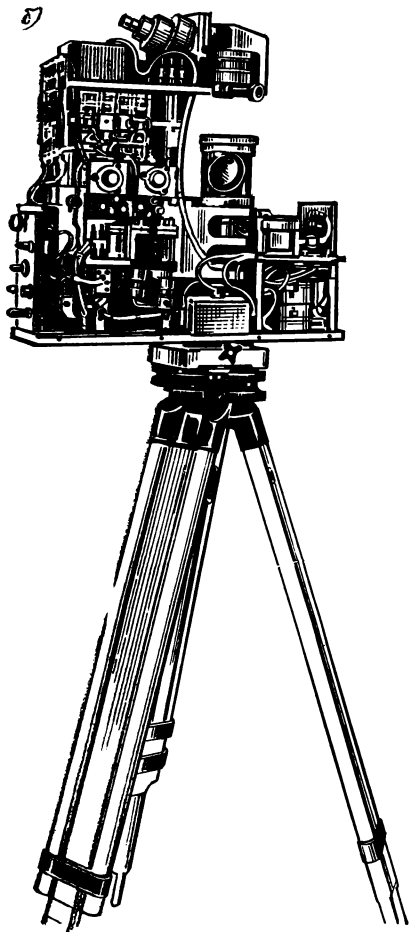


Рис. III.26. Лазерный сканирующий теодолит ЛСТ2 в кожухе (а) и без кожуха (б)

Так как с помощью лазерных сканирующих теодолитов углы измеряют практически мгновенно, то для повышения точности измерений осредняют результаты измерений за 1—2 с.

Для уменьшения влияния нестабильности угловой скорости развертки при круговом сканировании лазерным пучком целесообразно одновременно с измерениями временного интервала τ , соответствующего измеряемому углу, измерять и период сканирования T . Период сканирования измеряют путем заполнения квантуемыми импульсами временного интервала между двумя последующими старт-импульсами и затем подсчитывают число квантуемых импульсов. При этом получаемые величины T и τ взаимно коррелированы и, следовательно, при вычислении угла ошибки m_T и m_τ будут частично компенсированы. Тогда средняя квадратическая ошибка измеряемого угла

$$m_\alpha = \omega \sqrt{m_\tau^2 + \tau^2 m_T^2 / T^2 - 2\tau r m_T m_\tau / T}, \quad (\text{III.24})$$



где $\omega = 2\pi/T$; m_τ и m_T — средние квадратические ошибки измерения временного интервала τ и периода T ; r — коэффициент корреляции.

Согласно экспериментальным исследованиям лазерного сканирующего теодолита ЛСТ4, величина коэффициента корреляции r линейно меняется в зависимости от величины угла α (рис. III.24). Ошибка угловых измерений также зависит от времени с момента включения сканирующего узла. На рис. III.25 показана зависимость ошибки измерения угла m_α от времени t с момента включения ЛСТ4. Как видно из графика, измерения можно выполнять через 1,5 мин после включения сканирующего узла.

При работе лазерного сканирующего теодолита информацию о величине угла получают в виде кода (числа квантуемых импульсов). Число импульсов, соответствующих временному интервалу τ или периоду сканирования T , определяют с помощью серийно выпускаемого частотомера. На рис. III.26 показан лазерный сканирующий теодолит ЛСТ2, который подключают к частотомеру.

Наибольшая эффективность при использовании лазерного сканирующего теодолита достигается применением ЭВМ для обработки результатов вычислений. В этом случае обработку результатов можно выполнять с такой же скоростью, как и угловые измерения без промежуточных записей. Причем результаты измерений можно обрабатывать по программе, соответствующей поставленной инженерно-геодезической задаче.

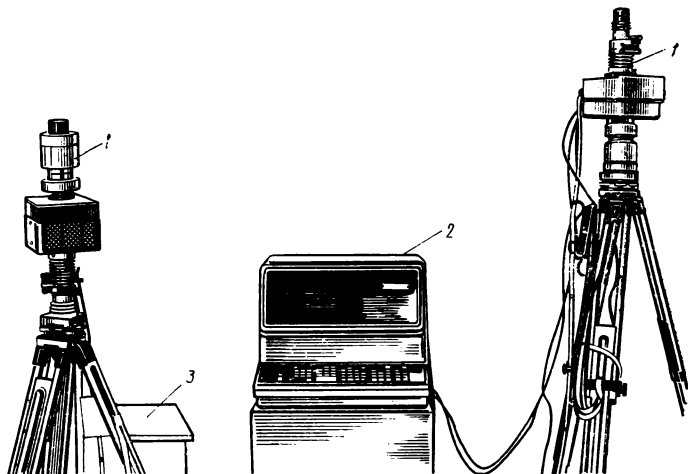


Рис. III.27. Система для измерения углов:

1 — лазерные сканирующие теодолиты ЛСТ4; 2 — электронная клавишная вычислительная машина (ЭКВМ) «Искра-125»; 3 — блок питания

Таким образом, использование лазеров для угловых измерений позволяет не только автоматизировать процесс измерения углов, включая поиск цели и наведение на нее, но и осуществлять обработку результатов в реальном масштабе времени.

При независимых измерениях T и τ точность измерения угла α снижается при его увеличении. Если T и τ измеряются одновременно, то точность угловых измерений возрастает в два-три раза (составляет $\approx 1'$) и практически не зависит от величины угла. При сравнении с эталонными измерениями, выполненными теодолитом, получена ошибка однократно измеренного угла, равная $1,7'$. Повышение точности измерений достигается за счет осреднения результатов измерения за 1—2 с. Средняя квадратическая ошибка среднего значения угла, измеренного сканирующим теодолитом, обычно находится в интервале $2-20''$ и зависит в основном от стабильности работы сканирующего узла.

На рис. III.27 показана измерительная система, состоящая из двух сканирующих теодолитов ЛСТ4, электронной клавишной вычислительной машины (ЭКВМ) «Искра-125», блока питания, а также двух отражателей и устройства сопряжения, которые на рисунке не показаны.

Вся информация об измеряемых углах поступает на ЭКВМ в виде электрических сигналов через согласующее устройство. В ЭКВМ введена программа для обработки результатов измерений.

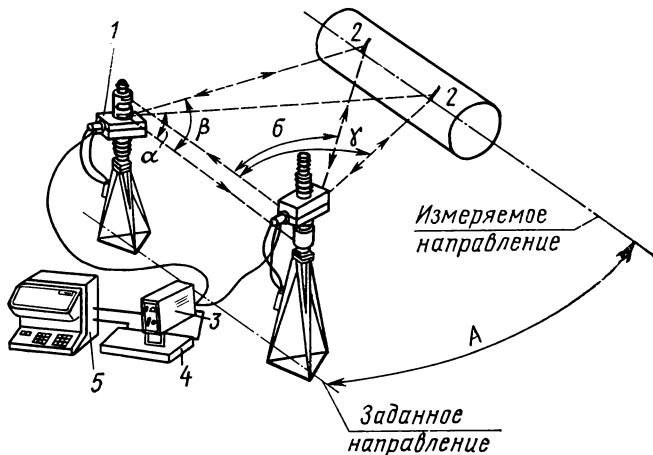


Рис. III.28. Схема привязки оси изделия по азимуту:

$\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ — углы, измеряемые с помощью сканирующих теодолитов; A — азимут оси изделия; 1 — ЛСТ4; 2 — визирные марки (отражатели); 3 — согласующее устройство; 4 — блок питания; 5 — ЭКВМ «Искра-125»

ЭКВМ «Искра-125» имеет встроенный телевизионный экран, позволяющий визуально контролировать набираемую программу. Окончательные результаты, полученные на основании обработки вычислений, также можно считать с экрана.

Данную измерительную систему используют, например, для решения инженерно-геодезической задачи, связанной с определением азимута оси изделия. Схема, поясняющая принцип работы измерительной системы, приведена на рис. III.28.

На концах базиса, азимут которого известен, устанавливаются лазерные сканирующие теодолиты ЛСТ4, а на точках изделия, задающих его ось — отражатели, выполненные в виде цилиндрических стержней с нане-

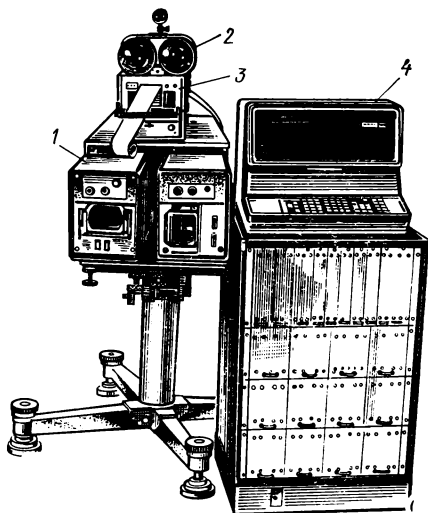


Рис. III.29. Лазерная контрольно-измерительная система:

1 — передатчик; 2 — приемник; 3 — цифропечатающее устройство; 4 — ЭКВМ «Искра-125»

сенным на них катафотом. Для контроля вертикальности установки каждый отражатель снабжен круглым уровнем. Поэтому при любой установке отражателя световой сигнал от лазерного сканирующего теодолита возвращается на приемник.

С помощью лазерных сканирующих теодолитов измеряются углы α , β , σ и γ , образованные направлением базиса и направлениями на отражатели (рис. III.28).

Азимут оси изделия

$$A = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg} \sigma + \operatorname{tg} \beta) - \operatorname{tg} \sigma \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \sigma \operatorname{tg} \alpha}. \quad (\text{III.25})$$

При проведении работ с помощью каждого лазерного сканирующего теодолита за одну секунду производится 124 измерения углов, а результаты измерений обрабатываются с помощью ЭКВМ согласно (III.25). Роль оператора при работе с измерительной системой сводится к установке прибора в рабочее положение, включению его в сеть, а также к установке отражателей на изделии. Остальные операции выполняются автоматически.

При выполнении ряда инженерно-геодезических работ необходимо измерять небольшие углы, например, при контроле движения строительных машин и механизмов на прямолинейных участках. В этих случаях можно использовать лазерные углоизмерительные устройства, в которых сканирование лазерным пучком осуществляется в локальной области по треугольному закону:

$$\alpha = \arcsin \sin (\omega \tau). \quad (\text{III.26})$$

Частота измерений таких устройств может составлять сотни и даже тысячи герц, а точность — единицы угловых секунд.

На рис. III.29 показан внешний вид лазерной контрольно-измерительной системы (ЛКИС). В этом устройстве в качестве излучателей использованы гелий-неоновые лазеры ЛГ-38. Частота измерений составляет 200 Гц, точность — $3''$, дальность действия ≈ 3 км. ЛКИС позволяет измерять одновременно вертикальные и горизонтальные углы в диапазоне $0-20^\circ$. Результаты измерений обрабатывают на ЭКВМ «Искра-125» по соответствующей программе. Окончательные результаты можно вывести не только на телевизионный экран, но и на цифропечать.

Глава IV

ГИРОСКОПИЧЕСКОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ

§ IV.1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ГИРОСКОПА

Задача ориентирования при обеспечении строительства исходными геодезическими данными в настоящее время успешнее всего решается путем применения гироскопического теодолита (гиротеодолита). Конструктивно гиротеодолит представляет собой угломерный инструмент, в котором объединены маятниковый гироскоп — как датчик направления истинного меридиана — и теодолит, дополненный автоколлимационным окуляром для наблюдений за положением оси гироскопа. Гиротеодолит имеет довольно сложную оптико-механическую схему, состоящую из элементов радиотехники и электроники.

Гироскопический способ определения азимутов можно применять при: 1) ориентировании подземных сооружений и подземной геодезической сети; 2) ориентировании опорной геодезической сети на дневной поверхности, развиваемой в местной системе координат; 6) проложении полигонометрических ходов с независимым определением азимутов сторон (без измерений углов поворота).

Достоинство гироскопического способа ориентирования — возможность выполнения работ в короткие сроки на дневной поверхности и под землей, независимо от времени года и суток, состояния погоды, в любых географических условиях для широт $0—75^\circ$.

Гироскоп — устройство, состоящее из ротора, вращающегося с очень большой скоростью, и системы опор, обеспечивающей движение ротора вокруг неподвижной точки, лежащей на его главной оси.

В практике геодезических работ используют два основных свойства гироскопа: сохранять неизменным направление оси вращения в пространстве (свободный гироскоп) и совершать периодические колебания около положения равновесия, совпадающего с плоскостью меридиана данной точки (маятниковый гироскоп) [23].

Свободный гироскоп. *Свободным* называется гироскоп, имеющий три степени свободы (по осям x , y и z) при отсутствии трения в осях, при этом неподвижная точка совпадает с точкой пересечения осей подвеса ротора и совмещена с центром тяжести гироскопа.

На рис. IV.1 показана принципиальная схема свободного гироскопа. Массивный ротор 1 подвешен на двух кольцах 2 и 3, образующих карданный подвес. Таким образом осуществляются три степени свободы гироскопа вокруг трех взаимно перпендикулярных осей: собственное вращение ротора вокруг оси симметрии xx' в подшипниках кольца 2; вращение ротора вместе с кольцом 2 вокруг оси y в подшипниках кольца 3; вращение ротора вместе с кольцами 2 и 3 вокруг оси z в подшипниках основания 4. Точку пересечения O трех осей называют *центром гироскопа*, или *точкой подвеса*. С этой точкой должен совпадать центр тяжести чувствительного элемента (ЧЭ).

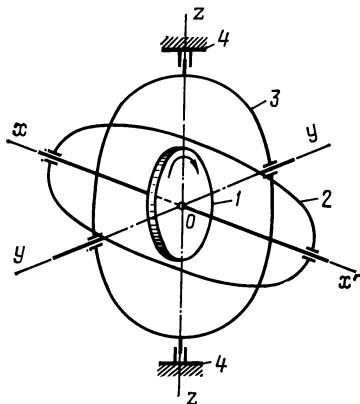


Рис. IV.1. Принципиальная схема свободного гироскопа

Если ротор привести во вращение вокруг оси xx' с большой частотой вращения (современные гироскопы имеют частоту вращения до 60 тыс. об/мин), то ось гироскопа приобретает устойчивость и способность сопротивляться изменению ее положения в пространстве. При вращении основания 4 в любом направлении положение оси xx' гироскопа в пространстве остается неизмен-

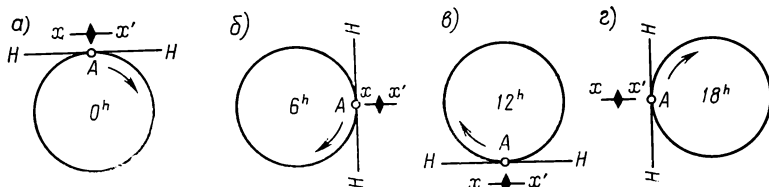


Рис. IV.2. Кажущееся движение оси гироскопа при суточном вращении Земли

ным. Элементарное представление о работе гироскопа дает вращающийся волчок, способный сохранять положение оси вращения неизменным. Если гироскоп установлен на Земле, совершающей суточное вращение вокруг своей оси, а ось гироскопа ориентирована в направлении на какую-либо звезду, то независимо от вращения Земли ось все время будет «следить» за звездой.

Примем это свойство устойчивости оси гироскопа для определения направления меридиана точки наблюдений. Пусть (для простоты рассуждений) гироскоп установлен на экваторе в точке A так, что его ось вращения xx' в начальный момент времени горизонтальна и приблизительно перпендикулярна направлению меридиана (рис. IV.2, а). Тогда через 6 ч (рис. IV.2, б) плоскость горизонта HH наклонится на 90° , а ось вследствие ее устойчиво-

сти останется ориентированной так же, как и в начальный момент. Наблюдателю покажется, что за это время ось наклонилась на 90° . Через 12 ч (рис. IV,2, в) наблюдателю покажется, что ось гироскопа повернулась на 180° относительно начального положения и т. д. За время одного суточного оборота (рис. IV.2, г) Земля ось гироскопа совершит кажущееся движение относительно наблюдателя в этой точке на 360° .

Если ось была установлена под каким-либо углом к меридиану, то в течение суток она опишет в пространстве конус, ось которого будет лежать в плоскости меридиана. Если же в начальный момент ось была установлена в плоскости меридиана, то она будет казаться наблюдателю неподвижной.

Таким образом, свойство свободного гироскопа сохранять неизменным свое положение в пространстве можно использовать при автономном ориентировании. Однако это свойство сохраняется лишь в идеальном гироскопе. В действительности имеет место трение в осях (подшипниках), а центр тяжести невозможно точно совместить с точкой подвеса.

Под действием внешней силы, приложенной к оси быстро вращающегося гироскопа, ось перемещается в направлении, перпендикулярном к направлению действия силы. В том случае, если действующая сила непрерывна, то и перемещение оси будет непрерывным. Эти перемещения оси, имеющие вид колебаний, называются *прецессией* и имеют в общем случае для свободного гироскопа незакономерный характер, а величина прецессии в самых совершенных гироскопах достигает $0,5-1^\circ$ в час. Кроме того, сам процесс наблюдений будет слишком длителен. Поэтому способ ориентирования с помощью свободного гироскопа применяется для геодезических целей лишь в тех случаях, когда требуется сохранение точной ориентировки в течение короткого промежутка времени или же к ориентировке предъявляются пониженные требования (топографический привязчик) и имеется возможность периодически определять поправку за прецессию гироскопа.

Маятниковый гироскоп. Для осуществления гироскопического теодолита в настоящее время чаще всего используют трехстепенной гироскоп, у которого движение по оси yy ограничивается применением маятникового груза Q (рис. IV.3).

Пусть груз Q соединен с внутренней рамкой гироскопа так, что всегда приводит ось xx' в горизонтальное положение. Если отклонить рамку карданного подвеса от плоскости горизонта, в которой она находится в положении равновесия, то при отсутствии вращения ротора рамка будет совершать колебательные движения вокруг оси yy по закону обычного маятника. Поэтому такой гироскоп называют *маятниковым*.

Рассмотрим поведение маятникового гироскопа, установленного на Земле в точке A . Пусть в момент времени t (рис. IV.4, а) ось xx' гироскопа располагается горизонтально в направлении с востока B на запад Z , а ротор раскручен в направлении хода часовой стрелки (если смотреть на него с южного конца x' оси).

Вследствие вращения Земли через бесконечно малый промежуток времени Δt (рис. IV.4, б) восточная часть плоскости горизонта наклонится на угол θ и маятник выйдет из состояния равновесия. Под действием груза Q ось гироскопа будет наклоняться, стремясь к горизонтальному положению. Возникает постоянно дей-

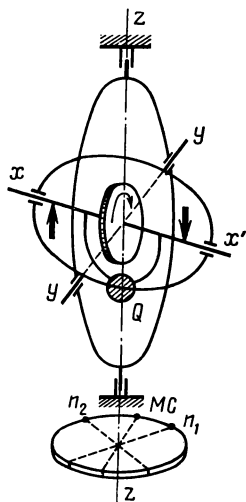


Рис. IV.3. Принципиальная схема маятникового гироскопа

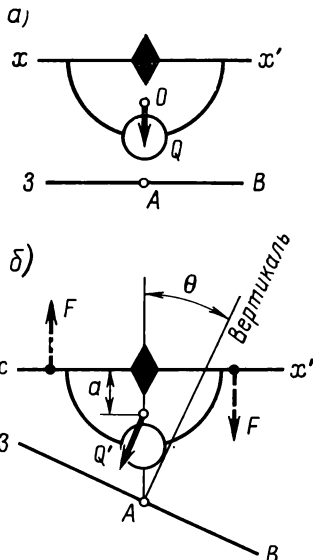


Рис. IV.4. Положение оси маятникового гироскопа, установленного на Земле:

a — в начальный момент;
 b — через промежуток времени Δt

ствующий момент внешней силы, так называемый *маятниковый момент*, равный

$$M = Q'a, \quad (IV.1)$$

где Q' — равнодействующая силы тяжести груза Q и ротора; a — расстояние от оси ротора до точки приложения равнодействующей.

Маятниковый момент эквивалентен приложению к оси ротора пары сил F в вертикальной плоскости. По правилу прецессии под действием внешних сил и гироскопического момента ось гироскопа начнет прецессировать в горизонтальном направлении. В нашем случае северный конец оси x с ускоряющимся движением начнет приближаться к северной части меридиана точки наблюдений. Наибольшая скорость прецессии будет иметь место при совпадении оси с плоскостью меридиана.

Вследствие инерции всей системы ось гироскопа пройдет плоскость меридиана. Теперь в восточной части горизонта окажется северный конец оси x , который по мере вращения Земли будет вынужденно наклоняться под действием груза Q , стремясь к горизонтальному положению. Возникнет момент сил противоположного действия, тормозящий инерционное движение оси. Движение оси прекратится, когда момент количества движения прибора, обусловленный его инерционным движением, окажется равным направляющему моменту, обусловленному вращением ротора и маятниковым моментом. Так как направляющий момент будет возрастать вследствие непрерывного вращения Земли, то начнется прецессия с возрастающей скоростью конца оси x в обратном направлении, т. е. к плоскости меридиана. Таким образом, ось гироскопа будет совершать периодические колебания относительно положения равновесия, совпадающего с плоскостью меридиана.

Для определения направления меридиана нужно укрепить на основании (Земле) горизонтальный круг (см. рис. IV.3), а на одном из концов оси гироскопа — индекс, с помощью которого можно взять отсчеты в точках реверсии* — при крайнем восточном n_1 и крайнем западном n_2 положениях оси. Среднее из этих отсчетов будет соответствовать положению равновесия, совпадающему с направлением меридиана точки наблюдений, т. е. соответствовать «месту севера» (МС) на горизонтальном круге.

§ IV.2. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ТЕОДОЛИТА И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО АЗИМУТА

На основании рассмотрения гироскопического способа ориентирования можно наметить следующую структурную схему гиротеодолита. Гиротеодолит (рис. IV.5) должен иметь *чувствительный элемент*, например гироскопический датчик маятникового типа; *угломерное устройство* на штативе со следящей системой, позволяющей производить отсчеты по горизонтальному кругу в моменты реверсии и визирование на земной предмет (ориентирный пункт) для передачи азимута; *блок питания* с источником питания всех энергетических узлов гиротеодолита.

При наблюдениях гиротеодолитом все измерения относят к отвесной линии в точке наблюдений и к плоскости горизонта. Следовательно, азимут, определенный гироскопически, тождествен астрономическому азимуту.

Имея отсчеты n_1 , n_2 и n_3 точек реверсии по горизонтальному кругу, отсчет положения равновесия N_0 (рис. IV.6) колебаний ЧЭ находят по формуле

$$N_0 = 0,5[(n_1 + n_2)/2 + (n_2 + n_3)/2]. \quad (IV.2)$$

* Точкой реверсии называется точка начала обратного движения оси.

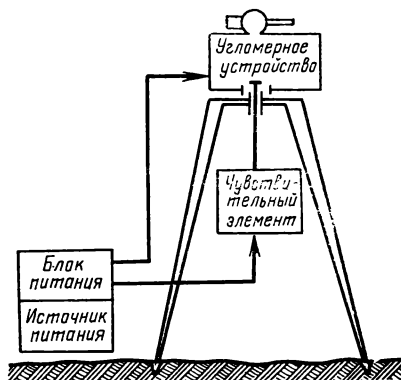


Рис. IV.5. Структурная схема гиroteодолита

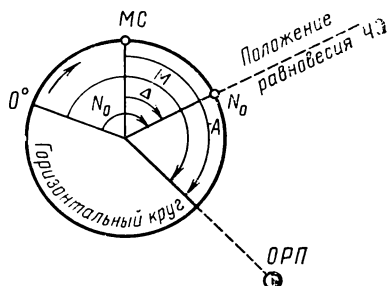


Рис. IV.6. Схема определения гироскопического азимута

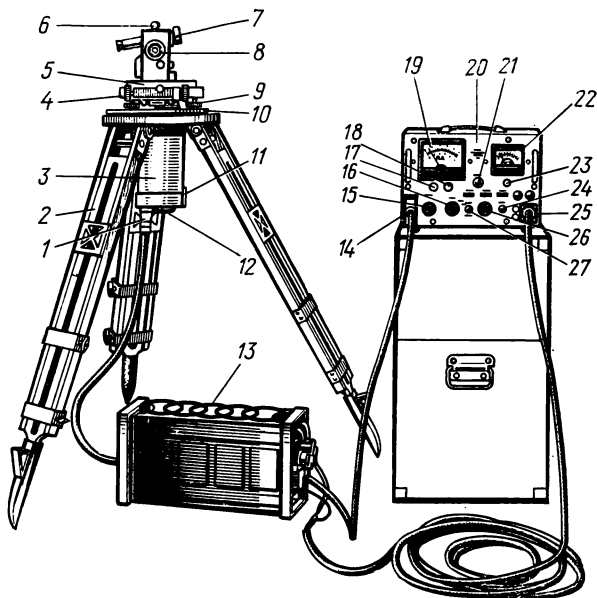


Рис. IV.7. Гиroteодолит ГИ-Б1:

1 — штепсельный разъем; 2 — штатив; 3 — гироблок; 4 — бесконечное наводящее устройство; 5 — алидада; 6 — дополнительный окуляр теодолита; 7 — зрительная труба; 8 — окуляр; 9 — подъемные винты со сферическими подпятниками; 10 — трегер теодолита; 11 и 12 — арретеры I и II; 13 — аккумулятор; 14 — штепсельный разъем; 15 и 16 — переключатель фазы и контроль; 17 — установка нуля; 18 — регулировка напряжения; 19 — миллиамперметр G_1 ; 20 — блок питания; 21 — тормоз; 22 — ампервольтметр G_2 ; 23 — переключатель ток — напряжение; 24 — мотор; 25 — штепсельный разъем; 26 — термостат; 27 — освещение

Обычно по конструктивным соображениям отсчетное устройство по горизонтальному кругу располагают под некоторым углом Δ по отношению к оси вращения ротора гироскопа. Поэтому на горизонтальном круге вычисляют

$$MC = N_0 - \Delta, \quad (IV.3)$$

где Δ — постоянная поправка гиротеодолита.

Астрономический азимут на ориентирный пункт (ОРП)

$$A = M - MC = M + \Delta - N_0, \quad (IV.4)$$

где M — отсчет по горизонтальному кругу при наведении трубы гиротеодолита на ОРП.

Для получения геодезического азимута A_r следует ввести поправку δA в азимут за уклонение отвесной линии

$$A_r = A + \delta A. \quad (IV.5)$$

Для перехода к дирекционному углу α вводят поправку γ за сближение меридианов в проекции Гаусса — Крюгера:

$$\alpha = A_r + \gamma. \quad (IV.6)$$

В настоящее время для инженерно-геодезических работ используют гиротеодолиты ГИ-Б1 (рис. IV.7) и ГИ-Б2, выпускаемые предприятием МОМ (ВНР), а также маркшейдерский гироскоп МТ-1 и гиротеодолит МВ-2М, выпускаемые отечественной промышленностью. Средняя квадратическая ошибка определения азимута с помощью этих приборов составляет 20".

Глава V

ПРИБОРЫ ДЛЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ

§ V.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Из всех видов нивелирования в строительной практике наиболее часто применяют геометрическое. Его широко используют для создания высотной геодезической сети на строительном-монтажной площадке, передачи отметок на монтажные горизонты, выноса в натуру проектных отметок, контроля высотного положения строительных конструкций и элементов технологического оборудования, контроля ровности поверхности, исполнительных съемок, для наблюдений за осадками зданий, сооружений и элементов промышленного оборудования. Однако в ряде случаев более целесообразно применять методы гидронивелирования — гидростатического и гидромеханического; в последнее время в производство внедрен новый способ нивелирования — гидродинамическое. На стадии изысканий для скоростной съемки рельефа весьма перспективно применение барографов, в которых используется принцип барометрического нивелирования.

Приборы для геометрического нивелирования классифицируют по точности и способу установки их линии визирования в рабочее положение. В зависимости от точности нивелиры делят на высокоточные, точные и технические, из которых на геодезических работах в массовом строительстве наиболее широко используют точные и технические нивелиры.

По способу установки линии визирования в рабочее положение (горизонтальное или близкое к нему, но всегда однообразное относительно отвесной линии) различают нивелиры, у которых линию визирования устанавливают по скрепленному со зрительной трубой цилиндрическому уровню, и нивелиры, линия визирования которых устанавливается в рабочее положение автоматически после грубой (с ошибкой 5—10') установки оси вращения нивелира в отвесное положение. Нивелиры первого типа часто называют *уровненными*, а второго — *самоустанавливающимися*.

Для самоустановки линии визирования в горизонтальное положение в самоустанавливающихся нивелирах применяют устройства, называемые *компенсаторами*, принцип действия которых основан на использовании силы тяжести. Современные оптико-механические компенсаторы легки, компактны и по точности стабилизации линии визирования превосходят жидкостные уровни. Ком-

пенсаторы автоматически исключают незначительные отклонения линии визирования от ее рабочего положения; время самоустановки визирного луча обычно исчисляется долями секунды. Этим устраняются трудоемкий и утомительный процесс приведения пузырька уровня в нуль-пункт, необходимость контроля и коррекции положения пузырька перед отсчетом по нивелирной рейке. Отпадает необходимость иметь в конструкции нивелира элевационный винт, существенно сокращается время подготовки нивелира к работе на станции, появляется возможность вести работу на зыбких грунтах, с деревянного помоста или настила.

Самоустанавливающиеся нивелиры проще в эксплуатации и менее подвержены разъюстировке при одностороннем нагреве солнцем. При работе с ними производительность труда в зависимости от вида работ повышается на 10—60%.

Учитывая относительную новизну самоустанавливающихся нивелиров, рассмотрим способы самоустановки, т. е. автоматической компенсации углов наклона оси вращения нивелира и некоторые принципиальные схемы современных компенсаторов.

§ V.2. СПОСОБЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ УГЛА НАКЛОНА ОСИ ВРАЩЕНИЯ НИВЕЛИРА

В качестве компенсаторов в самоустанавливающихся нивелирах применяют элементы, положение которых связано с направлением силы тяжести — маятник или свободная поверхность жидкости. Ось симметрии свободно подвешенного маятника всегда совпадает с направлением отвесной линии. Свободная поверхность жидкости всегда устанавливается перпендикулярно отвесной линии. Использование того или иного свойства для компенсации угла наклона визирного луча может производиться непосредственно или с помощью дополнительных оптических и оптико-механических приспособлений.

Разработанные к настоящему времени компенсаторы можно условно разделить на три группы: маятниковые, жидкостные и уровенные. Вначале был создан и внедрен в производство уровенный компенсатор Г. Ю. Стодолкевича (1944, СССР), несколько позже разработан жидкостный компенсатор Н. А. Гусева, получивший незначительное распространение. Серийное же производство самоустанавливающихся нивелиров началось в 50-х годах с изобретением маятниковых компенсаторов, которые благодаря своей миниатюрности, изящности решения задачи и точности почти полностью вытеснили в конструкциях нивелиров уровенные и жидкостные компенсаторы.

Задачу самоустановки визирного луча в рабочее положение в общем виде можно решить следующим образом. Пусть O — оптический центр объектива трубы нивелира (рис. V.1), C — центр сетки нитей. При горизонтальном положении визирного луча OC зрительной трубы правильный отсчет по нивелирной рейке составляет L . Наклоним зрительную трубу (или вертикальную ось вра-

щения нивелира) на угол α , тогда центр сетки нитей перейдет в положение C_1 , и по рейке будет получен неправильный отсчет Π_1 . Правильный отсчет Π , соответствующий главному горизонтальному лучу*, можно получить двумя способами: 1) помещением в точке K механического элемента, удерживающего при наклоне трубы на угол α центр сетки нитей в положении C , т. е. на продолжении главного горизонтального луча (компенсатор в виде подвешенной сетки нитей); 2) помещением к точке K оптико-механического элемента, поворачивающего лучи так, чтобы изобра-

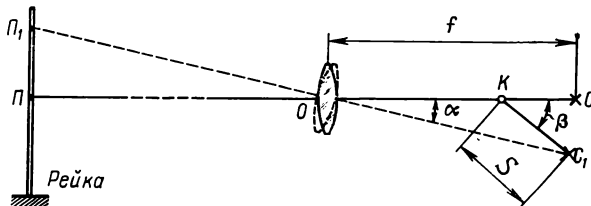


Рис. V.1. Принципиальная схема компенсации угла наклона линии визирования

жение правильного отсчета Π переместилось в новое (наклоненное) положение центра сетки нитей C_1 (компенсатор в виде подвешенного зеркала, призмы, оптического клина и т. п.).

Поскольку расстояние между точкой O и сеткой нитей C примерно равно фокусному расстоянию f объектива, то условие компенсации можно получить так:

из треугольника OCC_1 по малости угла α

$$\overline{CC_1} = f\alpha, \quad (V.1)$$

где α — угол наклона зрительной трубы и оси вращения нивелира, рад;

из треугольника KCC_1

$$\overline{CC_1} = S\beta, \quad (V.2)$$

где S — расстояние между точкой установки компенсатора K и сеткой нитей.

Из (V.1) и (V.2) получим $f\alpha = S\beta$, или

$$f/S = \beta/\alpha. \quad (V.3)$$

Так как величины f и S практически постоянны, то

$$\beta/\alpha = K \quad (V.4)$$

величина почти постоянная, называемая *механическим* или *угловым коэффициентом компенсации*. Для труб с внутренней фокуси-

* Главным горизонтальным лучом называют горизонтальный луч, проходящий через оптический центр объектива.

ровкой значение фокусного расстояния изменяется в пределах 1—3% в зависимости от расстояния до наблюдаемого предмета, что приводит к небольшому изменению коэффициента K . При расчете компенсаторов величину f берут как некоторое среднее значение, близкое к фокусному расстоянию при наблюдении бесконечно удаленных предметов.

Если компенсирующий элемент установлен внутри зрительной трубы между объективом и сеткой нитей, то величина S не может быть более f ; в этом случае коэффициент компенсации всегда больше единицы, т. е. угол β всегда больше угла наклона α трубы нивелира. Это выгодно отличает такой компенсатор от обычного жидкостного уровня, так как при их одинаковой чувствительности компенсатор будет всегда реагировать на наклон вертикальной оси вращения в K раз больше, чем уровень. Практика подтверждает это. Даже в технических самоустанавливающихся нивелирах самоустановка визирного луча в рабочее положение осуществляется с ошибками не более 1"; для жидкостных уровней такая точность практически недостижима. В целом это благоприятно сказывается на точности результатов измерений, выполняемых с помощью самоустанавливающихся нивелиров.

Чаще всего компенсаторы подвешивают в виде маятника на тонких металлических или синтетических нитях толщиной 20—100 мкм. Для упрощения будем рассматривать такие нити идеально эластичными и нерастяжимыми. Толщина нитей подвеса обуславливается, главным образом, массой компенсатора. Экспериментально получено, что для исключения обрыва нитей при транспортировке прибора, когда на них могут действовать значительные динамические нагрузки, нити должны иметь запас прочности в 100—300 раз.

Масса компенсаторов находится в пределах 10—40 г. Компенсатор снабжается демпфером — устройством для гашения колебаний. Период колебаний, в зависимости от длины нитей подвеса и конструкции компенсатора, находится в пределах 0,1—0,01 с; амплитуда — до 1 мм. В большинстве конструкций нивелиров компенсатор находится в сходящемся пучке лучей, несущих изображение рейки, так как такое расположение способствует уменьшению габаритов трубы и компенсатора. При дрожании нивелира на ветру или при работе на зыбком основании качество изображения тем выше, чем меньше период и амплитуда колебаний при демпфировании. Экспериментально установлено, что время демпфирования должно быть в пределах 1 с.

§ 1.3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ САМОУСТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НИВЕЛИРОВ

Приведем описание и элементы теории двух, наиболее простых для уяснения физического процесса «самоустановки», механических компенсаторов с вертикально и горизонтально подвешенной сеткой нитей.

На рис. V.2, а изображена схема нивелира с вертикально подвешенной сеткой нитей. К оправе объектива на трех нитях (на рисунке показаны только две — AE и BD) подвешена сетка нитей с центром C . Таким образом, визирный луч OC направлен по вертикали; с помощью пентапризмы он поворачивается на 90° и выходит из нее горизонтально. При отклонении оси вращения нивелира от вертикали на угол α оптический центр объектива перемещается в положение O_1 (пунктирное изображение), а центр подве-

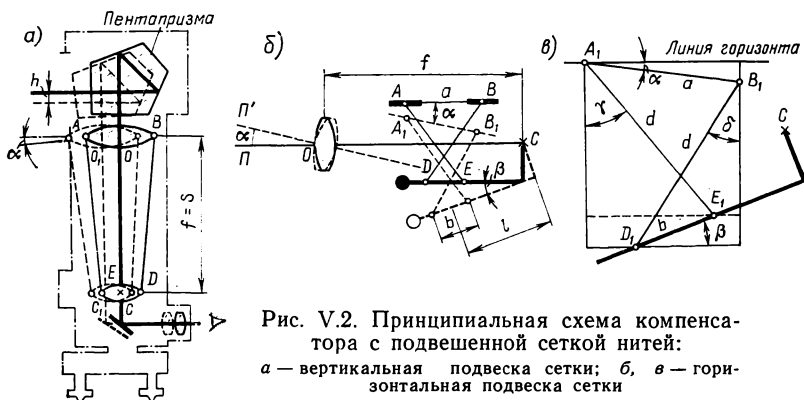


Рис. V.2. Принципиальная схема компенсатора с подвешенной сеткой нитей:
 a — вертикальная подвеска сетки; b, v — горизонтальная подвеска сетки

шенной сетки нитей — в положение C_1 . В силу малости угла наклона α и маятникового эффекта висящей сетки нитей новое положение визирного луча O_1C_1 остается отвесным. Далее визирный луч опять поворачивается на 90° и выходит горизонтально, смещаясь лишь незначительно по высоте на величину h . В нивелире такого типа длина рычага подвески S равна фокусному расстоянию f объектива, поэтому условие компенсации

$$\overline{CC_1} = fa = Sa,$$

откуда, согласно (V.3), коэффициент компенсации $K=1$. По этой схеме (подвешенная сетка нитей или подвешенный объектив) итальянской фирмой «Филотехника Сальмоиранги» создано несколько типов нивелиров для точного и технического нивелирования. Нивелиры имеют необычный — перископический вид.

На рис. V.2, б изображена принципиальная схема нивелира с компенсатором в виде горизонтально подвешенной сетки нитей. Сетка нитей с центром C укреплена на Γ -образном рычаге DEC (сплошная линия) с противовесом и с помощью четырех накрест расположенных нитей (на рисунке показаны только две из них — AE и BD) подвешена к корпусу зрительной трубы в точках A и B . При горизонтальном положении визирного луча OC правильный отсчет по рейке составляет Π . При наклоне зрительной трубы на угол α (предполагается, что труба наклонилась в вертикальной плоскости вокруг оптического центра объектива) сетка

нитей обычного уровенного нивелира должна была бы переместиться в вертикальной плоскости на величину

$$x = fa. \quad (V.5)$$

В рассматриваемом же случае подвешенная сетка нитей останется на месте за счет наклона Г-образного рычага на угол β , а визирный луч трубы OC останется горизонтальным, если будет соблюдено условие

$$x = l\beta, \quad (V.6)$$

здесь l — длина рычага от его средней точки (центра тяжести).

Из уравнений (V.5) и (V.6) вытекает условие компенсации:

$$f/l = \beta/a. \quad (V.7)$$

Выразим угол β через элементы подвеса сетки нитей. На рис. V.2, *в* представлена схема крестообразной подвески сетки нитей в наклонном положении. Из рисунка получим

$$a \sin \alpha + d \cos \delta - b \sin \beta - d \cos \gamma = 0, \quad (V.8)$$

где a и b — соответственно расстояния между точками крепления нитей подвеса к корпусу трубы и между точками крепления нитей к рычагу (в направлении визирного луча); d — длина нитей подвеса.

Ввиду малости углов α и β (углы менее $30'$) и приближенного равенства углов γ и δ получим соотношение $a\alpha \approx b\beta$, откуда

$$\beta \approx (a/b)\alpha. \quad (V.9)$$

Подставив значение β в формулу (V.7), получим

$$f/l \approx a/b = K_m, \quad (V.10)$$

где K_m — коэффициент механической компенсации.

Таким образом, задаваясь величинами f , a и b , находят длину рычага l , при которой осуществляется компенсация наклона трубы нивелира. Коэффициент K_m выгодно делать большим единицы, так как это будет способствовать повышению чувствительности компенсатора.

Горизонтально подвешенная сетка нитей применена в нивелире N-A2 (ФРГ).

§ V.4. ТОЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НИВЕЛИРЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время в строительных организациях распространены в основном нивелиры, выпущенные в соответствии с действовавшим в течение семи лет ГОСТ 10 528—69, среди которых точные — НЗ, НС4, технические — НТ, НТС.

В шифрах этих приборов: Н — нивелир; цифры указывают класс нивелирования, для которого он предназначен; Т — пред-

назначение нивелира для технического нивелирования; С означает самоустановку линии визирования.

С 1 января 1977 г. введен новый государственный стандарт — ГОСТ 10 528—76 «Нивелиры. Общие технические условия». В соответствии с ГОСТом теперь нивелиры выпускают трех типов: Н-05 (высокоточные), Н-3 (точные) и Н-10 (технические). В основу шифра нивелиров положена средняя квадратическая ошибка (0,5; 3; 10 мм) измерения превышения на 1 км двойного нивелирного хода (подобная система шифров в течение многих лет успешно применяется в ГДР).

Нивелир каждого из трех типов может выпускаться в двух исполнениях — с цилиндрическим уровнем при трубе или с компенсатором углов наклона. Кроме того, нивелиры Н-3 и Н-10 могут выпускаться с лимбами для измерения горизонтальных углов. При наличии компенсатора и лимба в шифр прибора вводят дополнительно буквы «К» и «Л», например Н-10КЛ.

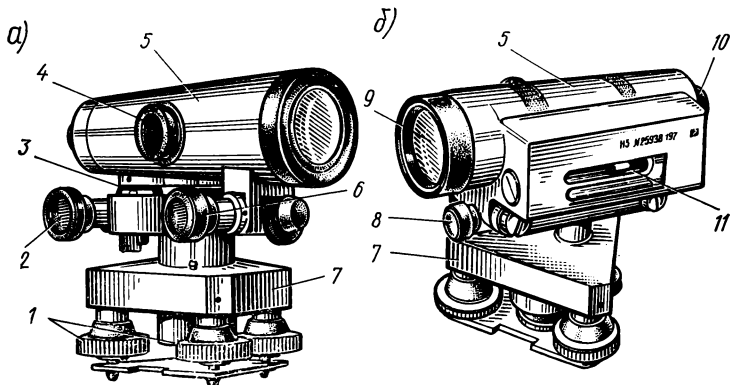


Рис. V.3. Точный нивелир Н-3:

а — вид со стороны круглого уровня; *б* — вид со стороны цилиндрического уровня; 1 — подъемные винты; 2 — элевационный винт; 3 — круглый уровень; 4 — кремальера; 5 — корпус зрительной трубы и контактного цилиндрического уровня; 6 — винт наводящего устройства; 7 — трегер; 8 — винт закрепительного устройства; 9 — объектив; 10 — окуляр; 11 — контактный цилиндрический уровень

НИВЕЛИР Н-3 по ГОСТ 10 528—76 (рис. V.3) — точный глухой, с цилиндрическим уровнем и элевационным винтом. Он является модификацией выпускавшегося в течение многих лет и широко распространенного нивелира НВ-1.

Нивелир Н-3 обеспечивает выполнение геометрического нивелирования со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км нивелирного хода и предназначен для нивелирования III и IV классов, а также для инженерно-геодезических работ при изысканиях и строительстве. Ниже приведены технические данные нивелира Н-3:

Увеличение зрительной трубы, крат	30
Угол поля зрения трубы:	
по вертикали	1°20'
по горизонтали	0°55'
Коэффициент нитяного дальномера	100
Наименьшее расстояние визирования, м	2
Цена деления:	
контактного цилиндрического уровня (на 2 мм), с	15
круглого (установочного) уровня (на 2 мм), мин	10
Температурный диапазон работы прибора, °С	—40 ÷ +50
Масса нивелира, кг	2,0

Основанием нивелира служит трегер 7 с тремя подъемными винтами 1. Подъемные винты упираются в прорези треугольной пружинящей пластинки с резьбовой втулкой для станového винта, которым инструмент прикрепляют к штативу.

Зрительная труба и контактный цилиндрический уровень 11 жестко скреплены между собой и имеют общий корпус 5, вращающийся вокруг вертикальной оси. После грубой наводки на рейку положение зрительной трубы фиксируют винтом 8 закрепительного устройства и, сфокусировав вращением кремальеры 4 изображение рейки, уточняют наведение с помощью винта 6 наводящего устройства.

Элевационным винтом 2 зрительную трубу вместе с цилиндрическим уровнем можно наклонять в небольших пределах в вертикальной плоскости.

Со стороны окуляра коробка цилиндрического уровня закрывается подвижной крышкой, под которой находятся два горизонтальных и два вертикальных юстировочных винта, крепящих торцовую часть оправы цилиндрического уровня. С помощью этих винтов посадку цилиндрического уровня на инструменте при необходимости можно изменять, добиваясь параллельности оси уровня визирной оси зрительной трубы.

Приведение нивелира в рабочее положение (установку оси вращения нивелира в отвесное положение) выполняют подъемными винтами 1 по круглому уровню 3. Перед отсчетом по рейке наблюдатель, глядя в окуляр зрительной трубы, следит за положением пузырька цилиндрического уровня и вращением элевационного винта 2 выводит пузырек в нуль-пункт, т. е. приводит в контакт изображения половинок противоположных концов пузырька в поле зрения трубы (рис. V.4).

НИВЕЛИР Н-10Л по ГОСТ 10 528—76 — малогабаритный, глухой, с контактными цилиндрическим уровнем и элевационным винтом, снабжен лимбом для измерения горизонтальных углов (рис. V.5). Прототип этого прибора — технический нивелир НТ, выпускавшийся с 1970 г. по ГОСТ 10 528—69. Нивелир Н-10Л обеспечивает выполнение технического нивелирования со средней квадратической ошибкой порядка 6—8 мм на 1 км нивелирного хода. Он может быть использован при инженерно-геодезических изысканиях для нивелирования трасс сооружений линейного типа,

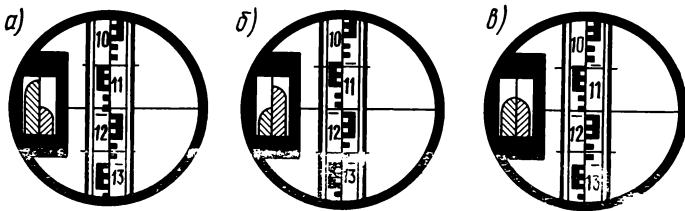


Рис. V.4. Поле зрения зрительной трубы нивелира НЗ при положении пузырька цилиндрического уровня вне нуль-пункта (а, б) и в нуль-пункте (в)

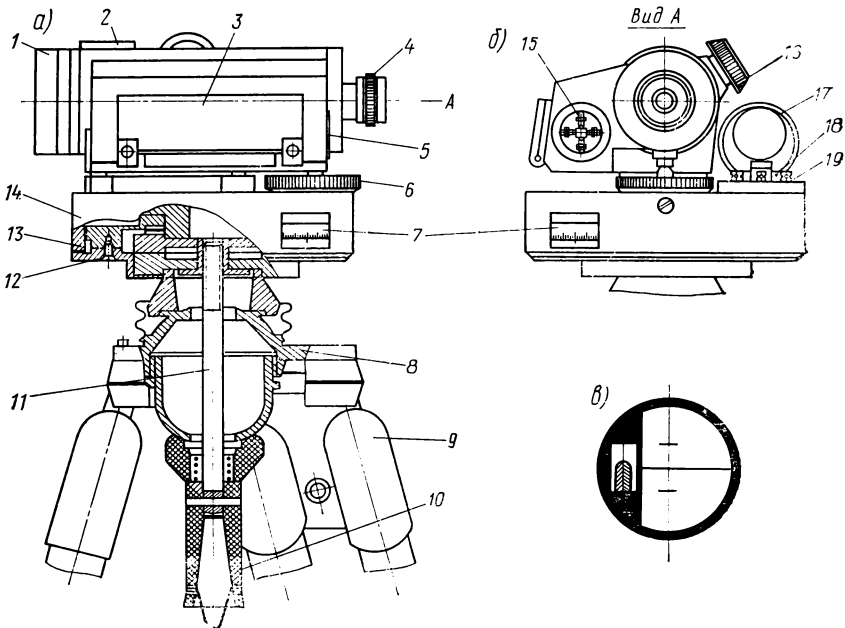


Рис. V.5. Технический нивелир Н-10Л:

а — вид сбоку; б — вид со стороны окуляра; в — поле зрения зрительной трубы; 1 — зрительная труба; 2 — мушка; 3 — откидное зеркало; 4 — окуляр; 5 — крышка, закрывающая юстировочные винты цилиндрического уровня; 6 — элевационный винт; 7 — окошко для отсчетов по лимбу; 8 — шаровая пята; 9 — штатив; 10 — рукоятка становой винта; 11 — становой винт; 12 — винты, скрепляющие подставку с корпусом; 13 — лимб горизонтального круга; 14 — кожух; 15 — юстировочные винты цилиндрического уровня; 16 — кремальера для внутренней фокусировки изображения предмета; 17 — зеркало; 18 — круглый уровень; 19 — юстировочные винты круглого уровня

съемки ситуации и слабо выраженного рельефа (на открытой местности), а также при строительстве зданий и сооружений — для вынесения проектных отметок в натуру, для исполнительных съемок и других работ. Ниже приведены технические данные нивелира Н-10Л:

Увеличение зрительной трубы, крат	23
Угол поля зрения трубы:	
по вертикали	1°30'
по горизонтали	0°55'
Кэффициент нитяного дальномера	100
Наименьшее расстояние визирования, м	1,5
Цена деления:	
лимба	1°
контактного цилиндрического уровня (на 2 мм), с	45
круглого (установочного) уровня (на 2 мм), мин	10
Температурный диапазон работы нивелира, °С	—40 ÷ +50
Масса нивелира, кг	1,0

Нивелир имеет ряд конструктивных особенностей, главная из которых — отсутствие трегера с подъемными винтами. Для установки нивелира на станции по круглому уровню 18 служит шаровая пята 8 на головке специального штатива 9, на которой закрепляют нивелир. Приводя нивелир в рабочее положение, вывинчивают на 1—1,5 оборота становой винт 11 и, наклоняя нивелир рукояткой 10, приводят пузырек круглого уровня в нуль-пункт.

В последнее время промышленность освоила выпуск нивелира Н-10Л с новой, более удобной системой горизонтирования прибора. Эта система впервые была применена в строительном нивелире Ni 050, выпускаемом народным предприятием «Карл Цейсс» (Йена, ГДР). Установка оси вращения нивелира в отвесное положение осуществляется вращением двух рычажков в основании прибора за счет изменения взаимного положения соприкасающихся между собой клиновидных металлических дисков. Нивелир с такой системой горизонтирования может устанавливаться на любой штатив отечественного производства.

Лимб 13 горизонтального круга, отсчеты по которому берут с точностью до десятых долей градуса через окошко 7 в кожухе, позволяет измерять этот нивелир и для приближенного измерения углов. Используя лимб и нитяной дальномер зрительной трубы нивелира, можно полярным способом фиксировать плановое положение нивелируемых точек, что позволяет применять нивелир для съемки ситуации и слабо выраженного рельефа взамен тахеометра.

Зрительная труба нивелира — с внутренней фокусировкой 16, дает обратное изображение. Труба вращается по азимуту на 360°. Обычных закрепительного и наводящего винтов нивелир не имеет, труба наводится на рейку от руки. Для поворота трубы берутся за кожух 14 и, преодолевая фрикционное трение осевой пары, визируют поверх удлиненной мушки 2, устанавливая трубу в нужном направлении.

Пузырек контактного цилиндрического уровня приводят в нуль-пункт элевационным винтом 6, расположенным между зрительной трубой и основанием прибора; изображение половинок противоположных концов пузырька передается в поле зрения трубы (рис. V.5, в). Цилиндрический уровень снабжен юстировочными винтами 15 (под крышкой 5).

Нивелир прост в обращении и удобен. В процессе работы при переходах со станции на станцию нивелир со штатива не снима-

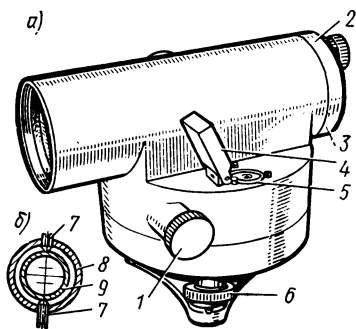


Рис. V.6. Точный нивелир Н-ЗК (а) и поперечный разрез окулярной части трубы (б):

1 — винт наводящего устройства бесконечной наводки; 2 — плоская гайка; 3 — предохранительный колпачок; 4 — откидное зеркальце; 5 — круглый уровень с тремя юстировочными винтами; 6 — подъемный винт; 7 — юстировочные винты сетки нитей; 8 — оправка окуляра; 9 — диафрагма сетки нитей

ют. При необходимости ножки штатива сдвигают и с помощью ремня нивелир со штативом переносят за спиной.

НИВЕЛИР Н-ЗК по ГОСТ 10528—76 (рис. V.6) — точный, с самоустанавливающейся линией визирования, предназначенный для нивелирования III, IV классов и технического, а также для инженерно-геодезических работ при изысканиях и строительстве зданий и сооружений. Нивелир позволяет выполнять геометрическое нивелирование со средней квадратической ошибкой 3—4 мм на 1 км двойного хода. Ниже приведены технические данные нивелира Н-ЗК:

Увеличение зрительной трубы, крат	30
Угол поля зрения трубы	1°20'
Коэффициент нитяного дальномера	100
Наименьшее расстояние визирования, м	2
Цена деления круглого (установочного) уровня (на 2 мм), мин	10
Диапазон работы компенсатора, мин	±16
Время затухания колебаний чувствительного элемента компенсатора, с	1
Ошибка самоустановки линии визирования в горизонтальное положение, с	0,4
Средняя квадратическая ошибка определения превышения на станции при расстояниях до реек 75 м	не более 1,5 мм
Температурный диапазон работы нивелира, °С	—40 ÷ +50
Масса нивелира, кг	1,8

По внешнему виду и конструкции нивелир Н-ЗК подобен своему прототипу — нивелиру НС 4, который с 1970 г. выпускался серийно в соответствии с ГОСТ 10 528—69 Харьковским заводом маркшейдерских инструментов и предназначался для нивелирования IV класса и технического. В связи с повышением чувствительности компенсатора и усовершенствованием технологии изготовления в 1974 г. было разрешено выпускать этот нивелир в двух вариантах — как точный нивелир НС 3 для нивелирования III класса и как точный нивелир НСК 4 (рис. V.7) с горизонтальным кругом.

Нивелир Н-ЗК (см. рис. V.6) устанавливают в рабочее положение (до диапазона действия компенсатора) подъемными винтами 6 по круглому уровню 5, наблюдая за положением его пузырька в откидное зеркальце 4. Подъемные винты нивелира имеют укрупненный шаг резьбы, что позволяет приводить нивелир в рабочее положение с минимальной затратой времени.

Нивелир Н-ЗК не имеет закрепительного винта. При грубом наведении трубы на рейку она достаточно легко вращается рукой и надежно фиксируется в нужном направлении. Изготовление цилиндрической оси и втулки из одного и того же металла исключило заклинивание оси при низких температурах. Точное наведение трубы нивелира на рейку выполняют вращением одной из двух головок винта 1 наводящего устройства бесконечной наводки, расположенных с обеих сторон инструмента и позволяющих выполнять наведение как правой, так и левой рукой.

Зрительная труба нивелира Н-ЗК — ломаная (перископическая) с внутренней фокусировкой. Оптическая схема трубы приведена на рис. V.8, а. Компенсатор нивелира — призмный оптико-механического типа. Подвижная призма 1 компенсатора подвешена на четырех скрещенных нитях (на рисунке показаны две нити, закрепленные на корпусе трубы в точках А и В и на призме в точках D и E). Демпфирование — воздушное. Коэффициент механической компенсации $K_m = 3$.

Элементарная теория компенсатора может быть представлена так. Пусть отрезок ОК (рис. V.8, а, б) визирного луча совпадает с направлением главного горизонтального луча. При этом отражающие грани призмы подвижной 1 и неподвижной 2 располагаются под углом 45° к главному горизонтальному лучу и центру С сетки нитей соответствует правильный отсчет П по нивелирной рейке. При наклоне зрительной трубы под углом α (предполагается, что она наклоняется вокруг оптического центра объектива О) центр сетки нитей смещается в положение С₁, и при отсутствии компен-

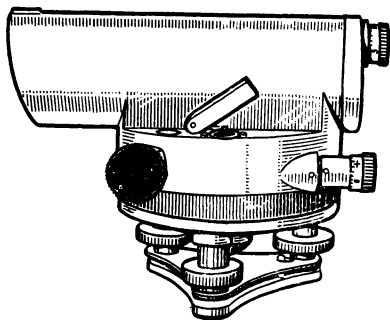


Рис. V.7. Точный нивелир НСК-4 с горизонтальным кругом

сацией по рейке был бы взят ошибочный отсчет Π_1 . Перемещение центра сетки нитей составляет отрезок

$$\overline{CC_1} = f\alpha, \quad (V.11)$$

где f — эквивалентное фокусное расстояние объектива.

Для компенсации возникающей ошибки нужно, чтобы изображение правильного отсчета Π переместилось на отрезок $\overline{CC_1}$ в новое положение центра сетки нитей C_1 .

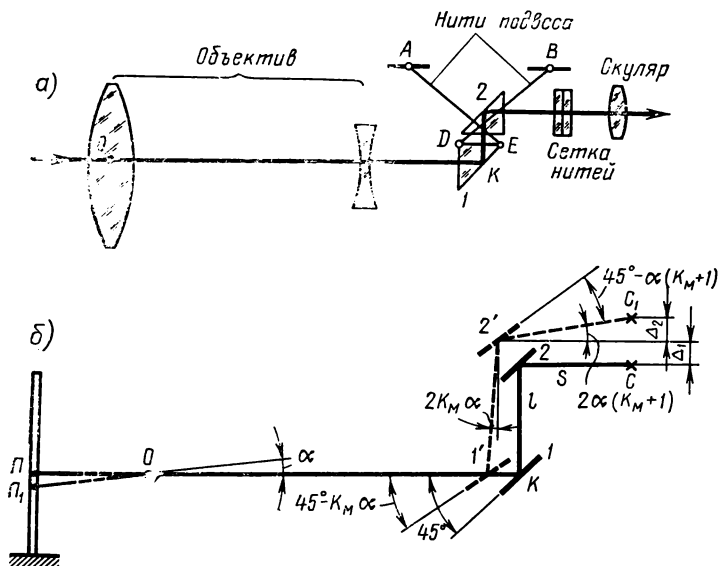


Рис. V.8. Принципиальная схема работы компенсатора нивелира Н-3К:

a — оптическая схема зрительной трубы; b — ход лучей при горизонтальном и наклонном положениях зрительной трубы нивелира

При наклоне трубы на угол α отражающая грань призмы 1 наклонится на угол $K_M\alpha$ и займет положение $1'$. Отражающая грань призмы 2 наклонится на угол α в направлении, противоположном наклону призмы 1 , и займет положение $2'$. Полагая, что из-за малости угла наклона α изменение расстояния l и S мало, можно принять, что смещение центра сетки нитей по вертикали

$$\Delta_1 = 2lK_M\alpha, \quad (V.12)$$

где l — расстояние по лучу между отражающими гранями призм 1 и 2 (рис. V.8); $2K_M\alpha$ — угол между отвесной линией и визирным лучом на участке между призмами 1 и 2 при наклонном положении нивелира.

Смещение

$$\Delta_2 = 2S\alpha(K_M + 1), \quad (V.13)$$

где S — расстояние по лучу между отражающей гранью призмы 2 и сеткой нитей.

Для компенсации необходимо выполнение условия $\overline{CC}_1 = \Delta_1 + \Delta_2$, или

$$f\alpha = 2lK_m\alpha + 2S\alpha(K_m + 1), \quad (V.14)$$

откуда

$$K_m = (f - 2S) / [2(l + S)]. \quad (V.15)$$

Далее, задаваясь параметрами f , S и l , находят геометрические размеры подвески по формуле (V.10).

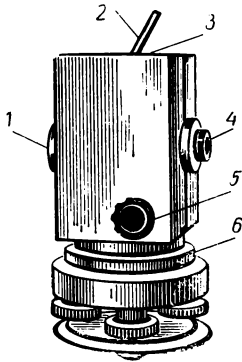


Рис. V.9. Технический вид нивелира Н-10КЛ:

1 — объектив; 2 — откидное зеркальце-крышка; 3 — круглый уровень; 4 — окуляр; 5 — маховичок фокусирующего устройства; 6 — лимб

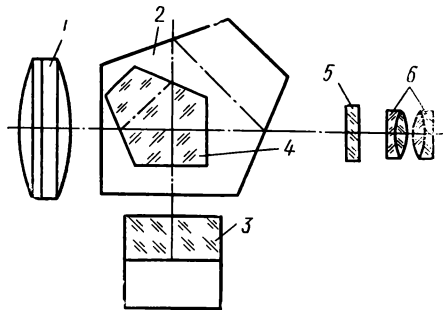


Рис. V.10. Оптическая схема нивелира Н-10КЛ

Для предохранения от обрыва нитей подвески компенсатора последний снабжен ограничителем.

Диафрагма 9 сетки нитей (см. рис. V.6, б) крепится в окулярной части зрительной трубы двумя вертикальными юстировочными винтами 7, с помощью которых сетку при необходимости можно смещать в вертикальной плоскости вверх или вниз. На рис. V.6, а эти винты, как и крепежные винты окуляра, крепящие его в торце корпуса трубы, закрыты предохранительным колпачком 3, который можно легко снять, если свинтить плоскую гайку 2.

Высокое качество изображения, малая зависимость положения линии визирования от температурных воздействий, быстрое и надежное демпфирование обеспечивают необходимую точность измерений и значительное повышение производительности труда.

НИВЕЛИР Н-10КЛ по ГОСТ 10528—76 (рис. V.9) — малогабаритный технический, с самоустанавливающейся линией визирования, снабжен лимбом для измерения горизонтальных углов; со-

гласно ГОСТ 10528—69 изготовлялся под шифром НТСК. Нивелир обеспечивает выполнение геометрического нивелирования со средней квадратической ошибкой не более 10 мм на 1 км двойного нивелирного хода. Ниже приведены технические данные нивелира Н-10КЛ:

Увеличение зрительной трубы, крат	20
Угол поля зрения трубы	1°30'
Наименьшее расстояние визирования, м	2
Цена деления:	
лимба	1°
круглого уровня (на 2 мм), мин	10
Диапазон работы компенсатора, мин	±15
Масса нивелира, кг	1,5

Компенсатор нивелира состоит из двух пентапризм 2 и 4 (рис. V.10), склеенных между собой и укрепленных неподвижно на мостике, наглухо скрепленном с корпусом зрительной трубы, и прямоугольной равнобедренной призмы 3. Призма 3 заключена в подвижную прямоугольную рамку, подвешенную на двух свободно посаженных шарикоподшипниках.

Пучок лучей света, пройдя объектив 1, попадает на отражающие грани большой пентапризмы 2 и, изменив направление на 90°, поступает на прямоугольную призму 3, являющуюся чувствительным элементом компенсатора. Двукратно отразившись в ней, луч попадает на малую пентапризму 4 и, вторично повернув в ней на 90°, проходит через стеклянную пластинку сетки нитей 5 в окуляр 6.

Место подвески чувствительного элемента компенсатора выбрано так, что оптическое расстояние от главной задней плоскости объектива до призмы 3 равно оптическому расстоянию от этой призмы до сетки нитей. Поэтому, учитывая (V.3) и (V.4), угловой коэффициент компенсации можно выразить соотношением $K = =f/(f/2) = \beta/\alpha = 2$, где β — угол отклонения визирной линии компенсатором; α — угол наклона зрительной трубы.

Прямоугольная рамка, в которую заключена призма 3, может перемещаться в специальных салазках в вертикальной плоскости сверху вниз и снизу вверх при вращении маховичка 5 (см. рис. V.9) фокусирующего устройства зрительной трубы. За счет изменения положения подвижной призмы и осуществляется фокусировка зрительной трубы. Поскольку при перефокусировке 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 условие компенсации не нарушается. Колебания подвижной призмы компенсатора гасятся воздушным демпфером.

Зрительная труба нивелира дает прямое изображение; все детали ее, соприкасающиеся с воздухом, просветлены. Вся зрительная труба, включая компоненты компенсатора и все другие оптические детали, заключена в термостатирующий кожух, защищаю-

щий ее от температурных воздействий. Сетка нитей, установленная в окулярной части трубы, снабжена юстировочными винтами.

Лимб 6 (см. рис. V.9) нивелира можно переставлять вращением головки винта с накаткой, расположенного в нижней части прибора. Наводящее устройство у нивелира отсутствует, зрительную трубу наводят на рейку вращением от руки.

Установку нивелира в рабочее положение (до диапазона действия компенсатора) выполняют подъемными винтами по круглому уровню 3. Последний снабжен юстировочными винтами.

§ V.5. ПОВЕРКИ И ЮСТИРОВКИ НИВЕЛИРОВ

У самоустанавливающихся нивелиров в лабораторных условиях на специальном оборудовании исследуют диапазон действия компенсатора, точность самоустановки линии визирования в горизонтальное положение и другие технические характеристики. Необходимость эпизодического (раз в год в начале полевого сезона) выполнения этих исследований связана с «вековым старением» деталей компенсатора, изменением длины и упругости нитей подвеса, смещением центра тяжести подвешенного элемента из-за проникновения и оседания пыли, влаги и т. п.

Нивелирам с компенсаторами присущи незначительные систематические ошибки, обусловленные невыполнением главного условия — горизонтальности луча визирования. Но и после выполнения главного условия имеют место его нарушения при наклонном положении оси вращения нивелира; эта ошибка, называемая *недоили перекомпенсацией*, в общем случае несимметрична относительно наклона нивелира вперед и назад или влево и вправо. Так как установка нивелира на станции в рабочее положение производится по круглому уровню, ось которого из-за малой установочной базы (расстояния между юстировочными винтами) при тряске и вследствие других причин изменяет свое положение, то одно из основных условий исключения заметных систематических ошибок — ежедневное независимое приведение оси круглого уровня в положение, параллельное оси вращения нивелира. В процессе работ, особенно при проложении ходов, пузырек круглого уровня следует приводить в нуль-пункт возможно точнее.

Далее рассматриваются поверки, выполняемые в полевых (эксплуатационных) условиях. Под поверками подразумевают комплекс действий, контролирующих выполнение условий, которым должен удовлетворять прибор для геометрического нивелирования. При поверках уровенных нивелиров контролируют соблюдение в основном геометрических условий, которым должно удовлетворять взаимное положение основных осей прибора. Работая же с самоустанавливающимися нивелирами, дополнительно делают поверки, контролирующие работу компенсатора. Поверки производят в определенной последовательности: юстировка прибора, выполняемая после каждой очередной поверки, делает возможным произвести следующую поверку.

1. *Ось круглого (установочного) уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира.* Тремя подъемными винтами или с помощью рычажков клиновидно-дисковой системы (у нивелира Н-10Л) пузырек круглого уровня приводят в нуль-пункт. Прицелившись поверх трубы и заметив на ее продолжении неподвижную точку какого-нибудь предмета, верхнюю часть нивелира поворачивают вокруг его оси на 180° . Если при этом пузырек останется в центре окружности на коробке уровня, то условие соблюдено.

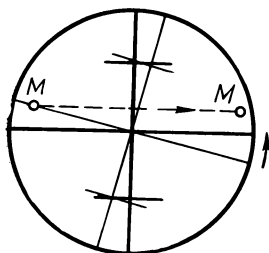


Рис. V.11. Проверка отсутствия перекоса сетки нитей; стрелкой показана величина поворота сетки при юстировке

При смещении пузырька более чем на $\frac{1}{4}$ деления производят юстировку: действуя юстировочными винтами уровня, смещают пузырек в сторону нуль-пункта на половину дуги отклонения. С помощью подъемных винтов (или клиновидно-дисковой системы) пузырек доводят до нуль-пункта (перемещая на вторую половину дуги отклонения) и вновь поворачивают трубу на 180° , т. е. повторяют поверку. Обычно поверку и юстировку повторяют два-три раза до выполнения условия с точностью до $0,1-0,2$ деления. Тщательность этой юстировки особенно необходима для нивелиров с компенсаторами.

2. *Сетка нитей должна быть установлена без перекоса, т. е. горизонтальная нить сетки нитей должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения нивелира.*

Один из способов — простой и надежный — проверки соблюдения этого условия состоит в следующем. Вращением трех подъемных винтов или с помощью клиновидно-дисковой системы нивелир по уже отъюстированному круглому уровню приводят в рабочее положение (ось вращения нивелира — в отвесное) и на краю поля зрения трубы замечают какую-либо неподвижную точку, изображение *M* (рис. V.11) которой попало на среднюю горизонтальную нить сетки. Плавно вращают трубу в горизонтальной плоскости. Если при этом нить сетки не сходит с изображения точки (точка *M* скользит по горизонтальной нити), проверяемое условие соблюдено. При выявлении перекоса сетки нитей у нивелира Н-3 со зрительной трубы снимают окуляр, после чего сетку нитей поворачивают за счет эллиптичности отверстий для винтов, крепящих оправу сетки в корпусе трубы.

У нивелиров Н-10Л, НС4, Н-3К и Н-10КЛ юстировку производят без снятия окуляра: снимают только предохранительный колпачок (см. рис. V.6, а) и, ослабив крепежные винты окуляра, поворачивают его вместе с сеткой нитей до нужного положения.

Следует иметь в виду, что в заводских условиях эта проверка выполняется очень тщательно, и правильность установки сетки нитей обычно гарантируется заводом-изготовителем. Поэтому к выполнению юстировки сетки следует прибегать лишь в случаях

действительной необходимости, так как точная установка сетки является весьма трудоемкой операцией.

3. *Компенсатор самоустанавливающегося нивелира должен быть исправен.* Приведя нивелир в рабочее положение по круглому уровню и взяв отсчет по рейке, установленной в 40—50 м от инструмента, поворачивают один из подъемных винтов, расположенный в направлении наблюдаемой рейки. Этот поворот винта, придающий наклон нивелиру, должен быть по возможности резким, но небольшим (пузырек круглого уровня должен остаться внутри большо́й окружности, награвированной на стеклянной стенке ампулы). Изменение отсчета в первый момент, легкое дрожание сетки нитей и затем восстановление первоначального отсчета (в течение 1—2 с) свидетельствуют о нормальной работе компенсатора.

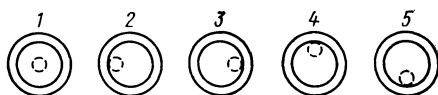


Рис. V.12. Положения пузырька круглого уровня при выявлении недо- или перекомпенсации

В случае обнаружения его неисправности нивелир следует сдать в мастерскую по ремонту геодезических инструментов.

4. *Компенсация углов наклона оси вращения самоустанавливающегося нивелира должна быть полной.* Эту поверку, при которой выявляется недо- или перекомпенсация, выполняют измерением превышения способом «из середины». Целесообразно выбирать линию с небольшим превышением, менее 1 м. На концах нивелируемой линии забивают колья с ровно спиленными торцами или металлические костыли и ставят на них рейки. Нивелир устанавливают в створе линии на равных расстояниях от реек (допускается неравенство плеч не более 1 м) и выполняют наблюдения пятью сериями.

В каждой серии определяют превышение по одной стороне рейки при отвесном положении оси вращения нивелира (пузырек круглого уровня в нуль-пункте) и при наклонах трубы вперед, назад, вправо и влево на предельный угол α компенсации; при этом руководствуются положением пузырька уровня (рис. V.12), учитывая цену деления последнего. Начиная очередную новую серию, изменяют высоту нивелира.

Нивелиры, которые будут использоваться для нивелирования III класса, должны поверяться при длине визирного луча 50 и 100 м. Нивелиры, используемые только для нивелирования IV класса и технического, достаточно поверить на одной линии длиной 200 м при расстояниях до реек по 100 м.

Из всех серий вычисляют средние значения превышения, полученные при положениях пузырька круглого уровня 1, 2, 3, 4, 5. По отклонениям средних значений превышения h_α , найденных при наклонах зрительной трубы на угол α , от среднего значения h_0 , полученного нивелированием при отвесном положении оси вращения нивелира, можно вычислить систематическую ошибку компенсации на $1'$ наклона оси вращения нивелира:

$$\Delta\alpha'' = (h_\alpha - h_0)\rho'' / (2l\alpha),$$

где $\rho'' = 206\,265''$ — радиан в секундах; l — длина визирного луча, мм; α — угол наклона оси вращения нивелира, мин.

Из наблюдений при четырех различных наклонах трубы вычисляют среднее по абсолютной величине значение систематической ошибки компенсации, которое согласно ГОСТ 10528—76 не должно превышать $0,3''$ на одну минуту наклона оси вращения нивелира типа Н-3К и $0,5''$ — нивелиров типа Н-10К.

В табл. V.1 дан пример вычисления среднего значения ошибки компенсации для нивелира НС4 при продольных и поперечных наклонах зрительной трубы в пределах $\alpha = \pm 15'$ (диапазон работы компенсатора).

Таблица V.1

I, м	Измеренное превышение, мм				Ошибка компенсации				
	h_0	h_α				продольный наклон		поперечный наклон	
		продольный наклон		поперечный наклон		вперед	назад	лево	право
		вперед	назад	лево	право				
50	-1030,5	-1031,8	-1029,5	-1029,3	-1031,3	-0",18	+0",14	+0",16	-0",11
	$h_\alpha - h_0$	-1,3	+1,0	+1,2	-0,8				

$$\Delta\alpha_{\text{ср}}'' = \sum |\Delta\alpha''| / 4 = 0,15''$$

Практически средние значения превышения, полученные при положениях пузырька круглого уровня 2, 3, 4 и 5, не должны отличаться от среднего значения превышения, найденного при положении 1, больше чем на 3 мм при нивелировании III класса и на 5 мм при нивелировании IV класса и техническом. Например, при продольном наклоне $+10'$ получили значение превышения $+1,271$ м, при продольном наклоне $-10'$ — значение $+1,279$ м; при положении пузырька уровня в нуль-пункте превышение равно $+1,275$ м. Такой нивелир нельзя использовать при нивелировании III класса, но можно применять при нивелировании IV класса и техническом. При проверке другого нивелира были получены, соответственно, следующие значения превышения: $-1,710$ м, $-1,724$ м и $-1,716$ м. Этот нивелир нельзя применять не только для нивелирования III класса, но и для нивелирования IV класса и даже технического нивелирования; он должен быть направлен в мастерскую для юстировки компенсатора.

Описанную поверку делают раз в несколько месяцев. Следует иметь в виду, что всякая попытка юстировки компенсатора в поле приведет только к дальнейшему ухудшению работы нивелира.

5. При работе на станции визирный луч нивелира должен быть горизонтален, т. е. угол i (рис. V.13) должен быть равен нулю или не должен превышать $10''$. Это главное условие нивелиров. У нивелиров с цилиндрическими уровнями для его соблюдения необходимо, чтобы ось цилиндрического уровня была параллельна визирной оси зрительной трубы (для уровненных нивелиров главное условие обычно так и формулируют).

При выполнении этой проверки могут быть применены различные способы*. Однако для самоустанавливающихся нивелиров, особенно с перископической зрительной трубой, целесообразно применять способы, исключающие необходимые измерения высоты инструмента, так как обычно рекомендуемый способ измерения высоты по рейке, прислоненной к окуляру и рассматриваемой через объектив, для нивелиров с ломаными трубами неприменим.

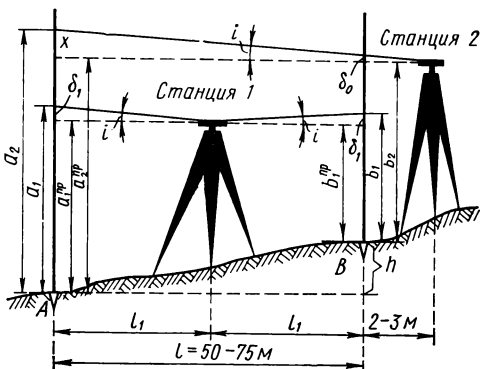


Рис. V.13. Проверка главного условия нивелиров

При нивелировании III, IV классов и техническом угол i , как правило, не вычисляют, ограничиваясь нахождением линейной величины ошибки x из-за несоблюдения в нивелире главного условия**.

Рекомендуемый нами способ проверки состоит в двойном нивелировании линии длиной $l=50\div 75$ м (рис. V.13), на концах A и B которой забивают металлические костыли или деревянные колья с вбитыми в торец гвоздями и ставят на них нивелирные рейки. На станции I нивелир устанавливают в створе линии на равных расстояниях l_1 от реек и, приведя нивелир в рабочее положение, берут отсчеты a_1 по задней и b_1 по передней рейкам. При проверке нивелиров Н-3 и Н-10Л перед каждым отсчетом пузырек цилиндрического уровня тщательно приводят в нуль-пункт с помощью элевационного винта.

Полученные на станции I отсчеты a_1 и b_1 будут отличаться от правильных a_1^{np} и b_1^{np} на одну и ту же погрешность δ_1 , так как угол i между визирным лучом и линией горизонта постоянен, а расстояния от нивелира до реек равны. Следовательно, значение

* Рытов А. В. О способах определения угла i нивелира. — Геодезия и картография, 1972, № 4.

** Руководство по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. Высотные сети. — М.: Недра, 1976.

превышения, найденное из наблюдений на станции 1, будет правильным:

$$h = a_1 - b_1 = (a_1^{\text{нп}} + \delta_1) - (b_1^{\text{нп}} + \delta_1) = a_1^{\text{нп}} - b_1^{\text{нп}}. \quad (\text{V.16})$$

На станции 2 нивелир устанавливают за передней рейкой на наименьшем расстоянии визирования (2—3 м) и берут отсчеты a_2 по дальней и b_2 по ближней рейкам. Отсчет b_2 по ближней рейке считают практически безошибочным, так как его ошибкой δ_0 можно пренебречь по малости расстояния от нивелира до рейки. Это позволяет предвычислить правильный отсчет

$$a_2^{\text{нп}} = b_2 + h \quad (\text{V.17})$$

по дальней рейке, соответствующий горизонтальному положению визирного луча, и сравнить с ним фактически произведенный отсчет a_2 .

Ошибка, вызываемая несоблюдением главного условия нивелира,

$$x = a_2 - a_2^{\text{нп}} \quad (\text{V.18})$$

не должна превышать по абсолютной величине 4 мм.

При необходимости можно вычислить и угловую величину ошибки $i = (x/l) \rho''$.

В случае несоблюдения главного условия у нивелиров Н-3 и Н-10Л с цилиндрическим уровнем юстировку главного условия выполняют за счет изменения посадки этого уровня на инструменте. Вращая элевационный винт (см. рис. V.3, а и V.5, а, б), устанавливают среднюю горизонтальную нить сетки на предвычисленный отсчет $a_2^{\text{нп}}$; при этом пузырек цилиндрического уровня сойдет с нуля-пункта, оптический контакт изображений половинок концов пузырька нарушится. Ослабив с помощью шпильки боковые юстировочные винты цилиндрического уровня, находящиеся под крышкой в торцовой части коробки уровня (см., например, 15 на рис. V.5, б), вертикальные вращают в противоположные стороны, добиваясь контакта изображений половинок концов пузырька и следя за тем, чтобы отсчет по рейке оставался равным $a_2^{\text{нп}}$. После этого боковые юстировочные винты затягивают до упора.

У нивелиров Н-3К и Н-10КЛ с компенсаторами при юстировке вращают юстировочные винты 7 сетки нитей (см. рис. V.6, б), смещая среднюю горизонтальную нить сетки на отсчет $a_2^{\text{нп}}$. Для контроля поверку обязательно повторяют.

Пример V.1. На станции 1 $a_1 = 1065$ мм, $b_1 = 0843$ мм, откуда $h = a_1 - b_1 = 1065 - 0843 = +0222$ мм.

На станции 2 $a_2 = 1307$ мм, $b_2 = 1067$ мм и $a_2^{\text{нп}} = b_2 + h = 1067 + 0222 = 1289$ мм. Тогда

$$x = a_2 - a_2^{\text{нп}} = 1307 - 1289 = +18 \text{ мм} > 4 \text{ мм}.$$

Поскольку x оказался более 4 мм, среднюю горизонтальную нить сетки надо установить (у нивелиров Н-3 и Н-10Л — элевационным винтом; у нивелиров Н-3К и Н-10КЛ — юстировочными винтами сетки) на отсчет $a_2^{\text{нп}} = 1289$ мм.

§ V.6. НИВЕЛИРЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ

Все вышеописанные инструменты для геометрического нивелирования, несмотря на их достоинства, обладают и рядом существенных недостатков, ограничивающих применение геометрического нивелирования. Оптические нивелиры требуют прямой видимости между инструментом и нивелируемыми точками, хорошей освещенности нивелирных реек. На некоторых строительных объектах эти нивелиры неприменимы из-за громоздкости реек и отсутствия свободных удобных площадок для установки нивелира и работы наблюдателя. К тому же приборы для геометрического нивелирования имеют предел фокусировки зрительной трубы, составляющий обычно 2—3 м, что делает их непригодными для работы в тесных закрытых помещениях. Даже при самых благоприятных условиях работы оптические нивелиры подвержены разъюстировкам, что заставляет постоянно выполнять довольно сложные поверки. Наконец, результаты геометрического нивелирования искажаются влияниями рефракции, которые учесть крайне трудно.

От этих недостатков свободны гидростатические и гидромеханические нивелиры. Не требуя сложных поверок, они просты в обращении и обеспечивают быстрое определение превышения. Гидростатическое нивелирование, кроме того, дает широкие возможности автоматизации измерений и получения непрерывной информации о высотном положении наблюдаемых объектов. В последние годы гидростатические нивелиры применяют:

- при нивелировании фундаментов и монтаже крупногабаритного оборудования;

- для контроля укладки крупных блоков, перемычек и панелей междуэтажных перекрытий;

- при устройстве облицовки, при отделочных и архитектурных работах;

- при работах по укладке полов и монтаже внутреннего сантехнического оборудования;

- при монтаже оборудования и трубопроводов в котельных и промышленных цехах;

- для измерения отклонений от горизонтальности и прямолинейности направляющих большой длины;

- при монтажных работах на строительстве шахт и метро;

- при наблюдениях за осадками и деформациями опор мостовых кранов, опор транспортных мостов и других сооружений, подвергающихся действию динамических нагрузок, а также за осадками зданий и сооружений, особенно таких уникальных, как ускорители заряженных частиц;

- при строительстве самотечных канализационных коллекторов с малыми уклонами;

- при передаче высот через крупные водные преграды.

Нивелирование с помощью жидкости, свободная поверхность которой всегда устанавливается нормально к направлению силы тяжести и в сообщающихся сосудах располагается на одном уровне,

независимо от массы жидкости и поперечных сечений сосудов, зародилось в глубокой древности. Более 2,5 тыс. лет назад трассирование канала, соединяющего Средиземное и Красное моря, выполнялось с помощью хоробата — переносного вытянутого желоба, наполненного водой, свободная поверхность которой использовалась для построения горизонтального луча зрения.

На основании основного уравнения гидростатики

$$p = p_0 + \gamma z \quad (V.19)$$

величина p гидростатического давления в какой-либо точке M (рис. V.14, а) жидкости с объемным весом γ определяется давлением

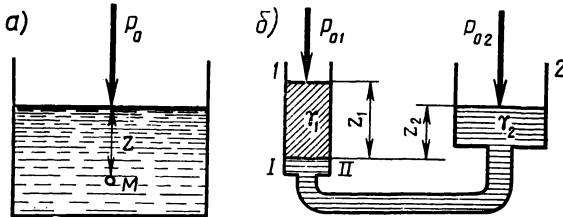


Рис. V.14. Гидростатическая система:
а — к определению гидростатического давления в точке M ;
б — сообщающиеся сосуды

ем p_0 над поверхностью жидкости и глубиной z погружения этой точки. Следовательно, в покоящейся жидкости давление во всех точках одной и той же уровневой поверхности одинаково.

Пусть имеются два сообщающихся сосуда 1 и 2 (рис. V.14, б), заполненных жидкостями с различными значениями γ_1 и γ_2 объемного веса; давления на поверхностях жидкостей в сосудах соответственно p_{01} и p_{02} . Если z_1 и z_2 — высоты свободных поверхностей жидкостей над поверхностью $I—II$ их раздела в одном из сосудов, то, в соответствии с основным уравнением гидростатики, гидростатическое давление в плоскости $I—II$

$$p = p_{01} + \gamma_1 z_1. \quad (V.20)$$

С другой стороны, учитывая глубину z_2 погружения поверхности $I—II$ под уровнем жидкости в сосуде 2, получим:

$$p = p_{02} + \gamma_2 z_2. \quad (V.21)$$

Приравняв правые части (V.20) и (V.21), найдем уравнение равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах:

$$p_{01} + \gamma_1 z_1 = p_{02} + \gamma_2 z_2, \quad (V.22)$$

из которого следует, что при равенстве давления $p_{01} = p_{02}$ на свободных поверхностях жидкостей в сосудах $\gamma_1 z_1 = \gamma_2 z_2$, откуда

$$\gamma_1 / \gamma_2 = z_2 / z_1. \quad (V.23)$$

Если сосуды заполнены однородной жидкостью с одинаковыми значениями объемного веса ($\gamma_1 = \gamma_2$), то поверхности жидкости в этих сосудах устанавливаются на равных высотах $z_1 = z_2$, отсчитываемых в данном случае от любой произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения, и могут служить при нивелировании горизонтальной визирной плоскостью.

Простейший гидростатический нивелир — трубчатый, состоящий из двух стеклянных цилиндрических сосудов, соединенных жесткой трубкой. Нивелир заполняют какой-либо подкрашенной жидкостью примерно до половины высоты сосудов. Визируя по поверхности жидкости на установленные на нивелируемых точках рейки с делениями, производят отсчеты по ним, как при геометрическом нивелировании, но невооруженным глазом. Такой прибор не поверяют и не юстируют. Единственное требование к нему заключается в том, чтобы сосуды были чистыми и не слишком узкими (8—10 мм) во избежание явления капиллярности, вызывающего ошибки измерений. Точность трубчатого нивелира весьма низка, вследствие чего в настоящее время его применяют крайне редко.

В современных гидростатических нивелирах сосуды соединяются не жесткой трубкой, а гибким шлангом; сами сосуды выполняются в виде заключенных в металлическую оправу стеклянных цилиндров с миллиметровыми шкалами на стенках. В течение последних четырех десятилетий техника гидростатического нивелирования развивается в трех направлениях:

а) разработка переносных высокоточных приборов для измерения небольших превышений при наблюдениях за осадками зданий и промышленных сооружений, а также при монтаже технологического оборудования и исследовании сдвижения горных пород;

б) конструирование переносных гидростатических нивелиров средней точности с повышенным диапазоном измерений;

в) создание стационарной аппаратуры для наблюдения за деформациями крупных сооружений, тектоническими движениями земной коры, для передачи высот через крупные водные преграды и т. п.

Для определения превышения h гидростатическим нивелиром (рис. V.15, а) надо знать относительные высоты z_{1A} над точкой A и z_{2B} над точкой B уровня жидкости в измерительных головках (сосудах). Тогда превышение h между точками A и B может быть найдено по формуле

$$h = z_{1A} - z_{2B}. \quad (V.24)$$

В соответствии с рисунком, выполненным применительно к последним моделям гидростатических нивелиров, в которых нулевой штрих располагается в верхней части нанесенной на стенке сосуда шкалы*, получим:

* При отсутствии шкалы на стенке стеклянного цилиндра измерительным устройством нивелира фиксируется условный нуль, относящийся также к верхней части сосуда.

$$h = (s_1 - \mathcal{Z}_{\text{пр}}) - (s_2 - \Pi_{\text{пр}}),$$

или

$$h = (\Pi_{\text{пр}} - \mathcal{Z}_{\text{пр}}) - (s_2 - s_1), \quad (\text{V.25})$$

где $\mathcal{Z}_{\text{пр}}$ и $\Pi_{\text{пр}}$ — отсчеты, фиксирующие уровень жидкости в заднем и переднем сосудах при их прямом положении (1→2); s_1 и s_2 — высоты нулевых штрихов измерительных шкал над опорными плоскостями сосудов.

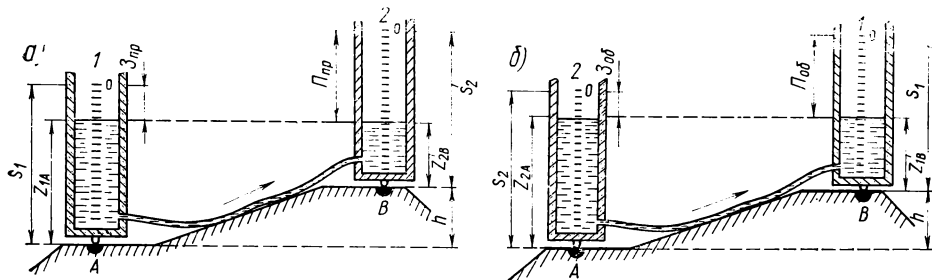


Рис. V.15. Определение превышения переносным гидростатическим нивелиром со взаимной перестановкой сосудов:

a — при прямом; *b* — при обратном положении сосудов

Для конкретной пары сосудов разность высот ($s_2 - s_1$) их «нулей» — величина постоянная, называемая *местом нуля гидростатического нивелира*. Обозначим

$$s_2 - s_1 = MO \quad (\text{V.26})$$

и формулу для определения превышения перепишем в виде

$$h = (\Pi_{\text{пр}} - \mathcal{Z}_{\text{пр}}) - MO. \quad (\text{V.27})$$

Если в (V.27) подставить значение $h=0$, то станет ясно, что место нуля представляет собой разность отсчетов уровня жидкости в сосудах при установке их на горизонтальной поверхности.

В уравнении (V.27) два неизвестных — h и MO , для отыскания которых необходимо иметь второе уравнение. При работе с переносными гидростатическими нивелирами его можно получить, поменяв сосуды местами (рис. V.15, б). Тогда, взяв отсчеты \mathcal{Z}_{06} и Π_{06} , фиксирующие уровень жидкости в заднем и переднем сосудах при их обратном положении (2→1), можем записать: $h = z_{2A} - z_{1B} = (s_2 - \mathcal{Z}_{06}) - (s_1 - \Pi_{06})$, или

$$h = (\Pi_{06} - \mathcal{Z}_{06}) + (s_2 - s_1), \quad (\text{V.28})$$

а с учетом (V.26)

$$h = (\Pi_{06} - \mathcal{Z}_{06}) + MO. \quad (\text{V.29})$$

Суммируя и вычитая выражения (V.27) и (V.29), получим:

$$h = \frac{(P_{\text{пр}} - Z_{\text{пр}}) + (P_{\text{об}} - Z_{\text{об}})}{2} = - \frac{(Z_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}) + (Z_{\text{об}} - P_{\text{об}})}{2}; \quad (\text{V.30})$$

$$MO = \frac{(P_{\text{пр}} - Z_{\text{пр}}) - (P_{\text{об}} - Z_{\text{об}})}{2} = - \frac{(Z_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}) - (Z_{\text{об}} - P_{\text{об}})}{2}. \quad (\text{V.31})$$

Нетрудно представить, что для гидростатических нивелиров, шкалы которых имеют нулевой штрих в нижней части сосуда, при прямом положении (1→2) измерительных головок выражение (V.24) раскрывается в виде: $h = (s_1 + Z_{\text{пр}}) - (s_2 + P_{\text{пр}})$. Перегруппировав члены последнего уравнения и воспользовавшись принятым ранее обозначением [см. (V.26)], запишем:

$$h = (Z_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}) - MO, \quad (\text{V.32})$$

а после взаимной перестановки сосудов — при их обратном положении (2→1):

$$h = (Z_{\text{об}} - P_{\text{об}}) + MO. \quad (\text{V.33})$$

Из совместного решения уравнений (V.32) и (V.33) получим формулы для вычисления значений превышения и места нуля:

$$h = \frac{(Z_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}) + (Z_{\text{об}} - P_{\text{об}})}{2}; \quad (\text{V.34})$$

$$MO = \frac{(Z_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}) - (Z_{\text{об}} - P_{\text{об}})}{2}. \quad (\text{V.35})$$

К настоящему времени создано немало конструкций гидростатических нивелиров различных устройств и назначений, а следовательно, и точностей. Точность гидростатического нивелира определяется применяемым способом фиксации уровня жидкости в сосудах и возможностями учета (или исключения влияния) изменений условий внешней среды.

Способов фиксации и отсчета уровня жидкости известно много. Наиболее же широко применяют сейчас визуальный, контактно-визуальный, электроконтактный и другие способы с различными их разновидностями.

В самом простом случае фиксация уровня жидкости в стеклянных трубках нивелира выполняется визуально — взятием отсчета на глаз по шкале, нанесенной на стенке самой трубки (рис. V.16, а), против менисковой поверхности жидкости. Поскольку обычно применяемые жидкости — смачивающие, поверхность жидкости в трубке представляет собой вогнутый мениск; по самой низкой точке менисковой дуги и берут отсчет с ошибкой ± 1 мм.

Точность визуального способа повышается до $\pm 0,5$ мм, если отсчет производить по шкале, расположенной рядом с трубкой, фиксируя уровень жидкости при помощи передвижной рамки 1 (рис. V.16, б) с прорезанной щелью 2 и индексом на продолжении ее оси

симметрии. Передвигая рамку по трубке, устанавливают ее так, чтобы нижний край мениска проходил по оси симметрии прореза, после чего против индекса берут отсчет по шкале. Для большего повышения точности индекс может быть заменен верньером.

Визуальный отсчет по нанесенной на трубку шкале может производиться против риски плавающего на поверхности жидкости специальной формы поплавка 3 (рис. V.16, в). В этом случае точность отсчета характеризуется ошибкой $\pm 0,2$ мм.

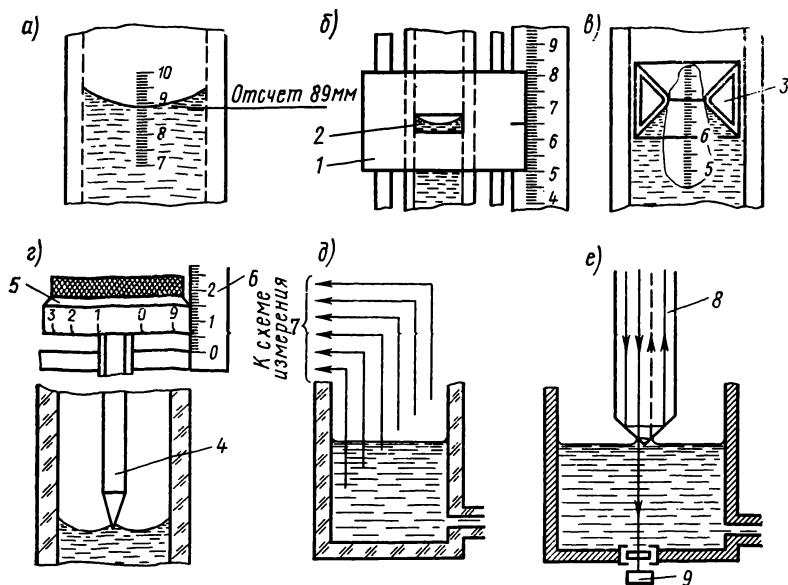


Рис. V.16. Способы фиксации уровня жидкости в сосудах:

а, б, в — разновидности визуального; г — контактно-визуальный; д — электроконтактный; е — опто-электронный; 1 — передвижная рамка; 2 — щель; 3 — поплавок; 4 — микрометрический винт; 5 — барабанчик; 6 — шкала; 7 — контакты; 8 — стеклянный цилиндрический световод; 9 — фотозлемент

При контактно-визуальном способе уровень жидкости фиксируется острием микрометрического винта 4 (рис. V.16, г). Вращая барабанчик 5, микрометрический винт 4 в стеклянном цилиндрическом сосуде плавно опускают сверху и в момент прорыва острием пленки поверхностного натяжения смачивающей жидкости, когда вокруг острия образуется менисковая поверхность, производят отсчет по шкале 6, укрепленной рядом с барабанчиком микрометрического винта. Для удобства шаг винта делают равным 1 мм, а окружность барабанчика разбивают на десять частей, что дает возможность по вертикальной шкале отсчитывать количество целых, а по барабанчику — десятых и сотых долей миллиметра.

Электроконтактный способ заключается в фиксации глубины опускания микрометрического винта от фиксированного «нуля» до

соприкосновения с жидкостью. В момент соприкосновения замыкается электрическая цепь и появляется соответствующий световой или звуковой сигнал. Известны электроконтактные датчики положения уровня жидкости в сосуде как непрерывного действия (из одного подвижного электрода), так и дискретные. Дискретный датчик состоит из большого числа сигнальных устройств в виде контактов 7 (рис. V.16, д), смонтированных последовательно на разных высотах. Расстояние между контактами по вертикали (шаг) зависит от необходимой точности получения информации о положении уровня жидкости.

Оптико-электронный способ регистрации уровня жидкости (рис. V.16, е) состоит в регистрации фотоэлементом 9 светового сигнала, проходящего через жидкость при контакте с ней стеклянного цилиндрического световода 8.

Применение инструментальных контактных способов дает возможность автоматизации определения превышений и дистанционного получения информации о высотном положении контролируемых объектов.

Интересное высокочувствительное устройство для фиксации уровня жидкости, также позволяющее автоматизировать измерения, применено в конструкции гидростатического нивелира для высокоточного нивелирования при установке оборудования, при наблюдениях за осадками и деформациями сооружений*. Чувствительным элементом измерительного устройства, которым снабжается каждый из двух одинаковых сосудов 2 (рис. V.17), соединенных шлангом 1 и заполненных жидкостью, служит груз 3, подвешенный на двойной цилиндрической пружине 4 и погруженный на половину в жидкость. В средней части пружины 4 крепится указатель 5 (например, зеркало или фотоэлемент). Груз 5 изготовлен в виде стержня из материала с удельным весом несколько больше удельного веса жидкости, и в отличие от поплавка, перемещающегося вместе с жидкостью, практически не меняет своего положения.

Изменение уровня жидкости в сосуде на величину Δz вызывает изменение объема погруженной части груза на величину $\Delta V = S \cdot \Delta z$, что влечет за собой изменение выталкивающей силы, а значит, и веса груза на величину

$$\Delta p = \gamma \cdot \Delta V = \gamma S \cdot \Delta z,$$

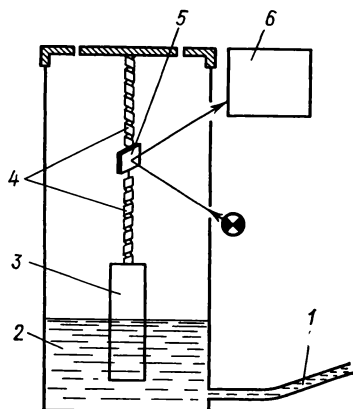


Рис. V.17. Датчик уровня жидкости в виде подвешенного и погруженного в жидкость груза:

1 — шланг; 2 — сосуд; 3 — груз; 4 — двойная цилиндрическая пружина; 5 — указатель; 6 — регистратор

* Гидростатический нивелир/Прихода А. Г., Блюм А. Е., Мозгов А. К., Мовсеян Р. А. Авт. свидетельство СССР № 417683, 1974.

где S — площадь поперечного сечения груза; γ — удельный вес жидкости.

Так как $S = \text{const}$ и $\gamma = \text{const}$, то изменение уровня жидкости в сосуде может быть найдено по формуле

$$\Delta z = \Delta p / (\gamma S).$$

Изменение веса груза преобразуется двойной цилиндрической пружиной 4 с указателем 5 в угол поворота φ , который измеряется регистратором 6. Чувствительность $\Delta\varphi = \varphi / \Delta z$ такого устройства определяется свойствами пружины (соотношением $\varphi / \Delta p$), груза и жидкости (соотношением $\Delta p / \Delta z$), которые могут быть подобраны в различных сочетаниях.

Проанализируем влияние на результаты гидростатического нивелирования изменений условий внешней среды. При нивелировании считается, что поверхность жидкости в сообщающихся сосудах горизонтальна и за время измерений на станции своего положения не изменяет. В действительности же факторы, определяющие равновесие гидростатической системы, в различных ее частях могут быть непостоянны, к тому же непостоянны они и во времени. Неравенство атмосферных давлений на поверхность жидкости в сосудах возможно за счет естественных воздушных течений, особенно при значительных расстояниях между нивелируемыми точками, а при работе в помещении — за счет действия вентиляционных установок. Неравномерный нагрев жидкости в сосудах и различных частях шланга вызывает различие значений объемного веса жидкости в системе. Последнее может быть также из-за неравномерного распределения в жидкости растворенных в ней газов.

С появлением разности $\Delta p_0 = p_{02} - p_{01}$ давлений на свободную поверхность жидкости и разности $\Delta \gamma = \gamma_2 - \gamma_1$ значений ее объемного веса в стремящейся к гидростатическому равновесию системе прибора происходит перераспределение жидкости, вследствие чего разность высот столбов жидкости оказывается искаженной на величину $\Delta z = z_2 - z_1$. На эту же величину искажается и значение измеряемого превышения.

Подставив в (V.22) значение $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_{p.ж}$ объемного веса рабочей жидкости, получим $z_2 - z_1 = (p_{01} - p_{02}) / \gamma_{p.ж}$, найдя, таким образом, ошибку в определении превышения за счет разности давлений на поверхностях жидкости: $\Delta z_p = -\Delta p_0 / \gamma_{p.ж}$.

Выразив разность давлений в миллиметрах ртутного столба, можно записать:

$$\Delta z_p = -(\gamma_{рт} / \gamma_{p.ж}) \Delta p_0. \quad (V.36)$$

Если в качестве рабочей жидкости используется вода, которая почти в 14 раз легче ртути, то отношение значений объемного веса ртути $\gamma_{рт}$ и рабочей жидкости $\gamma_{p.ж}$ равно $\gamma_{рт} / \gamma_{p.ж} = 13,6$. Тогда $\Delta z_p = -13,6 \Delta p_0$, и для исправления результатов нивелирования поправками за разность давлений на поверхностях сосудов разность давлений необходимо измерять с ошибкой не более $\Delta p_0 = \Delta z_p / 13,6$.

Чтобы найти поправку с ошибкой $\pm 0,1$ мм, ошибка измерения

давления не должна превышать $\Delta p_0 = \pm 0,1/13,6 = \pm 0,007$ мм рт. ст. Образовав из пропорции (V.23) производную пропорцию $(z_2 - z_1)/z_1 = (\gamma_1 - \gamma_2)/\gamma_2$ и учитывая, что изменение $(\gamma_2 - \gamma_1)$ значения объемного веса жидкости из-за разности $\Delta t = t_2 - t_1$ ее температур в сосудах подчиняется приближенному равенству $\gamma_2 - \gamma_1 \approx -\gamma_1 \beta_t (t_2 - t_1)$, получим

$$z_2 - z_1 = z_1 \gamma_1 \beta_t (t_2 - t_1) / \gamma_2,$$

где β_t — среднее значение температурного коэффициента объемного расширения жидкости для диапазона температур $\Delta t = t_2 - t_1$.

По малости $\beta_t (t_2 - t_1)$ имеет смысл принять $\gamma_1 \approx \gamma_2$, после чего получим формулу для вычисления ошибки $\Delta z_t = z_2 - z_1$ определения превышения за счет разности $\Delta t = t_2 - t_1$ температур жидкости в сосудах:

$$\Delta z_t = z \beta_t \Delta t, \quad (V.37)$$

где $z = z_1 \approx z_2$ — высота столба * жидкости в системе.

Приняв в (V.37) $z = 1,2$ м и $\beta_{+20^\circ} = 21 \cdot 10^{-5}$ (для воды), получим, что уже при разности температур $\Delta t = 0,4^\circ$ разность уровней жидкости в сосудах составит 0,1 мм. Если же при другом положении шланга высота столба жидкости в системе составит 2,5 м, то ошибка в 0,1 мм появится уже при перепаде температур в системе около $0,2^\circ$.

Самой малорасширяющейся («инварной») жидкостью является вода при температуре около $+4^\circ \text{C}$. С повышением же температуры ее коэффициент объемного расширения увеличивается:

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	. . .	+ 4	+ 5	+ 10	+ 15	+ 20	+ 25
β_t	. . .	0	$+2 \cdot 10^{-5}$	$+9 \cdot 10^{-5}$	$+15 \cdot 10^{-5}$	$+21 \cdot 10^{-5}$	$+26 \cdot 10^{-5}$

Из анализа видно, что высокоточное гидростатическое нивелирование следует выполнять с минимальной высотой z столба жидкости, располагая соединительные шланги по возможности в одной горизонтальной плоскости с измерительными головками. Кроме того, необходимо принимать меры к тому, чтобы в процессе измерений на станции практически не было изменений внешних условий (давления на поверхность жидкости в сосудах и температуры жидкости в системе), поскольку их учет крайне сложен и в стационарной гидростатической системе (с неподвижно закрепленным шлангом), а при работе с переносными нивелирами почти невозможен.

Для высокоточных измерений переносными шланговыми нивелирами применяют двойное нивелирование с взаимной перестановкой сосудов. Эта методика обеспечивает автоматическое исключение влияния места нуля [см. (V.30), (V.31) и (V.34), (V.35)] и ос-

* Для обеспечения «запаса прочности» расчета принято, что поверхность раздела жидкостей с различными значениями объемного веса находится в самом низком месте гидростатической системы.

лабляет температурные ошибки, но малопроизводительна. Поэтому в случаях, когда не требуется особо высокой точности, предварительно определяют величину MO и с учетом ее по формулам (V.27), (V.29) или (V.32), (V.33) выполняют нивелирование в одном направлении (1→2 или 2→1) без перестановок. При нивелировании поверхностей прибегают и к полярному нивелированию от одной исходной точки.

Нивелиры шланговые переносные. Одним из простых и удобных в работе переносных гидростатических нивелиров является разработанный Всесоюзным научно-исследовательским маркшейдерским институтом (ВНИМИ) шланговый технический нивелир НШТ-1, выпускаемый в настоящее время серийно Харьковским заводом маркшейдерских инструментов. Прибор предназначен для измерения превышений в пределах ± 200 мм при нивелировании фундаментов, монтаже конструкций на строительстве шахт и метрополитена, наблюдениях за осадками зданий, мостовых шоп и других сооружений.

Нивелир НШТ-1 представляет собой легкую переносную систему, состоящую из двух одинаковых взаимозаменяемых измерительных головок 1 и 2 (рис. V.18, а), соединенных гибким резиновым шлангом 3 длиной 10 м, внутренний диаметр которого 9 мм. Каждая измерительная головка, присоединяемая к шлангу с помощью штуцера 18 (рис. V.18, б), состоит из стеклянного цилиндра 11 с нанесенной на нем миллиметровой шкалой, заключенного в металлическую оправу 13. Концы стеклянного цилиндра закрываются пробками. Верхняя пробка имеет ручной и автоматический клапаны. Ручной клапан 6 используется для герметизации стеклянного сосуда при транспортировке. Автоматический клапан, состоящий из свинцового грузика 8 и подвешенного к нему на капроновой жилке 9 клапана-поплавка 10, предназначен для свободного пропуска воздуха и для предотвращения выливания жидкости при внезапном повышении ее уровня или в случае опрокидывания сосуда. При повышении уровня жидкости клапан-поплавок 10 всплывает и, прижимаясь выталкивающей силой жидкости к плоским краям отверстия в конусообразной детали 7, герметически перекрывает последнюю.

Верхняя часть металлической оправы оканчивается рамкой 5, в которой на резьбе помещена двусторонняя опорная пятка 4. Если измерительный сосуд надо приставить к нивелируемой точке снизу, используют верхнюю плоскость опорной пятки. При подвеске прибора на стенной репер опирание происходит на нижнюю плоскость пятки 4. Прибор имеет и нижнюю опорную пятку 15 с острием 16 для установки на грунтовые реперы. При необходимости установки прибора на фундаменте или другой поверхности снизу навинчивается вторая пятка 17—плоская.

Расставив измерительные головки на нивелируемые точки, наблюдатели открывают краны 14 и клапаны 6 прибора и, после остановки поплавков 12, одновременно фиксируют глубины жидкости в обоих сосудах, производя отсчеты по красным кольцевым рис-

кам на внешних цилиндрических* поверхностях поплавков. После этого краны и клапаны перекрывают и, протаскивая шланг по грунту, нивелир переносят на следующую станцию, где действуют в такой же последовательности.

Для работы при положительных температурах воздуха система нивелира заполняется дистиллированной или кипяченой мягкой водой. Зимой для работы при отрицательных температурах до -30°C в нивелир заливают какой-либо антифриз — жидкость с низкой температурой замерзания. Наиболее пригодны 20—25%-ный

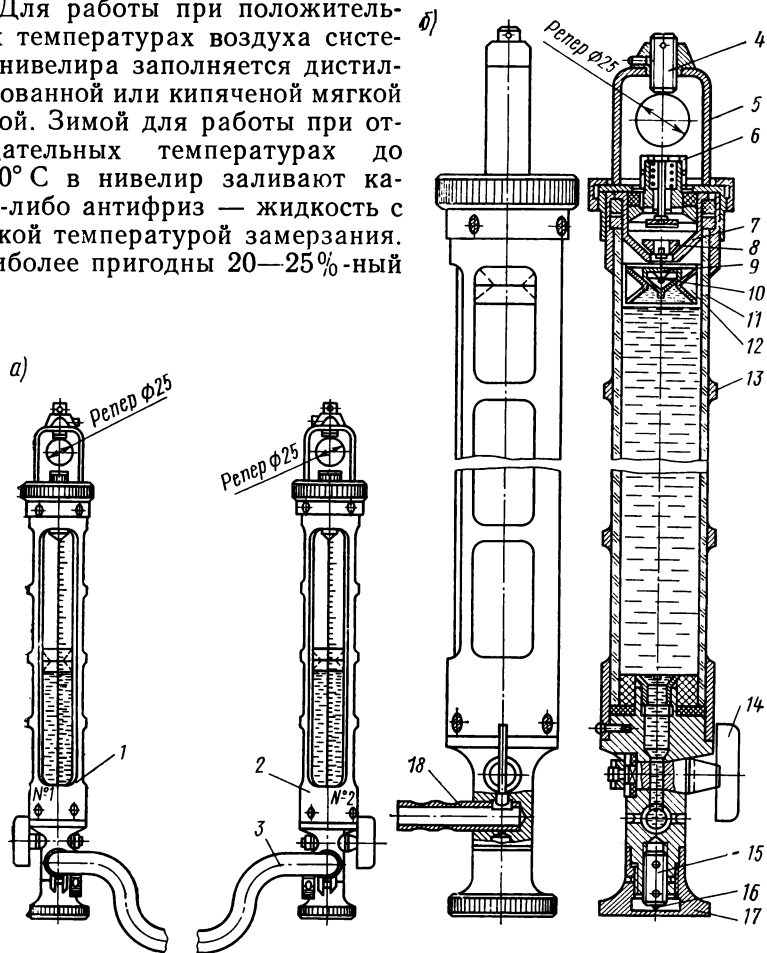


Рис. V.18. Нивелир шланговый технический НШТ-1:

a — общий вид; *б* — измерительная головка; 1 и 2 — одинаковые измерительные головки; 3 — шланг; 4 — верхняя двусторонняя опорная пятка; 5 — рамка; 6 — ручной клапан; 7 — конусообразная деталь; 8 — свинцовый грузик; 9 — капроновая жилка; 10 — клапан-поплавок; 11 — стеклянный цилиндр; 12 — поплавок с кольцевой риской; 13 — металлическая оправа; 14 — кран; 15 — нижняя опорная пятка; 16 — острие; 17 — навинчивающаяся плоская пятка; 18 — шутицер

* Каждый поплавок — пустотелый, кольцевой формы с двусторонним конусообразным сужением центрального отверстия; такая конструкция наилучшим образом обеспечивает пропуск пузырьков воздуха, постоянство высоты поплавка над жидкостью и его остойчивость.

водный раствор хлористого кальция, денатурат, 50%-ный водный раствор ацетона.

По данным Центрогипрошахта, средние квадратические ошибки измерения превышения с помощью нивелира НШТ-1 составляют: двойным нивелированием (со взаимной перестановкой со-

судов), мм	0,6
в одном направлении (без перестановки сосудов) с учетом места нуля, мм	1,0
полярным нивелированием (от одной исходной точки), мм	2,0

Частичное подтверждение этому дают исследования Н. А. Спорышковой*, по результатам которых средняя квадратическая ошибка определения превышения двойным нивелированием составляет примерно 0,5 мм.

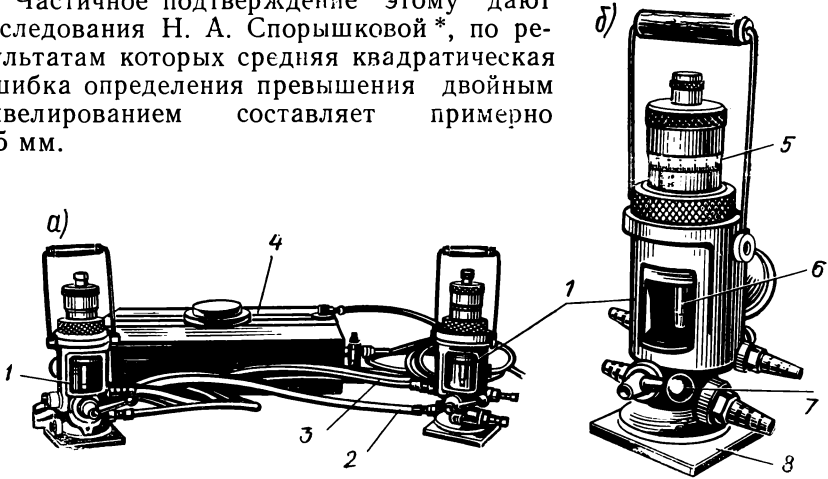


Рис. V.19. Уровень гидростатический — модель 115:

а — общий вид; б — измерительная головка; 1 — стеклянные герметические сосуды; 2 — жидкостный шланг; 3 — воздушный шланг; 4 — бак; 5 — барабан; 6 — микрометрический винт; 7 — кран; 8 — стальная плита

В Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) разработан оригинальный гидростатический нивелир, в настоящее время выпускаемый серийно Московским инструментальным заводом «Калибр» под названием «Уровень гидростатический модели 115». Нивелир предназначен для измерения превышений в диапазоне ± 25 мм при монтаже горизонтальных элементов крупногабаритного оборудования. Гидростатическая система прибора, заполняемая водой, состоит из двух стеклянных герметических сосудов (головок) 1 (рис. V.19), соединенных жидкостным шлангом 2 длиной 6 м. При необходимости головки могут быть присоединены к поставляемому в комплекте с ними специальному баку 4 для воды. Свободные воздушные пространства в верхних частях головок сообщаются воздушным шлангом 3, введенным в конструкцию для выравнивания давлений на поверх-

* Спорышкова Н. А. Гидростатическое нивелирование на строительной площадке. — В сб: Вопросы геодезического контроля инженерных сооружений. Волгоград, 1968.

ностях жидкости в сосудах. Эта конструктивная особенность прибора обеспечивает повышение точности нивелирования.

Установив головки стальными плитами 8 на нивелируемые поверхности, наблюдатели открывают краны 7 и через 2—3 мин, когда колебательный процесс в гидростатической системе прекратится, отсчитывают уровень жидкости в сосудах.

Каждый сосуд, заключенный в бронзовый корпус, сверху герметично закрыт крышкой, сквозь которую проходит микрометричный винт 6 с барабаном 5. Уровень жидкости фиксируют контактно-визуальным способом: визуально уловив момент соприкосновения конусообразного острия микрометричного винта с мениском жидкости, берут отсчет по барабану 5. Шаг резьбы микрометричного винта равен 1 мм, а окружность барабана разделена на 100 делений, так что цена одного деления составляет 0,01 мм. Это позволяет производить отсчет по барабану с точностью до 0,001 мм.

Исследования показали, что в закрытых помещениях с постоянным температурным режимом гидростатический уровень обеспечивает измерение превышения на станции со средней квадратической ошибкой порядка 5—8 мкм*.

В 1964—1966 гг. гидростатический уровень был применен для измерения вертикальных деформаций фундамента и опорных балок линейного ускорителя И-2. Работы производились в помещении; перепад температур воздуха на точках наблюдений был в пределах 0,05—0,07°С. При нивелировании балок высота водяного столба не превышала 0,05 м и средняя квадратическая ошибка определения превышения составила 6,2 мкм. При измерениях же на фундаменте, когда высота столба жидкости достигала 0,5 м, средняя квадратическая ошибка определения превышения оказалась равной 11 мкм. Соотношение приведенных погрешностей объясняется чувствительностью нивелира к изменениям температурных условий [см. (V.37)]. Этот недостаток прибора особенно сильно проявляется при нивелировании на открытых площадках: измерения сопровождаются большими систематическими ошибками. В солнечную погоду результаты нивелирования искажаются столь сильно, что без специальной термозащиты применять прибор для точных измерений не рекомендуется.

Интересная конструкция гидростатического нивелира с упрощенным, но высокоточным регистрирующим устройством, который может применяться при прецизионном монтаже и эксплуатации сооружений, показана на рис. V.20**. Как и прибор ЭНИМС, он состоит из двух сосудов 3, соединенных жидкостным 2 и воздушным 4 шлангами. В жидкостный шланг вмонтировано регистрирующее устройство, устанавливающееся на подставке 1 с тремя подъемными винтами. Главная часть регистрирующего устройства — вмонтированная в жидкостный шланг калиброванная по внутреннему диа-

* Левичук Г. П. О точности гидростатического прибора ЭНИМС. — Тр. МИИГАиК, 1962, вып. 50.

** Визирев Ю. В., Клошин Е. Б., Новак В. Е. Гидростатический нивелир. — Авт. свидетельство СССР № 499494, 1976.

метру прозрачная трубка 5 со шкалой. С помощью груши 7 через ответвление 6 с краном 8 в эту трубку нагнетается небольшое количество воздуха, образующего в жидкости воздушную пробку 9 по всему поперечному сечению трубки. По цилиндрическому уровню 10 трубка 5 приводится в горизонтальное положение, а воздушная пробка 9 выставляется по среднему (нулевому) штриху шкалы.

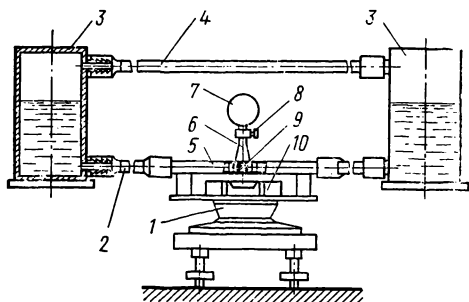


Рис. V.20. Гидростатический нивелир с регистрацией изменения уровня жидкости перемещением воздушной пробки

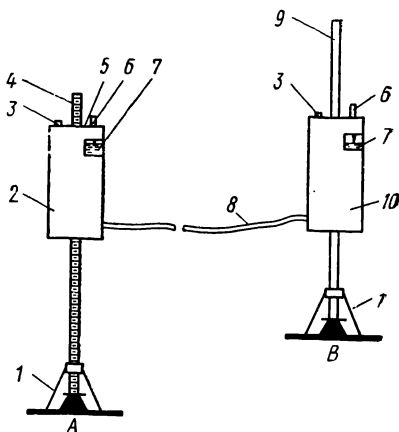


Рис. V.21. Гидростатический нивелир с увеличенным диапазоном измерения превышений

При появлении какого-либо превышения h одного из сосудов относительно другого нарушается гидростатическое равновесие, и жидкость перетекает из одного сосуда в другой до установления равновесия вновь. Объем перетекающей в этом случае жидкости выражается формулой

$$V = h\pi R^2/2,$$

где R — радиус внутреннего поперечного сечения сосуда.

Перетечка жидкости вызывает смещение воздушной пробки относительно нуля-пункта шкалы трубки 5. Выразив тот же объем перетекшей жидкости через смещение n воздушной пробки и радиус r внутреннего поперечного сечения трубки $V = \pi r^2 n$ и приравняв правые части двух последних уравнений $h\pi R^2/2 = \pi r^2 n$, получим

$$h = (2r^2/R^2)n = Kn,$$

где K — коэффициент связи между перемещением пробки и изменением высоты одного из сосудов.

Подбирая соответствующие размеры сосудов и трубки регистрирующего устройства, можно получить требуемое значение коэффициента K . Например, при $R = 100$ мм и $r = 10$ мм $K = 0,02$; следовательно, пробка переместится на величину, в 50 раз большую, чем

изменится высота сосуда, и изменение высотного положения контролируемого нивелиром объекта будет найдено достаточно точно.

Как отмечалось выше, в последнее время предпринят ряд попыток увеличить диапазон превышений, измеряемых гидростатическими нивелирами. Так, в Киевском инженерно-строительном институте разработан широкопредельный высокоточный гидростатический нивелир. В нем используется новый метод измерения — от фиксированной гидростатической плоскости*, — при котором температурная ошибка не зависит от величины измеряемого превышения. Для ее ослабления жидкостный шланг малого диаметра заключен в воздушный шланг большего диаметра и укреплен в нем с помощью повторяющихся диафрагм. Образующийся воздушный промежуток служит термозащитным средством, исключающим скачкообразные перепады температуры жидкости. При испытаниях опытного образца прибора с диапазоном измерения 600 мм средняя квадратическая ошибка определения превышений составила 8 мкм**.

Одним из удачных шагов в этом направлении следует, видимо, признать относительно несложную конструкцию гидростатического нивелира для измерения превышений до 400 мм (рис. V.21)***. Две измерительные головки 2 и 10 нивелира, соединенные полиэтиленовым шлангом 8 длиной 5 м, могут перемещаться по высоте и фиксироваться в нужных положениях на жестких металлических стержнях 4 и 9. Стержень 4, по которому перемещается измерительная головка 2 с помощью микрометричного винта, представляет собой инварную реечку длиной 600 мм. По уровням 3 с помощью опор 1 головки 2 и 10 устанавливаются в отвесное положение. Уровни жидкости в сосудах наблюдают в окошки 7 и фиксируют микрометрами 6.

Поставив измерительные головки на марки *A* и *B* (стержни освобождаются и опускаются), перемещением одной из головок по вертикали устанавливают прибор в диапазон работы микрометра. Вращая микрометричный винт головки 2, сетку нитей визирного устройства 5 совмещают с помощью лупы с каким-либо штрихом инварной реечки. Превышение между марками *A* и *B* равно:

$$h = a + (З - П),$$

где *a* — отсчет по шкале инварной реечки; *З* и *П* — отсчеты по микрометрам измерительных головок.

Чтобы исключить из найденного значения превышения *h* влияние *МО* гидростатического нивелира, превышение можно определить повторно, поменяв местами измерительные головки. Для устранения влияния перепадов давления на поверхности жидкости в сосудах последние могут соединяться воздушным шлангом.

* Назарчук А. А. Метод измерения от фиксированной гидростатической плоскости. — Сб. Инженерная геодезия. — Киев, 1968, вып. 4.

** Ряд исследователей достигнутую точность ставят под сомнение.

*** Уставич Г. А. Применение гидростатического нивелирования для наблюдений за осадками турбоагрегатов. — Геодезия и картография, 1977, № 3.

Производственные испытания опытного образца нивелира выполнялись на верхней плите турбоагрегатов Ермаковской ГРЭС. В качестве рабочей жидкости применялась вода. В условиях вибраций и значительного перепада температур средние квадратические ошибки измерения превышений были в пределах 0,06—0,08 мм.

Из импортных приборов выделяется выпускаемый в ГДР точный гидростатический шланговый нивелир проф. О. Мейссера, из-

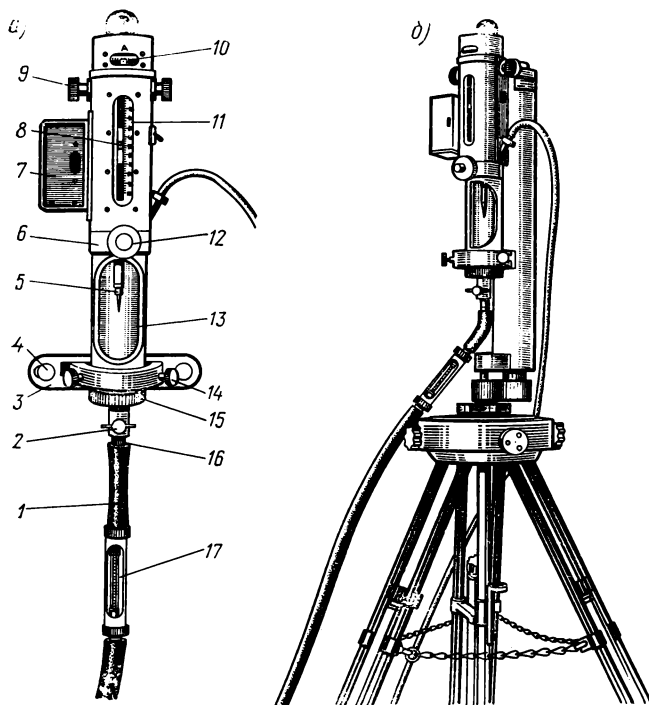


Рис. V.22. Точный гидростатический шланговый нивелир проф. О. Мейссера (прецизионный шланговый ватерпас)
a — общий вид измерительной головки; *б* — измерительная головка, установленная на штативе

вестный также как прецизионный шланговый ватерпас. В закрытых помещениях прибор обеспечивает определение превышений в пределах ± 100 мм со средней квадратической ошибкой 10 мкм.

Народное предприятие «Фрейбергер Прецизионсмеханик», выпускающее этот нивелир, рекомендует применять его для измерений малых осадок сооружений. При этих работах две одинаковые измерительные головки (рис. V.22, *a*) нивелира, соединенные шлангом длиной 30 м с внутренним диаметром 10 мм, навешиваются на специальные стенные реперы, предварительно заложенные в намеченных для наблюдений местах сооружения. Под каждым репером за-

кладывают, кроме того, два анкерных болта *, создавая тем самым для измерительной головки три опорных точки в одной вертикальной плоскости.

Головка нивелира представляет собой стеклянный цилиндр 13 в металлическом корпусе 6, подключаемый к жидкостному шлангу 1 через штуцер 16. Пазом в верхней части корпуса прибор навешивается на стенной репер и закрепляется болтовыми держателями 9. Нижняя часть корпуса обхватывается обоймой 3, закрепляемой на анкерных болтах винтами 4. С помощью установочных винтов 14 измерительной головке по круглому уровню придается отвесное положение и, вращая маховик 12, приводят в движение микрометрический винт 5, опуская его на поверхность жидкости. Контакт острия микрометрического винта с поверхностью воды улавливают визуально или по световому сигналу лампочки индикатора 7. Отсчитывая уровень жидкости, количество целых миллиметров считывают по индексу 8 со шкалы 11, десятые же и сотые доли миллиметра берут по барабану 10.

В нижней части головки имеется кран 2 с уплотняющей гайкой 15, закрывающей стеклянный цилиндр. Для учета изменений температуры рабочей жидкости в шланге под измерительной головкой помещен термометр 17. При нивелировании грунтовых реперов прибор устанавливают на штатив (рис. V.22, б).

Институтом Фундаментпроект этот нивелир применялся на открытом воздухе. Было выполнено нивелирование 11 реперов, заложенных в стены школы. Исследования показали, что при благоприятных условиях наблюдений (в пасмурную погоду) прибор обеспечивает точность прецизионного геометрического нивелирования.

Из переносных гидростатических нивелиров средней точности со значительным диапазоном измерений (несколько метров) отметим двухжидкостные нивелиры К. А. Маружко — ртутно-водяной и видоизмененную конструкцию, в которой вместо ртути используется раствор поваренной соли или хлористого кальция. Такие нивелиры могут быть эффективны при геодезических работах в промышленном, гражданском и дорожном строительстве, при укладке самотечных коллекторов и отрывке оросительных каналов по заданному уклону, при высотной привязке буровых скважин, узлов наземных и подземных коммуникаций, при передаче отметок через преграды (заборы, насыпи и т. п.). В данной книге эти нивелиры не описываются, поскольку известны достаточно давно и подробно освещены в другой геодезической литературе **.

Стационарные гидростатические системы. Для непрерывного наблюдения за осадками фундаментов, вертикальными смещениями подкрановых путей и подобных сооружений значительной протяженности целесообразно использовать стационарную

* Реперы с полированными сферическими головками, анкерные болты и шаблон для разметки отверстий под них поставляются в комплекте с прибором.

** Кавунц Д. Н. Гидростатическое нивелирование на строительной площадке. — М., 1961.

гидростатическую систему, которая в отличие от переносных шланговых нивелиров может состоять не только из двух, но и из большого количества водомерных сосудов. Стационарные системы значительно удобнее и практичнее, так как всегда готовы для наблюдений; большое число наблюдаемых одновременно точек обеспечивает полноту материалов, причем вся система может обслуживаться одним человеком.

Стационарная гидростатическая система состоит из проложенной по периметру сооружения коммуникации — шланга или трубы 1 (рис. V.23), имеющей в наблюдаемых точках выходы (пьезометры) в виде стеклянных водомерных трубок 2 с делениями. Трубки закрепляются на сооружении с помощью различных захватов. В каждом цикле наблюдений отсчитывают уровень жидкости в пьезометрах. Разности Δz этих отсчетов, взятых в различных циклах, характеризуют величины ΔH осадок трубок, т. е.

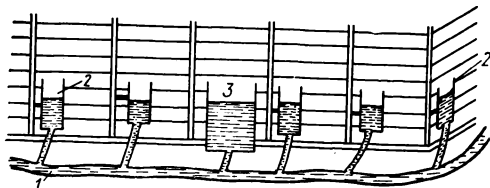


Рис. V.23. Стационарная гидростатическая система для наблюдений за осадками сооружений:

1 — труба; 2 — стеклянные водомерные трубки; 3 — компенсатор

$$\Delta H = \Delta z = z_0 - z_n,$$

где z_0 и z_n — начальный и последующие отсчеты по шкале данного пьезометра.

Вертикальные смещения отдельных трубок влекут за собой перераспределение жидкости в системе. Это должно вызывать изменение начальной отметки уровневой поверхности жидкости, вследствие чего результаты наблюдений на всех точках будут искажены систематической ошибкой. Для устранения этого явления в гидростатическую систему вводят компенсаторы 3 — резервуары значительного объема. При осадках отдельных наблюдаемых точек жидкость из компенсатора переходит в пьезометры, однако, благодаря значительной площади поперечного сечения компенсатора, высота уровневой поверхности жидкости в системе практически остается неизменной.

В 1964 г. стационарную гидростатическую систему применили в Донбассе для измерения вертикальных смещений элементов здания серии 1-480-1гв при его искусственном искривлении путем поддомкрачивания*. В техническом подполье цокольного этажа была смонтирована гидростатическая система из 43 простейших водомерных устройств — стеклянных цилиндров с помещенными в них ме-

* Искусственное искривление путем поддомкрачивания — защитное конструктивное мероприятие, проводимое в отношении зданий, подрабатываемых горными работами. Оно возможно только при условии быстрого и надежного определения величин вертикальных смещений после каждой ступени поддомкрачивания.

таллическими линейками с делениями через 5 мм, отсчеты уровня жидкости по которым производились на глаз. Исследования* показали, что средняя квадратическая ошибка m_h определения превышения между отдельными двумя точками в этом случае составила 0,8 мм. Величина вертикального смещения ΔH элемента поддомкрачиваемого здания вычислялась как изменение его превышения над неподвижной исходной точкой:

$$\Delta H = h_n - h_0,$$

где h_0 и h_n — превышения элемента здания над неподвижной точкой до и после поддомкрачивания.

Средняя квадратическая ошибка определения величины смещения составила 1,2 мм.

Используя пьезометры с делениями через 1 мм и компенсатор правильно подобранных размеров, ошибки измерений смещений водомерных трубок можно снизить до 0,3 мм.

Описанный способ измерения вертикальных смещений можно сделать непрерывным, применив самопишущие приборы.

Гидростатическая система может быть эффективна при горизонтальной передвижке зданий. В этом случае ее целесообразно автоматизировать, оборудовав пьезометры электрическими контактами. При осадке какого-либо элемента здания на величину, близкую к установленному пределу, жидкость будет замыкать электрическую цепь, давая на пульт предупреждающий сигнал.

Современное развитие науки и техники привело к созданию ряда объектов промышленного и научного значения, предъявляющих повышенные требования к точности монтажа, стабильности основания и отдельных элементов оборудования. К таким объектам относятся гигантские электростанции, высотные железобетонные телебашни, радиотелескопы, ускорители заряженных частиц и т. п.

К настоящему времени уже накоплен некоторый опыт применения стационарных гидростатических систем для наблюдения за осадками крупных гидротехнических сооружений. Так, для наблюдений за вертикальными деформациями плотины Красноярской ГЭС были смонтированы стационарные гидростатические системы в семи поперечных галереях и в потерне протяженностью 795 м. Гидростатическая система в потерне, разделенная на десять участков, состоит из нержавеющей труб диаметром около 100 мм, заполненных водой на половину диаметра. Трубы соединены с помощью ниппелей полихлорвиниловыми шлангами, защищенными оцинкованными трубами диаметром 24 мм. Трубы (уровенные и защитные) крепятся к стене потерны с помощью анкеров и специальных хомутиков. Над уровнем трубами укреплены горизонтальные осадочные марки с гнездовыми центрами из нержавеющей стали.

* Кренида Ю. Ф., Лосев Н. Т. Опыт применения гидростатического нивелирования при исследованиях деформаций зданий. — Тр. ВНИИ горной механики и маркшейдерского дела. — Л., 1966, сб. 61.

При измерении вертикальных смещений в гнездовые центры марок вставляют последовательно микроизмеритель, изготовленный из микрометра, и электроконтактным способом измеряют условные высоты марок над уровенной поверхностью жидкости в трубах; контакт щупа микроизмерителя с поверхностью жидкости фиксируется контрольной лампочкой. Превышение какой-либо марки относительно предыдущей находится как разность отсчетов по микроизмерителю на этих марках. Исследования показали, что средняя квадратическая ошибка передачи высот вдоль всей потерны составила 0,08 мм*.

Особенно высокие требования к точности монтажа и, тем более, стабильности технологического оборудования в процессе эксплуатации, предъявляемые на кольцевых ускорителях радиусом в несколько десятков и сотен метров, вызывают необходимость определения высот элементов ускорителя с ошибками всего лишь 50—100 мкм. Эта задача осложняется еще тем, что из-за высокой радиации во время работы ускорителя непосредственное присутствие человека в месте производства измерений невозможно. Поэтому применение для геодезического контроля за положением оборудования весьма трудоемкого прецизионного геометрического нивелирования связано с длительными простоями ускорителя. К тому же, наблюдения, выполняемые методом геометрического нивелирования, дискретны во времени, лишены оперативности и все-таки нуждаются людей находиться в радиационно опасных условиях.

Поставленная задача высокоточного слежения за высотным положением оборудования ускорителей была решена созданием *стационарной гидростатической системы с дистанционным съемом информации*** . Эта система, созданная впервые в СССР и функционирующая ныне на одном из крупнейших в мире Ереванском синхротроне, состоит из 20 измерительных головок, установленных на блоках электромагнита и соединенных шлангом из органического материала длиной 200 м. В качестве рабочей жидкости в гидростатической системе используется глубоко обессоленная и очищенная от газов вода. Для исключения влияния вентиляции на положение уровня жидкости в головках их воздушные объемы соединены в единую систему резиновым шлангом.

Дистанционный съем информации о положении уровня жидкости в измерительных головках обеспечивается фотоэлектрической регистрацией*** контакта с поверхностью жидкости стеклянного

* *Рабцевич И. С.* Гидростатическое нивелирование на плотине Красноярской ГЭС. — Геодезия и картография, 1972, № 8.

** *Васютинский И. Ю., Сальман А. Г.* Система дистанционного съема информации о высотном положении магнитных блоков ускорителей. — Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — М.: ВИНТИ, 1968.

Буюкян С. П., Васютинский И. Ю., Калихов Б. В. Результаты испытаний системы гидростатического нивелирования на Ереванском синхротроне. — Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. наук. — Ереван, 1970, № 1.

*** *Буюкян С. П., Васютинский И. Ю., Давидян Д. Б.* Фоторегистрирующее устройство для измерения уровня жидкости в сосуде гидростатического нивелира. — В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование. М., ЦНИИатоминформ, 1970, № 2.

цилиндрического световода 8 (см. рис. V.16, е). Световод заточен конусообразно под углом 45° , превышающим угол полного внутреннего отражения света в световоде при нахождении его в воздухе. Под слоем жидкости — в основании измерительной головки — установлен фотоприемник 9. В исходном положении, когда световод находится в своем верхнем фиксированном положении над уровнем жидкости, количество света, попадающего на фотоприемник, мало и сигнал с него практически считается нулевым.

По команде «измерения» включается цепь питания электромеханического привода, и световод начинает перемещаться вниз — в направлении к поверхности жидкости; одновременно в верхней части головки загорается электрическая лампочка. При движении световода специальный датчик перемещений формирует импульсы, считаемые пересчетной схемой. В момент соприкосновения конца световода с поверхностью жидкости образуется мениск; при этом лучи света от лампочки, падающие на коническую поверхность световода вне пределов мениска, претерпевают полное внутреннее отражение, а свет, упавший на нее в месте смачивания жидкостью, частично попадает в жидкость и засвечивает фотоприемник 9 (см. рис. V.16, е).

Сигнал с фотоприемника останавливает счет импульсов в пересчетной схеме, и величина перемещения световода определяется по формуле

$$l = \tau n,$$

где τ — цена импульса, соответствующая установленному шагу перемещения световода по высоте; n — число импульсов от начала (фиксированного «нуля») до конца счета.

Исследования показали, что при цене импульса $\tau = 20$ мкм уровень жидкости в измерительных головках фиксируется с точностью 15—20 мкм [3].

Влияния перепадов температуры жидкости на ее уровень в гидростатической системе учитываются с помощью специальных дистанционных термодатчиков.

Вся информация от каждой из двадцати измерительных головок по линии связи передается на пульт управления. На производство полного цикла измерений работающий за пультом оператор (один) тратит не более 25 мин, тогда как для выполнения этих измерений геометрическим нивелированием бригаде из трех человек потребовалось бы 8—9 ч. При этом высотное положение элементов оборудования ускорителя определяется со средней квадратической ошибкой порядка 60 мкм, тогда как средняя квадратическая ошибка получения этой информации методом геометрического нивелирования составляла 118 мкм.

В настоящее время подобных стационарных гидростатических систем с дистанционным съемом информации в СССР действует немало. Например, в 1971 г. при определении вертикальных смещений магнитных блоков вследствие деформаций фундамента кольца

кибернетического ускорителя была испытана система СГН-27Д*. В этой системе девять распределительных коробок, к каждой из которых подключено по три измерительных головки. Каждая головка представляет собой герметичный дюралюминиевый сосуд с датчиком уровня, подобным используемым в гидростатической системе на Ереванском синхротроне. Кроме того, система СГН-27Д включает в себя блок управления, шланги для жидкости, воздушные шланги для выравнивания давления на поверхности жидкости в головках, электрические кабели для соединения датчиков с распределительными коробками и магистральные кабели, соединяющие распределительные коробки с блоком управления. Чувствительность установленной системы оказалась не ниже ± 20 мкм.

В качестве рабочей жидкости использовался 1%-ный раствор формалина в дистиллированной воде. Глубина жидкости в сосудах не превышала 15—20 мм, а общая высота столба жидкости с учетом укладки трубопровода была не более 40—50 мм. Измерения выполняли в утренние часы. Полный цикл измерений, заключающийся в последовательном опросе всех установленных датчиков, занимал 30 мин. Ошибки за счет различия температур на участках кольца ускорителя не превышали 20—30 мкм.

В 1977 г. стационарная гидростатическая система установлена на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне — крупнейшем в мире слабофокусирующем ускорителе заряженных частиц**. Электромагнит ускорителя общей массой 36 тыс. т имеет прямоугольное сечение с размерами $9,6 \times 5,4$ м, а в плане представляет собой кольцо радиусом 28 м, разделенное на четыре квадранта со вставленными между ними восьмиметровыми прямолинейными участками. При реализации первой очереди гидростатической системы на каждый квадрант было установлено по три гидростатических головки с электроконтактной регистрацией положения уровня жидкости. Эти головки расположены под электромагнитом в центрах смотровых каналов фундамента и соединены между собой последовательно. В результате реализации второй очереди системы на каждом квадранте должно быть установлено по шесть измерительных головок: по две на торцах квадранта и по две в его середине.

Измерительная головка содержит электроконтактный конусообразный шток с изолятором на конце***; высота изолятора меньше высоты мениска жидкости в момент контакта штока с уровнем. Перемещение штока осуществляется при помощи электродвигателя и

* Система СГН-27Д для гидростатического нивелирования/*Лаврентьев И. В., Мовсеян Р. А., Таплавилли И. А., Хесед Е. А.* — Геодезия и картография, 1972, № 11.

** Гидростатическая система для контроля высотного положения синхрофазотрона ОИЯИ/*Васютинский И. Ю., Зиновьев Л. П., Карпов И. И.* — Препринт Объединенного института ядерных исследований. — Дубна, 1978.

*** Это новшество в конструкции датчика уровня жидкости исключает пагубное влияние на точность измерений электроэрозии и возможных в условиях ионизированной среды пробоев электричества до момента, когда конец штока придет в контакт с жидкостью.

контролируется датчиком линейных перемещений. Датчик изготовлен на базе индикатора часового типа, в котором стрелка заменена кодирующим диском с 50-ю радиальными прорезями. По разные стороны кодирующего диска расположены осветитель и фотоприемник. При опускании штока мотором датчик линейных перемещений генерирует счетные импульсы, поступающие на вход пересчетной схемы. В момент контакта штока с жидкостью счет прекращается и снимается отсчет, соответствующий положению уровня жидкости.

В качестве рабочей жидкости используется вода с добавлением антисептика.

Измерения выполняются циклами. Систему обслуживает один оператор, затрачивающий на выполнение одного цикла всего 12 мин. Поступающая непрерывно высокоточная информация оперативно обрабатывается по рабочей программе, составленной для ЭВМ БЭСМ-4. По результатам измерений вычисляются вертикальные смещения, общие наклоны электромагнита и каждого квадранта в отдельности.

Описанные стационарные гидростатические системы, применяющиеся при контроле высотного положения элементов технологического оборудования ускорителей, могут быть столь же эффективно использованы на атомных и тепловых электростанциях, гидротехнических сооружениях, а также при монтаже оборудования для производства стекла, бумаги, при слежении за деформациями земной поверхности и в других случаях. Описанная выше система СГН-27Д была успешно применена для определения вертикальных деформаций строящейся плотины Токтогульской ГЭС*.

Передача отметок через глубокие ущелья, котлованы и другие препятствия может осуществляться с помощью *подвесной гидростатической системы* с симметричным профилем. Подвесные гидростатические системы в виде сложных по конфигурации сетей сообщающихся сосудов могут также монтироваться между элементами сооружения, расположенными высоко над поверхностью земли. Такие системы позволяют непосредственно определять превышения между точками сооружения и освобождают исполнителей от необходимости осуществлять каждый раз передачи отметок с одного горизонта на другой, снижающие точность и затягивающие цикл измерений, но неизбежные при геометрическом нивелировании.

В октябре 1969 г. экспериментальную подвесную гидростатическую систему смонтировали в районе Токтогульской ГЭС для определения микросмещений отдельных блоков скального массива [3]. На створе устанавливали параллельно две гидростатические системы, одна из которых заполнялась глубоко обессоленной водой, а другая — денатуратом. В качестве датчиков уровня применяли гидростатические головки УГС модели 115 (см. с. 154), в качестве трубопроводов — полиэтиленовые шланги. Шланговые и кабельные

* Бабаян Г. А., Таплашвили И. А. Гидростатическое нивелирование на плотине Токтогульской ГЭС. — Геодезия и картография, 1975, № 12.

соединения были пакетированы и подвешены горизонтально. Температура жидкости в соединительных трубопроводах измерялась автоматически электронным мостом в комплекте с электрическими термометрами сопротивления, расположенными по створу. Исследования показали необходимость вводить поправки в результаты измерений за неравномерный нагрев и ветровые нагрузки.

Сначала исследовалась стабильность показаний гидростатической системы в условиях, когда ни один из участков системы не освещался солнцем, а скорость ветра была 1,5—2 м/с. Измерения выполнялись утром и вечером в течение нескольких дней. В утренние часы было проведено 28, а в вечерние — 8 циклов, в каждом из которых брали по 5—10 отсчетов во всех головках системы, измеряли скорость ветра, температуру воздуха и жидкости в шлангах. Средняя квадратическая ошибка измерений превышений — по сходимости внутри циклов — в утренние часы составила 0,029 мм, в вечерние — 0,052 мм. Средние квадратические ошибки превышений по сходимости между циклами измерений, выполненных в разные дни, оказались: в утренние часы 0,11 мм, в вечерние — 0,25 мм.

Далее исследовали влияние на систему неравномерного нагрева солнцем; измерения выполняли преимущественно при слабом ветре. Среднее значение превышения, выведенное из 23 циклов наблюдений, отличалось от среднего результата измерений в эксперименте на стабильность показаний системы во времени лишь на 0,1 мм, но средняя квадратическая ошибка превышений, не исправленных за влияние температуры, составила 0,4 мм. Введение соответствующих поправок за температуру жидкости в шланге значительно улучшило сходимость значений превышений. Исследования также показали, что при сильном порывистом ветре амплитуда раскачки пакета соединений может достигать 0,5 м; это вызывает колебания уровня жидкости в головках до 0,2 мм.

Данные исследования на Токтогульской ГЭС были учтены при монтаже в 1972 г. подвесной гидростатической системы на одном из антенных устройств*. Система, состоявшая из пяти измерительных головок и имевшая сложную конфигурацию в виде буквы Г, связывала рабочие точки объекта на высоте 6 м от поверхности земли. Смежные головки соединялись полиэтиленовым шлангом длиной 25 м, заполненным раствором поваренной соли. Воздушные объемы всех головок также были соединены в единую замкнутую систему. Информация с головок о положении уровня жидкости передавалась дистанционно на пульт управления. Горизонтальное положение соединительных шлангов обеспечивалось подвеской к карповому канату, закрепленному на специальных кронштейнах.

При производственных испытаниях ошибки определения превышения одним приемом колебались от 30 мкм (в пасмурную погоду при штиле и слабом ветре) до 130 мкм (в солнечную погоду при сильном ветре).

* *Васютинский И. Ю.* О точности работы подвесной гидростатической системы. — В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1974, вып. 1(8).

Недостатком всех описанных выше переносных гидростатических нивелиров и стационарных систем является непригодность их для измерения больших превышений, при измерении которых уровень рабочей жидкости в одном из сосудов гидростатической системы будет иметь значительную высоту (например, несколько метров или даже несколько десятков метров) и уже незначительный перепад температур жидкости в системе вызовет большие ошибки измерений.

Значительное увеличение диапазона измерений при сохранении высокой точности может быть обеспечено применением *многоярусной гидростатической системы* (рис. V.24), предложенной в Ереванском политехническом ин-те им. К. Маркса*. Каждая пара сообщающихся сосудов 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, снабженных датчиками уровня жидкости, и соединяющий их трубопровод 8 размещены горизонтально; над четным сосудом каждой пары на одной вертикали с ним установлен сосуд следующей пары. Сосуды, размещенные на одной вертикали, жестко соединены между собой стержнями или проволоками 10 заданной длины, изготовленными из инвара или другого материала с малым коэффициентом линейного расширения.

Горизонтальность соединительных трубопроводов обеспечивается креплением их к натянутым между стойками 7 тросам 9 с пружинными вставками (для устранения влияния температурных расширений тросов). Горизонтальное расположение трубопроводов для рабочей жидкости значительно ослабляет влияние перепадов температуры в трубопроводах на разность уровней в сообщающихся сосудах и позволяет ограничить высоту столбов жидкости в пределах нескольких сантиметров, благодаря чему снижаются ошибки из-за неравенства температур в самих сосудах.

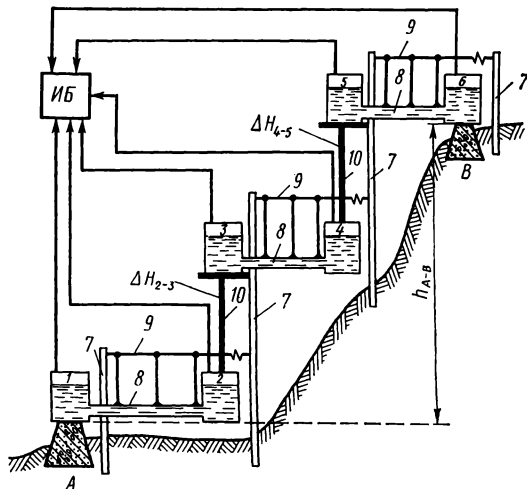


Рис. V.24. Принципиальная схема многоярусной гидростатической системы:

1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 — сообщающиеся сосуды с датчиками уровня жидкости; 7 — стойки; 8 — трубопроводы; 9 — тросы с пружинными вставками; 10 — стержни или проволоки заданной длины

* Мовсисян Р. А., Гарушев Б. Г., Таплашвили И. А. Устройство для определения превышений. — Авт. свидетельство СССР № 369392, 1973.

Измерение превышения h_{A-B} между точками A и B выполняют следующим образом. На основании информации о положении уровня жидкости в сосудах $1-6$, последовательно поступающей в измерительный блок $ИБ$, определяют превышения h_{1-2} между сосудами 1 и 2 , h_{3-4} между сосудами 3 и 4 , h_{5-6} между сосудами 5 и 6 . Общее превышение h_{A-B} между точками A и B равно

$$h_{A-B} = h_{1-2} + h_{3-4} + h_{5-6} + \Delta H_{2-3} + \Delta H_{4-5},$$

где ΔH_{2-3} и ΔH_{4-5} — известные постоянные превышения сосуда 3 над сосудом 2 и сосуда 5 над сосудом 4 , заданные длинами инварных стержней или проволок 10 .

Количество ярусов в подобной гидростатической системе может быть различным в зависимости от величины превышения, которое необходимо измерять. Многоярусную гидростатическую систему можно применять для контроля взаимного положения точек исследуемого сооружения относительно друг друга, а также относительно реперов.

Возможность применения переносных гидростатических нивелиров и стационарных систем в условиях, где затруднительно пользоваться другими приборами, простота конструкций переносных шланговых нивелиров, высокая точность измерений и возможность их автоматизации говорят в пользу широкого внедрения гидростатического нивелирования.

§ V.7. СИСТЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Автоматические системы гидростатического нивелирования, применяющиеся ныне для дистанционного наблюдения за высотным положением фундаментов сооружений и элементов их технологического оборудования, обеспечивают высокую точность измерений, но требуют применения сложной и дорогостоящей аппаратуры, так как каждый сосуд системы должен иметь высокоточное измерительное устройство. Применение такой аппаратуры для массового использования на объектах, где в большинстве случаев достаточно точности измерений с ошибками порядка $0,5-1$ мм, нерентабельно. Поэтому в Ереванском политехническом ин-те им. К. Маркса был разработан новый способ нивелирования — гидродинамическое нивелирование*, отличающийся от гидростатического в первую очередь тем, что измерения выполняются при непрерывном равномерном движении жидкости в сообщающихся сосудах, которое не прекращается и в моменты фиксации ее уровня.

Система для гидродинамического нивелирования состоит из одного измерительного сосуда $ИС$ (рис. V.25, а) с отсчетным устройством и n сосудов с неподвижными штоками — контактными электродами E_1, E_2, \dots, E_n . Все сосуды соединены в единую гидро-

* Мовсисян Р. А., Таплавшили И. А., Варданян В. Н. Способ гидродинамического нивелирования. — Авт. свидетельство СССР № 480906, 1975.

статическую систему однородными трубопроводами постоянного диаметра.

Измерительный сосуд *ИС*, устанавливаемый на репере, имеет площадь внутреннего сечения F в несколько раз больше площади

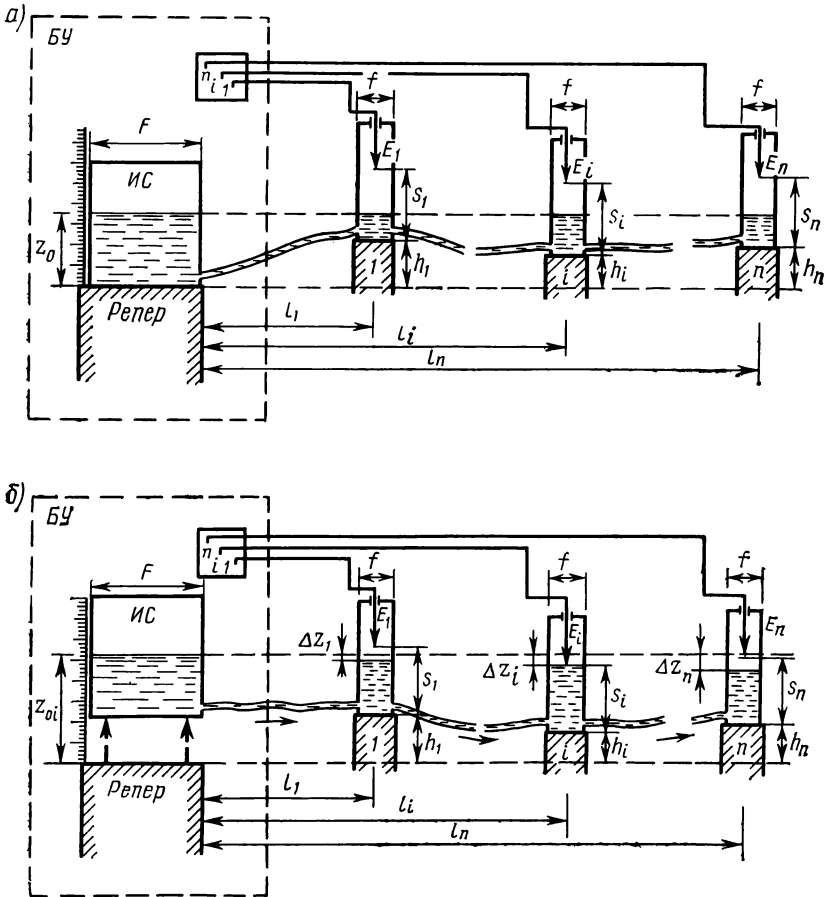


Рис. V.25. Принципиальная схема системы для гидродинамического нивелирования:

а — жидкость в состоянии покоя; *б* — жидкость в непрерывном равномерном движении; Z_0 — исходная высота уровня жидкости в *ИС* в состоянии покоя

внутреннего сечения f остальных сосудов и снабжен устройством для принудительного равномерного изменения уровня жидкости в системе; измерительное устройство позволяет фиксировать уровень жидкости в *ИС* в любой момент времени. Изменение уровня жидкости в системе может осуществляться с помощью электродвигателя плавным погружением в жидкость *ИС* поплавка либо подъемом самого измерительного сосуда.

Остальные сосуды, устанавливаемые на контролируемых нивелировании точках $1, 2, \dots, n$, имеют несложное устройство. Каждый из них изготовлен из стекла; нижняя часть сосуда укреплена в металлическом основании со штуцерами для трубопроводов. В верхней части сосуда установлен неподвижный контактный электрод в виде игольчатого стержня — сигнализатор; обычно во всех сосудах контактные электроды E_1, E_2, \dots, E_n устанавливают на одинаковых высотах $s_1 = s_2 = \dots = s_n = s$. Все контактные электроды соединены проводами с измерительным блоком, находящимся на пульте управления у *ИС*. Так как основания сосудов выполнены из токопроводящего материала и соединены между собой, то при соприкосновении любого из электродов с электропроводной жидкостью, находящейся в сосудах, по цепи на блок управления *БУ* поступает сигнал.

Приступая к нивелированию, измерительному сосуду *ИС* сообщают непрерывный равномерный подъем, вследствие чего жидкость движется по соединительным трубопроводам и в сосудах непрерывно поднимается уровень жидкости. Вначале эти изменения носят неустойчивый характер, но через определенный промежуток времени t_0 процесс стабилизируется и между уровнями в измерительном сосуде и сосудах, установленных на нивелируемых точках $1, 2, \dots, n$, наблюдаются постоянные разности $\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_n$.

В процессе равномерного подъема уровня жидкости в системе наступит момент времени $t_i > t_0$, когда в одном из сосудов (или в нескольких одновременно) поверхность жидкости коснется конца электрода E_i (рис. V.25, б). При этом в блок управления *БУ* поступит сигнал, по которому будет зафиксировано показание z_{0i} счетчика, ведущего измерение высоты уровня в *ИС*. Зная высоту s_i контактного электрода над основанием данного i -го сосуда и высоту z_{0i} уровня жидкости в *ИС* в момент поступления сигнала от электрода E_i , можно вычислить превышение точки i относительно репера:

$$h_i = z_{0i} - (s_i + \Delta z_i).$$

Время t_0 , необходимое для установления в системе стабильного режима равномерного движения жидкости, и поправки Δz за запаздывание уровня жидкости в каждом сосуде предварительно определяют экспериментально или рассчитывают на ЭВМ, учитывая скорость поднятия уровня жидкости в измерительном сосуде, диаметры сосудов и трубопроводов, длины l_1, l_2, \dots, l_n трубопроводов от *ИС* до данного сосуда, вязкость жидкости и т. д.

Так как после контакта с электродом i -го сосуда жидкость в системе продолжает подниматься, исключаются действующие в гидростатическом нивелировании ошибки измерений за счет колебаний уровня жидкости до установления статического равновесия.

При дальнейшем равномерном подъеме уровня жидкости в какой-то момент времени $t_k > t_i$ произойдет контакт ее поверхности с концом электрода в сосуде, установленном на точке k . Превышение между любыми двумя нивелируемыми точками i и k может

быть найдено как разность их превышений относительно репера, на котором установлен *ИС*:

$$h_{ik} = h'_k - h_i = (z_{0k} - z_{0i}) - (s_k - s_i) - (\Delta z_k - \Delta z_i),$$

где z_{0i} и z_{0k} — показания счетчика, фиксирующие высоту уровня жидкости в *ИС* в моменты контакта поверхности жидкости с электродами в сосудах, установленных в точках i и k ; s_i и s_k — известные высоты контактных электродов над основаниями сосудов, установленных в точках i и k ; Δz_i и Δz_k — поправки за запаздывание уровня жидкости в сосудах, установленных в точках i и k .

Если контактные электроды в сосудах установлены на одинаковой высоте над основаниями последних ($s_i = s_k = s$), то $h_{ik} = (z_{0k} - z_{0i}) - (\Delta z_k - \Delta z_i)$.

Исследования* показали, что при 10 и менее сосудах, соединенных друг с другом трубопроводами длиной по 5 м, средние квадратические ошибки определения превышений составляют 0,2—0,3 мм; в системе из 20 сосудов, соединенных трубопроводами длиной по 10 м, ошибки составляют 0,5 мм. Эта точность удовлетворяет требованиям, предъявляемым к наблюдениям вертикальных деформаций таких сооружений, как, например, крупные элеваторы. Производственные испытания системы СГДН-10Д на строящемся элеваторе в г. Минеральные Воды показали, что спустя год после закладки датчиков в фундаменте зернохранилища точность измерения вертикальных смещений контролируемых точек, оцениваемая по разностям двойных измерений, характеризовалась средней квадратической ошибкой 0,21 мм.

На ряде сооружений и объектов, где применение гидродинамического нивелирования также целесообразно, измерения приходится выполнять в условиях различного рода вибраций (например, на гидроэлектростанциях), импульсных нагрузок (на железнодорожных мостах, различных контрольно-измерительных комплексах), из-за чего могут возникать колебания длинного контактного электрода, что вносит ошибки в результаты измерений. Бывает даже, что знакопеременные импульсные нагрузки ломают игольчатые осевые электроды. В таких условиях работы надежность и точность гидродинамического нивелирования снижается.

Для повышения надежности систем гидродинамического нивелирования предложена новая конструкция сосуда-датчика** (рис. V.26), представляющая собой металлический стакан 1 с цилиндрическим удлинителем 2, диэлектрическим изолятором 3, цилиндрическим верхним электродом 4, металлической крышкой 5. Сосуд имеет штуцер 6 воздуховода, переходную втулку 7, контактную контргайку 8. Такие сосуды закрепляют болтами 13 на контролируемых точках объекта и соединяют между собой с помощью штуцеров 11 жидкостными шлангами 12, а через штуцеры

* Мовсесян Р. А., Бабаян Г. А. Гидродинамическое нивелирование при наблюдениях за сооружениями. — Геодезия и картография, 1975, № 7.

** Баранов Л. Н., Таплавшили И. А. Измерительная головка для системы гидродинамического нивелирования. — Авт. свидетельство СССР № 590600, 1978.

6 — воздушными шлангами 9 (для выравнивания давлений на поверхности жидкости в сосудах).

Каждый верхний цилиндрический электрод 4, изолированный от металлической нижней части стакана 1 и его удлинителя 2 диэлектрическим изолятором 3, соединяют изолированным электропроводом с общим измерительным устройством 10. Для электроконтакта цилиндрического электрода 4 используется токопроводящая металлическая крышка 5, переходной втулки воздуховода 7 и контактной контргайки 8. Общим электродом для всех сообщающихся сосудов-датчиков является нижняя часть стакана 1, также соединяемая с измерительным устройством 10.

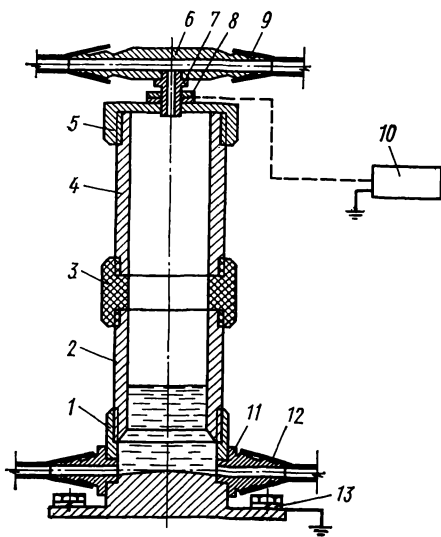


Рис. V.26. Сосуд-датчик для системы гидродинамического нивелирования

Как только уровень жидкости, поднимающийся в сосудах, коснется где-либо токопроводящего цилиндрического электрода 4, происходит автоматическое отключение измерений в данном сосуде. При вибрациях колебания жидкости вносят дополнительные ошибки в измерения, которые также значительно снижаются, благодаря применению контактного электрода в виде полого металлического цилиндра.

Внедрение гидродинамического нивелирования в производство обещает благодаря сравнительно невысокой стоимости аппаратуры значительную экономию средств.

§ V.8. НИВЕЛИРЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ

Значительно позже гидростатического зародилось нивелирование гидромеханическое (гидроанометрическое), при котором превышение находят как функцию избыточного давления или вакуума*, создаваемого столбом жидкости в гидростатической системе:

$$h = f(p). \quad (V.38)$$

Гидромеханическое нивелирование — благодаря значительному диапазону определяемых превышений, быстрой измерений на мест-

* Под *избыточным* будем понимать положительное давление, создаваемое собственным весом жидкости и представляющее собой превышение полного гидростатического давления в жидкости над атмосферным, а под *вакуумом* — разрежение, степень которого выражают, наоборот, как превышение атмосферного давления над гидростатическим.

ности и минимуму необходимых вычислений — является скоростным и по производительности труда в ряде случаев значительно превосходит другие виды нивелирования. В настоящее время известны две принципиальные схемы гидромеханических нивелиров: манометр — компенсатор (тип МК) и манометр — манометр (тип ММ).

Нивелир типа МК (рис. V.27), первая положительная разработка которого в нашей стране была выполнена в Западном геофизическом тресте Министерства геологии РСФСР *, состоит из манометра

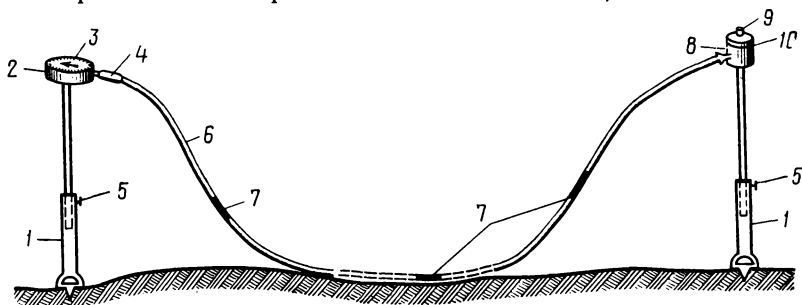


Рис. V.27. Гидромеханический нивелир типа МК:

1 — установочные штыри; 2 — мановакуумметр; 3 — шкала мановакуумметра и стрелка; 4 — арретир; 5 — штифт для фиксации высоты установочного штыря; 6 — шланг; 7 — метровые метки; 8 — компенсатор; 9 — воздушный клапан; 10 — контрольная черта уровня жидкости

вакуумметра 2 или манометра того или иного класса точности и резервуара-компенсатора 8, соединенных между собой полиэтиленовым шлангом 6 малого диаметра длиной 25—50 м. Чувствительный элемент (ЧЭ) мановакуумметра, шланг и компенсатор (не полностью) заполняются рабочей жидкостью. Компенсатор представляет собой сосуд, площадь внутреннего поперечного сечения которого, как и в гидростатическом нивелировании, в несколько раз больше площади внутреннего поперечного сечения шланга, за счет чего возможные значительные изменения объема жидкости в шланге компенсируются ничтожно малыми изменениями высоты уровня жидкости в компенсаторе.

При нахождении превышения между двумя точками в одной из них устанавливают манометр (мановакуумметр), а в другой — компенсатор. Чувствительный элемент манометра, а в момент измерения и поверхность жидкости в компенсаторе открыты, т. е. находятся под давлением атмосферы. Согласно основному уравнению гидростатики, манометр воспринимает избыточное давление p столба жидкости, высота которого равна измеряемому превышению h . Для определения превышения необходимо отсчитать по манометру давление p и учесть «постоянные» прибора — его коэффициент K и место нуля MO (см. ниже), которые находят экспериментально при эталонировании прибора.

* Мельников А. Я. Гидростатический нивелир типа ГСН.— Бюллетень научно-технической информации. М.: Недра, 1965, № 2 (55).

Если компенсатор располагается выше мановакуумметра и ЧЭ измеряется положительное давление столба жидкости, то теоретически максимальное значение измеряемого превышения неограничено, а практически зависит лишь от пределов градуировки мановакуумметра, длины и прочности шланга.

При расположении компенсатора ниже мановакуумметра ЧЭ измеряет вакуум, создаваемый столбом жидкости высотой h . В этом случае возможности нивелира ограничиваются, так как его работа на вакуум при превышениях больших, чем высота столба жидкости, уравнивающего внешнее (атмосферное) давление, невозможна в принципе. При использовании дистиллированной воды теоретическим пределом работы прибора на вакуум на уровне моря является превышение около 10 м. С уменьшением атмосферного давления при подъеме на высоту этот предел уменьшается. Практически, вследствие наличия в воде растворенного воздуха, при работе на вакуум начинается его выделение в ЧЭ. При получении же в системе давления, равного упругости насыщенного пара при данной температуре, жидкость закипает. При этом воздух и пары жидкости заполняют трубку Бурдона* и она приобретает дополнительную деформацию, что искажает показания мановакуумметра. Практика показала, что, работая с дистиллированной водой, превышения свыше 6 м измерять на вакуум нецелесообразно.

Гидромеханический нивелир типа ММ представляет собой два мановакуумметра, соединенных шлангом. Система прибора полностью заполняется рабочей жидкостью. При измерении превышения давление столба жидкости высотой h распределяется поровну между чувствительными элементами обоих мановакуумметров. Нижний мановакуумметр покажет положительное давление $+p_1$ нижней половины $h/2$ столба жидкости, а верхний, фиксируя вакуум, создаваемый в его ЧЭ весом верхней половины $h/2$ этого столба, зарегистрирует отрицательное давление $-p_2$.

Очевидно, что наибольшее превышение, которое можно измерить нивелиром с двумя манометрами, равно удвоенному максимальному превышению, которое можно измерить нивелиром типа МК при работе его мановакуумметра на вакуум. Однако это достоинство нивелира типа ММ не может компенсировать присущие ему недостатки, а именно: значение превышения h , вычисляемое при работе с этим прибором через разность показаний мановакуумметров, находится с ошибками в $\sqrt{2}$ раз больше, чем при нивелировании прибором типа МК; схема же прибора типа ММ более сложна. Главный же недостаток такого нивелира обусловлен полной

* Трубка Бурдона — трубчатая пружина, применяемая в качестве чувствительного элемента в манометрах, вакуумметрах и мановакуумметрах, представляет собой согнутую в виде вопросительного знака полую тонкостенную трубку, имеющую в поперечном сечении форму эллипса или удлиненного овала. При подаче давления во внутреннюю полость трубки последняя стремится раздуться в поперечном сечении, пружина разгибается, и ее конец получает некоторое перемещение, которое через передаточный механизм передается на стрелку прибора.

герметичностью системы: напряжения, постоянно возникающие в ней из-за изменений степени нагрева жидкости в шланге, не имеют выхода наружу, вследствие чего и при неизменных положениях мановакуумметров отсчеты по ним постоянно меняются, что вызывает необходимость брать отсчеты по мановакуумметрам синхронно.

В Сибирском научно-исследовательском институте геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) разработана конструкция нивелира с двумя измерительными блоками 1

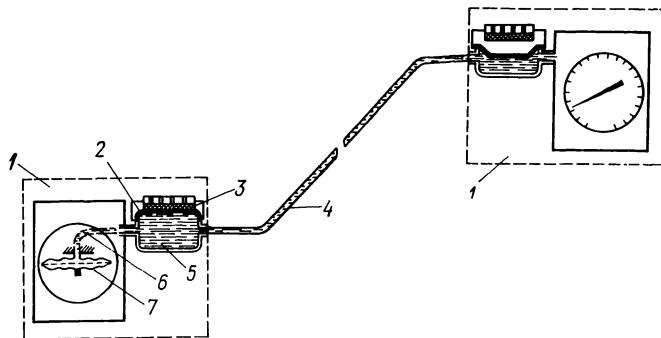


Рис. V.28. Принципиальная схема гидромеханического нивелира, разработанного в СНИИГГиМС:

1 — измерительный блок; 2 — эластичная пленка; 3 — мелкая жесткая сетка; 4 — основной шланг; 5 — резервуар; 6 — вспомогательный шланг; 7 — мембранная коробка

(рис. V.28), в каждом из которых давление столба жидкости воспринимается полый мембранной коробкой 7, а регистрируется с помощью множительно-измерительного механизма от барометра-анероида МД-49-А*. В обоих блоках мембранные коробки включены в систему через перераспределительные устройства, служащие одновременно и компенсаторами. Перераспределительное устройство представляет собой резервуар 5, имеющий крышку с двойной стенкой и небольшим регулируемым зазором. Внутренняя стенка выполнена в виде тонкой эластичной пленки 2, а внешняя — в виде мелкой жесткой сетки 3. Вся система заполняется жидкостью.

При установке измерительных блоков на нивелируемые точки эластичная пленка 2 в резервуаре 5 нижнего блока под давлением жидкости прилегает к сетке 3 и остается в этом положении до тех пор, пока данный блок находится ниже второго. Сетка позволяет жидкости воспринимать атмосферное давление через эластичную пленку. Из резервуара 5 полное гидростатическое давление через вспомогательный шланг 6 передается на мембранную коробку 7. Одновременно с этим в перераспределительном устройстве верхнего блока эластичная пленка 2 отходит от сетки 3, прогибаясь

* Прихода А. Г., Мозгов А. К. Новый гидростатический нивелир. — Геодезия и картография. 1972, № 10.

вслед за жидкостью. При этом измерительное устройство верхнего блока фиксирует избыточное давление столба жидкости, находящейся над верхней плоскостью мембранной коробки. Отсчеты показаний обоих измерительных блоков производят одновременно. Значение измеряемого превышения находят как разность этих отсчетов.

Хотя описанная принципиальная схема прибора имеет ряд существенных недостатков, достоинством ее является то, что она в конечном счете сводится к двум самостоятельным приборам типа

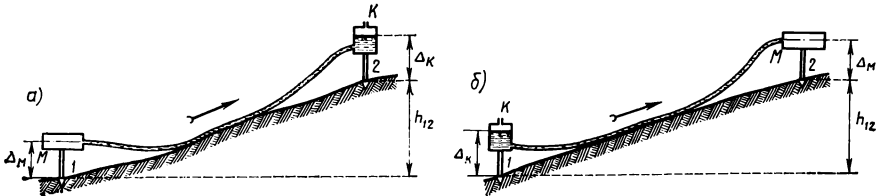


Рис. V.29. Определение превышения с помощью гидромеханического нивелира способами:

а — компенсатор впереди; *б* — манометр впереди

МК, измерительные блоки которых работают всегда в одном режиме — только на избыточное давление. Это исключает засасывание в систему воздуха извне, повышает точность измерений и позволяет всю шкалу прибора использовать для измерения превышений одного знака, увеличивая диапазон измеряемых превышений. В настоящее время такие приборы (ГСН-Д) успешно применяют при геофизических исследованиях для различных высотных привязок*, которые относятся к геодезическим работам пониженной точности. Требования же к точности нивелирования при геодезическом обслуживании строительства выше. Поэтому рассмотрим некоторые вопросы теории и применения гидромеханических нивелиров типа манометр — компенсатор, конструкция которых значительно проще, диапазон измерения превышений при геодезическом обслуживании строительства в большинстве случаев достаточен, а возможности повышения точности измерений для применения в строительстве представляются все же более перспективными.

Нивелирование прибором типа МК может выполняться способами «компенсатор впереди» либо «манометр впереди». При измерении превышения h_{12} (рис. V.29, *а*) по линии (1) — (2) способом «компенсатор впереди» давление атмосферы в точке 1 и упругая сила деформации чувствительного элемента (спиральи Бурдона) манометра уравновешиваются давлением атмосферы в точке 2 и весом столба жидкости в гидростатической системе нивелира. Таким образом, уравнение равновесия

$$(H_0 - \Delta_m)\rho + (P_1 + \Delta_p - C) = (H_0 - h_{12} - \Delta_k)\rho + (h_{12} + \Delta_k - \Delta_m)\gamma, \quad (V.39)$$

* Гидростатическое нивелирование при детальном гравиметрических съемках. — Метод. руководство/Сост. А. Г. Прихода, А. К. Мозгов. — Новосибирск, 1973.

где h_{12} — измеряемое превышение по линии (1) — (2); H_0 — высота «однородной» атмосферы; Δ_m — высота осевой линии спирали Бурдона над пятой установочного штока манометра; Δ_k — высота свободной поверхности жидкости в компенсаторе над пятой его установочного штока; ρ — объемный вес воздуха; γ — объемный вес рабочей жидкости; P_1 — отсчет по манометру в точке 1; C — отсчет по манометру, принятый за начальный; Δ_p — индивидуальная инструментальная поправка манометра.

Считая объемный вес ρ воздуха в пределах превышения h_{12} неизменным и пренебрегая ничтожно малой величиной произведения $(\Delta_m - \Delta_k)\rho$, получим $P_1 - C = -h_{12}\rho + h_{12}\gamma + (\Delta_k - \Delta_m - \Delta_p/\gamma)\gamma$,

$$\text{или} \quad P_1 - C = -h_{12}\rho + h_{12}\gamma + MO\gamma. \quad (V.40)$$

В выражении (V.40) величина

$$MO = \Delta_k - \Delta_m - \Delta_p/\gamma \quad (V.41)$$

представляет собой *место нуля гидромеханического нивелира*.

Учитывая, что $P_1 - C = p_1$, где p_1 — избыточное давление, измеренное манометром в точке 1, можно записать $p_1 = h_{12}\gamma - h_{12}\rho + MO\gamma$, откуда

$$h_{12} = (p_1 - MO\gamma)/(\gamma - \rho). \quad (V.42)$$

Поменяв манометр и компенсатор местами и измеряя то же самое превышение h_{12} по способу «манометр впереди» (рис. V.29, б), получим уравнение равновесия:

$$(H_0 - \Delta_k)\rho = (H_0 - h_{12} - \Delta_m)\rho + (h_{12} + \Delta_m - \Delta_k)\gamma + (P_2 + \Delta_p - C) \quad (V.43)$$

и далее $(P_2 - C) = h_{12}\rho - h_{12}\gamma - \Delta_m\gamma + \Delta_k\gamma - \Delta_p$.

С учетом (V.41) и того, что $P_2 - C = p_2$, где p_2 — давление, измеренное манометром в точке 2, запишем:

$$p_2 = -(h_{12}\gamma - h_{12}\rho) + MO\gamma, \quad (V.44)$$

откуда измеряемое превышение

$$h_{12} = -(p_2 - MO\gamma)/(\gamma - \rho). \quad (V.45)$$

Сложив (V.42) и (V.45) и разделив обе части нового уравнения пополам, получим:

$$h_{12} = [(p_1 - p_2)/2]/(\gamma - \rho). \quad (V.46)$$

Определяя положительное превышение h_{12} по линии (1) — (2) компенсатором вперед [см. выражение (V.42)], мановакуумметр измеряет положительное давление p_1 . При определении же этого превышения мановакуумметром вперед измеряется отрицательное давление (вакуум) p_2 , чем и объясняется знак «—» перед правой частью выражения (V.45). Следовательно,

$$\left| \frac{p_1 - p_2}{2} \right| = \frac{|p_1| + |p_2|}{2} = p, \quad (V.47)$$

где p — среднее арифметическое из абсолютных значений давлений, измеренных сначала компенсатором вперед, затем — манометром вперед.

С учетом (V.47) получим выражение

$$h_{12} = p [1/(\gamma - \rho)] = pK, \quad (\text{V.48})$$

в котором величина

$$K = 1/(\gamma - \rho) \quad (\text{V.49})$$

представляет собой *коэффициент гидромеханического нивелира*. Поскольку объемный вес ρ воздуха примерно в 1000 раз меньше объемного веса γ жидкости, то в большинстве случаев можно пользоваться приближенным значением коэффициента

$$K \approx 1/\gamma. \quad (\text{V.50})$$

Согласно (V.42) и (V.45), пользуясь приближенным значением коэффициента (V.50), превышения определяют по формулам:
при работе компенсатором вперед

$$h = (p/\gamma) - MO = pK - MO, \quad (\text{V.51})$$

а при работе манометром вперед

$$h = -[(p/\gamma) - MO] = -(pK - MO). \quad (\text{V.52})$$

Значение K находят экспериментально при эталонировании прибора путем многократных наблюдений на высотном стенде, в качестве которого используют склон оврага, речной долины либо лестничный марш здания. Закрепив на стенде шесть — восемь точек, превышения между ними определяют геометрическим нивелированием с ошибками $\pm 2 \div \pm 3$ мм. Эталонирование гидромеханического нивелира заключается в многократном проложении по точкам стенда нивелирных ходов. Коэффициент K вычисляют как отношение превышения, найденного геометрическим нивелированием и принимаемого за истинное, к измеренному манометром давлению столба жидкости, высота которого равна определяемому превышению. Место нуля MO прибора, как правило, приводят к значению 0,00 с помощью корректора нуля манометра, регулируя натяжение юстировочной пружинки.

Обычно шкала манометра оцифрована уже в значениях измеряемых превышений $h = pK$ или $h = -pK$ и эталонирование выполняется для уточнения значения K , которое находят как отношение истинного превышения к его значению, полученному гидромеханическим нивелированием.

Найденное из «эталонных» измерений значение коэффициента K соответствует какому-то среднему для этих измерений значению температуры жидкости, шланга и манометра, средним значениям атмосферного давления и ускорения силы тяжести в точках стенда и т. п. Если в дальнейшем полевые работы выполняются при таких же условиях, то полученные результаты измерений нуждаются

лишь в поправке за место нуля, если оно не было приведено к нулю.

Обычно полевые работы производятся при внешних условиях, отличных от имевших место при эталонировании прибора. В этом случае в измеренные значения превышений следовало бы вводить поправки, основные из которых: δ_b , δ_g , δ_τ , δ_v — поправки за изменения соответственно барометрического давления, значения ускорения силы тяжести, а также объемного веса рабочей жидкости и ее уровня в компенсаторе в зависимости от температуры. Так, при нивелировании манометром вперед превышение должно было бы определяться по формуле

$$h = -(p/\gamma) + MO + \delta_b + \delta_g + \delta_\tau + \delta_v. \quad (V.53)$$

Рассматривая ее составляющие как независимые переменные, среднюю квадратическую ошибку m_h определения превышения получим из выражения

$$m_h^2 = (1/\gamma^2)(h^2 m_\tau^2 + m_p^2) + m_{MO}^2 + m_b^2 + m_g^2 + m_\tau^2 + m_v^2, \quad (V.54)$$

где m_γ — средняя квадратическая ошибка определения объемного веса жидкости, соответствующего моменту измерения превышения; m_p — средняя квадратическая ошибка отсчета давления; m_{MO} — средняя квадратическая ошибка определения MO ; m_b , m_g , m_τ и m_v — средние квадратические ошибки нахождения поправок за изменения соответственно атмосферного давления, ускорения силы тяжести, объемного веса рабочей жидкости и ее уровня в компенсаторе с температурой.

Согласно (V.54), точность гидромеханического нивелирования определяется объемным весом жидкости, точностью мановакуумметра, а также способом и точностью учета влияний внешней среды. В первую очередь, точность нивелирования обуславливается выбором рабочей жидкости, так как последняя может быть выбрана со значениями объемного веса от 7,8 (спирты, масла) до 133,4 мН/см³ (ртуть), вследствие чего точность нивелира может быть снижена или, наоборот, повышена в 10—15 раз.

Практически целесообразно применять в нивелирах водные растворы солей. Например, 30%-ный раствор хлористого кальция с антикоррозионными присадками имеет объемный вес около 11,8 мН/см³, низкую температуру замерзания (—30÷—35°С), незначительно изменяющуюся с изменением температуры вязкость и легко воспроизводим; для человеческого организма этот раствор безвреден. Величина m_γ для данного раствора составляет примерно 1 мкН/см³.

В качестве индикатора давления могут применяться, например, мановакуумметры типов МТИ и ВТИ модели 1218 с пределами измерений от +1 до —1 кгс/см² (изготовитель — Московский завод «Манометр»). При исключении места нуля этого прибора величина m_p составляет около $1 \cdot 10^{-3}$ кгс/см².

Если полевые работы выполняются при внешних условиях, совпадающих с имевшими место при эталонировании прибора, то для

превышения $h=5$ м средняя квадратическая ошибка $m_h=1$ см, т. е. превышение, измеряемое в одну укладку шланга, может быть найдено с ошибкой порядка 1 см. Обычно же при выполнении полевых работ внешние условия значительно отличаются от «эталонных», однако поправками $\delta_b, \delta_g, \delta_v, \delta_T$, как правило, приходится пренебрегать, так как учет изменений условий внешней среды очень трудоемок. В этом случае при расчете точности гидромеханического нивелирования величины перечисленных поправок подставляют в формулу (V.54), рассматривая их как ошибки m_b, m_g, m_T, m_v , влияние которых может быть весьма существенным. Рассмотрим, как влияют факторы внешней среды на точность гидромеханического нивелирования.

Изменение барометрического давления. Допустим, что при эталонировании на высотном стенде было найдено эталонное значение коэффициента прибора

$$K_э = 1/(\gamma_э - \rho_э), \quad (V.55)$$

в котором $\gamma_э$ и $\rho_э$ — значения объемного веса рабочей жидкости и воздуха, соответствующие моменту эталонирования, а нивелирование выполняем на том же участке местности, но при другом атмосферном давлении. Сравнительно небольшие изменения атмосферного давления, с которыми приходится сталкиваться в естественных условиях на поверхности Земли, ощутимых изменений объемного веса $\gamma_э$ жидкости не вызывают (даже при увеличении давления на 1 кгс/см² вода сжимается лишь на 1/20 000 долю своего объема, а ртуть — на 1/250 000). Изменения же объемного веса воздуха при изменениях давления атмосферы более значительны. Поэтому для получения правильного значения превышения h нужно было бы найти и использовать при вычислениях новое значение коэффициента прибора $K_i = 1/(\gamma_э - \rho_i)$, учитывающее ρ_i — фактическое значение объемного веса воздуха в момент нивелирования.

Однако превышения вычисляют по найденному ранее эталонному значению коэффициента $K_э$ [см. (V.55)], из-за чего в вычисленное значение превышения входит ошибка, равная разности

$$\begin{aligned} K_э p_i - K_i p_i &= p_i (K_э - K_i) = p_i [1/(\gamma_э - \rho_э) - 1/(\gamma_э - \rho_i)] = \\ &= h (\rho_э - \rho_i) / (\gamma_э - \rho_э). \end{aligned}$$

Следовательно, в измеренное значение превышения нужно было бы вводить поправку

$$\delta_b = h (\rho_i - \rho_э) / (\gamma_э - \rho_э). \quad (V.56)$$

Используя (V.50), поправку за изменение барометрического давления вычисляют по приближенной формуле

$$\delta_b \approx h (\rho_i - \rho_э) / \gamma_э. \quad (V.57)$$

О величине поправки можно судить из следующего примера: $\rho_э = 12,06$ Н/м³ (атмосферное давление 760 мм рт. ст. — уровень моря); $\rho_i = 10,89$ Н/м³ (атмосферное давление 674 мм рт. ст. — абс. высота 1000 м); $\gamma_э \approx 9806,65$ Н/м³ (рабочая жидкость — вода); $h = +1$ м.

$$\delta_b = +1 (10,89 - 12,06) / 9806,65 = -0,12 \text{ мм.}$$

Таким образом, в данном случае все положительные и отрицательные превышения должны быть уменьшены по абсолютной величине на 1/10 000 (0,1 мм на каждый метр превышения).

Из (V.57) следует, что знак поправки зависит от знаков превышения и разности $(\rho_i - \rho_0)$. В замкнутых ходах неучитывание поправки δ_b не скажется на величине невязки. В разомкнутых ходах суммарная ошибка из-за неучета поправки δ_b будет пропорциональна сумме превышений, но, как видно из примера, изменения атмосферного давления слабо влияют на точность гидромеханического нивелирования и в большинстве случаев возникающими за их счет ошибками можно пренебречь.

Изменение объемного веса жидкости с изменениями ускорения силы тяжести и температуры. Объемный вес рабочей жидкости зависит от силы тяжести в месте производства работ и температуры жидкости. Пусть при эталонировании объемный вес жидкости был

$$\gamma_0 = (m/V_0) g_0, \quad (V.58)$$

где m — масса жидкости; V_0 — объем жидкости при температуре t_0 ; g_0 — значение ускорения силы тяжести в месте эталонирования.

При нивелировании в местности с другим значением силы тяжести и при другой температуре жидкости следовало бы вычислять превышения по значению объемного веса

$$\begin{aligned} \text{т. е.} \quad \gamma_i &= \frac{m}{V_i} g_i = \frac{m (g_i - g_0 + g_0)}{V_0 [1 + \beta_t (t_i - t_0)]} = \gamma_0 \frac{1 + (g_i - g_0)/g_0}{1 + \beta_t (t_i - t_0)}, \\ \gamma_i &= \gamma_0 [1 + (g_i - g_0)/g_0] [1 + \beta_t (t_i - t_0)]^{-1}; \end{aligned} \quad (V.59)$$

здесь t_i — температура жидкости при нивелировании; β_t — среднее значение температурного коэффициента объемного расширения рабочей жидкости для диапазона температур $(t_i - t_0)$; g_i — значение ускорения силы тяжести в месте нивелирования; V_i — объем жидкости при температуре t_i .

Разложив последний множитель выражения (V.59) в биномиальный ряд и воспользовавшись первыми членами разложения, пренебрегая остальными ввиду их малости, получим:

$$\begin{aligned} \gamma_i \approx \gamma_0 [1 + (g_i - g_0)/g_0] [1 - \beta_t (t_i - t_0)] \approx \gamma_0 \{ 1 + [(g_i - g_0)/g_0] - \\ - \beta_t (t_i - t_0) \}. \end{aligned} \quad (V.60)$$

Поправки δ_g за изменение силы тяжести и δ_γ за изменение объемного веса жидкости с температурой найдем из выражения: $\delta_g + \delta_\gamma = p_i K_i - p_i K_0 = p_i (K_i - K_0)$; учитывая (V.50) и (V.60), получим:

$$\begin{aligned} \delta_g + \delta_\gamma \approx p_i \left(\frac{1}{\gamma_i} - \frac{1}{\gamma_0} \right) = \frac{p_i}{\gamma_i \gamma_0} (\gamma_0 - \gamma_i) = \frac{h}{\gamma_0} \left[\gamma_0 \frac{g_0 - g_i}{g_0} + \right. \\ \left. + \gamma_0 \beta_t (t_i - t_0) \right] = h \frac{g_0 - g_i}{g_0} + h \beta_t (t_i - t_0), \end{aligned}$$

где h — приближенное значение измеряемого превышения.

Величина

$$\delta_g = h(g_0 - g_i)/g_0 \quad (\text{V.61})$$

представляет собой поправку в превышение за изменение ускорения силы тяжести, а

$$\delta_\gamma = h\beta_t(t_i - t_0) \quad (\text{V.62})$$

— поправку за изменение объемного веса жидкости с температурой.

Рассмотрим поправку δ_g для случая нормального распределения силы тяжести. В СССР для нахождения нормального значения g_0 ускорения силы тяжести на поверхности эллипсоида в точке с широтой φ принята формула Гельмерта:

$$g_0 = 978,030 (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi) \approx 978,03 + 5,19 \sin^2 \varphi.$$

Значение ускорения силы тяжести в месте наблюдений на высоте H над уровнем моря может быть найдено путем введения поправки за рельеф

$$g = 978,03 + 5,19 \sin^2 \varphi - 2 \cdot 10^{-4} H. \quad (\text{V.63})$$

В (V.63) величина ($2 \cdot 10^{-4} H$) Гал представляет собой так называемую поправку Буге, складывающуюся из редукции силы тяжести в свободном воздухе и поправки за притяжение промежуточного слоя. Тогда

$$g_0 - g_i = 5,19 (\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi_i) - 2 \cdot 10^{-4} (H_0 - H_i). \quad (\text{V.64})$$

Подставляя (V.64) в (V.61) и принимая для g_0 значение, равное 981 см/с^2 , получим

$$\delta_g \approx h [5,3 \cdot 10^{-3} (\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi_i) - 2 \cdot 10^{-7} (H_0 - H_i)], \quad (\text{V.65})$$

где h , H_0 и H_i выражены в метрах.

Пример V.2. Если $h = +1 \text{ м}$; $\varphi_0 = 60^\circ$; $\varphi_i = 45^\circ$; $H_0 - H_i = -200 \text{ м}$, то $\delta_g = 10^3 [5,3 \cdot 10^{-3} (0,75 - 0,50) - 2 \cdot 10^{-7} (-200)] = +1,32 \text{ мм} + 0,04 \text{ мм} \approx 1,4 \text{ мм}$.

Основным слагаемым при вычислении поправки δ_g является член, включающий географические широты. Для надежного отыскания поправки вполне достаточно знать приближенное значение измеряемого превышения, а широты в районах работ определять с ошибками $\pm 0,5^\circ$. В замкнутых нивелирных ходах неучет поправки δ_g не скажется на величине невязки, но отметки промежуточных точек будут искажены пропорционально их превышениям над исходной точкой. В разомкнутых же ходах в невязку войдет ошибка, пропорциональная разности высот начальной и конечной точек хода.

Теперь рассмотрим поправку δ_γ за изменение объемного веса жидкости с температурой, определяемую формулой (V.62).

Ниже приведены значения температурного коэффициента β (град^{-1}) объемного расширения некоторых жидкостей при комнатной температуре ($\sim +20^\circ \text{ C}$).

Бензол	$124 \cdot 10^{-5}$	Глицерин	$50 \cdot 10^{-5}$
Спирт	$108 \cdot 10^{-5}$	Вода	$21 \cdot 10^{-5}$
Керосин	$100 \cdot 10^{-5}$	Ртуть	$18 \cdot 10^{-5}$
Скипидар	$67 \cdot 10^{-5}$		

Коэффициенты объемного расширения существенно различны для разных веществ. Поскольку величина поправки δ_γ пропорциональна β_t [см. (V.62)], то для того чтобы не было необходимости вводить в результаты измерений большие поправки δ_γ , целесообразно использовать жидкости с малыми коэффициентами объемного расширения. Поэтому продукты перегонки нефти (бензин, керосин, минеральные масла) и спирты в гидромеханическом нивелировании практически непригодны. Наиболее пригодными жидкостями являются вода (при положительных температурах) и водные растворы солей.

Представление о величине поправки δ_γ дают следующие два примера.

1) Рабочая жидкость — спирт; $h = +1$ м; $\beta_t = 108 \cdot 10^{-5}$; $t_i - t_o = +10^\circ$. По (V.62) получим $\delta_\gamma \approx +11$ мм.

2) Рабочая жидкость — вода; $h = +1$ м; $\beta_t = 21 \cdot 10^{-5}$; $t_i - t_o = +10^\circ$; $\delta_\gamma \approx +2$ мм.

Надежность отыскания величины поправки δ_γ зависит в основном от точности определения средней температуры рабочей жидкости в системе прибора. Поскольку такое определение чрезвычайно сложно, то доброкачественные результаты измерений могут быть получены только при использовании жидкостей с малыми значениями β .

Изменение высоты уровня жидкости в компенсаторе. Поправка за изменение уровня жидкости в компенсаторе с температурой обусловлена различием коэффициентов объемного расширения жидкости и материалов шланга, компенсатора и спирали Бурдона (ЧЭ манометра).

Общая емкость системы гидромеханического нивелира, заполняемая рабочей жидкостью, складывается из внутренних объемов шланга $V_{ш}$, компенсатора $V_{к}$ и спирали Бурдона $V_{м}$, т. е. $V = V_{ш} + V_{к} + V_{м}$.

Поскольку суммарная емкость шланга и компенсатора

$$V_{ш.к} = V_{ш} + V_{к} \quad (V.66)$$

в 10—15 раз больше внутреннего объема $V_{м}$ спирали Бурдона, а коэффициент объемного расширения материала последней на порядок меньше, чем у материалов шланга и компенсатора, примем во внимание только изменение $\Delta V_{ш.к}$ суммарного объема шланга и компенсатора.

Рассматривая шланг как цилиндр длиной $l_{ш}$ с внутренним диаметром $d_{ш}$, получим его внутренний объем при температуре t_o , имевшей место в момент определения MO :

$$V_{ш.о} = (\pi d_{ш.о}^2 / 4) l_{ш.о} \quad (V.67)$$

Соответствующий этой же температуре внутренний объем компенсатора цилиндрической формы

$$V_{к.о} = (\pi d_{к.о}^2 / 4) l_{к.о} \quad (V.68)$$

где $d_{к.э}$ — диаметр компенсатора при температуре $t_э$; $l_{к.э}$ — высота столба жидкости (до контрольной черты) в компенсаторе при $t_э$.

С учетом (V.67) и (V.68) суммарный внутренний объем $V_{ш.к.э}$ шланга и компенсатора при определении МО представим в виде:

$$V_{ш.к.э} = (\pi d_{ш.э}^2/4) l_{ш.э} + (\pi d_{к.э}^2/4) l_{к.э}. \quad (V.69)$$

При изменении температуры шланга и компенсатора на $\Delta t = t_i - t_э$ изменяются их диаметры, длина шланга и высота $l_{к.э}$ компенсатора, что вызывает изменение $\Delta V_{ш.к.э}$ их суммарного внутреннего объема. Продифференцировав (V.69), получим:

$$dV_{ш.к.э} = (\pi/4) 2d_{ш.э} l_{ш.э} dd_{ш.э} + (\pi/4) d_{ш.э}^2 dl_{ш.э} + (\pi/4) 2d_{к.э} l_{к.э} dd_{к.э} + (\pi/4) d_{к.э}^2 dl_{к.э},$$

или

$$\begin{aligned} \Delta V_{ш.к.э} &= 2(\pi/4) d_{ш.э}^2 l_{ш.э} \alpha_{ш} \Delta t + (\pi/4) d_{ш.э}^2 l_{ш.э} \alpha_{ш} \Delta t + 2(\pi/4) d_{к.э}^2 l_{к.э} \alpha_{к} \Delta t + \\ &+ (\pi/4) d_{к.э}^2 l_{к.э} \alpha_{к} \Delta t = (\pi d_{ш.э}^2/4) l_{ш.э} 3\alpha_{ш} \Delta t + (\pi d_{к.э}^2/4) l_{к.э} 3\alpha_{к} \Delta t = \\ &= V_{ш.э} 3\alpha_{ш} \Delta t + V_{к.э} 3\alpha_{к} \Delta t, \end{aligned}$$

где $\alpha_{ш}$ и $\alpha_{к}$ — средние для диапазона температур $\Delta t = t_i - t_э$ значения температурных коэффициентов линейного расширения материалов шланга и компенсатора соответственно.

Далее, используя известное в физике приближенное соотношение, получим

$$\Delta V_{ш.к.э} = V_{ш.э} \beta_{ш} \Delta t + V_{к.э} \beta_{к} \Delta t, \quad (V.70)$$

где $\beta_{ш} \approx 3\alpha_{ш}$ и $\beta_{к} \approx 3\alpha_{к}$ — средние значения температурных коэффициентов объемного расширения материалов шланга и компенсатора.

Во время эталонирования при температуре $t_э$ уровень жидкости в компенсаторе должен соответствовать контрольной черте на его стенке, т. е. объем $V_{ж.э}$ рабочей жидкости, заполняющей систему нивелира, должен равняться суммарному внутреннему объему шланга и компенсатора при этой температуре, фиксированному чертой:

$$V_{ж.э} = V_{ш.э} + V_{к.э}. \quad (V.71)$$

Изменение температуры от $t_э$ при эталонировании до t_i при полевых работах вызывает изменение $\Delta V_{ж.э}$ объема рабочей жидкости в системе прибора:

$$\Delta V_{ж.э} = V_{ш.э} \beta_{ж} \Delta t + V_{к.э} \beta_{ж} \Delta t, \quad (V.72)$$

где $\beta_{ж}$ — среднее значение температурного коэффициента объемного расширения рабочей жидкости в диапазоне температур $\Delta t = t_i - t_э$.

Из-за неравенства приращений объемов (V.70) и (V.72) при температуре t_i появляется избыток или недостаток объема жидкости по сравнению с внутренним объемом шланга и компенсатора:

$$\Delta V = \Delta V_{\text{ш.к.э}} - \Delta V_{\text{ж.э}} = V_{\text{ш.э}}(\beta_{\text{ш}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t + V_{\text{к.э}}(\beta_{\text{к}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t. \quad (\text{V.73})$$

Так как в системе прибора свободное пространство есть только в компенсаторе, то появление величины ΔV вызовет изменение высоты $\Delta h_{\text{к}}$ (см. рис. V.29, а, б) свободной поверхности жидкости над той установочной штыря компенсатора и изменение MO [см. (V.41)]. Следовательно, поправка δ_V в измеренное значение превышения, представляющая собой поправку к уровню жидкости в компенсаторе, составит

$$\delta_V = \Delta V / S_{\text{к}} = (V_{\text{ш.э}} / S_{\text{к}})(\beta_{\text{ш}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t + (V_{\text{к.э}} / S_{\text{к}})(\beta_{\text{к}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t.$$

Подставляя значения $V_{\text{ш.э}}$ и $V_{\text{к.э}}$ из (V.67) и (V.68) и имея в виду, что $S_{\text{к}} = \pi d_{\text{к}}^2 / 4$, получим:

$$\delta_V = (d_{\text{ш}} / d_{\text{к}})^2 l_{\text{ш}}(\beta_{\text{ш}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t + l_{\text{к}}(\beta_{\text{к}} - \beta_{\text{ж}})\Delta t, \quad (\text{V.74})$$

где

$$d_{\text{ш.э}} \approx d_{\text{шт}} = d_{\text{ш}}; \quad d_{\text{к.э}} \approx d_{\text{кт}} = d_{\text{к}}; \quad l_{\text{ш.э}} \approx l_{\text{шт}} = l_{\text{ш}}; \quad l_{\text{к.э}} \approx l_{\text{кт}} = l_{\text{к}}.$$

Согласно физическому смыслу, вычисляемая по (V.74) поправка при нивелировании компенсатором вперед вводится в измеренное превышение со знаком, обусловленным членами формулы, а при работе манометром вперед — с обратным знаком.

Для уменьшения абсолютных величин поправок δ_V отношение $d_{\text{ш}} / d_{\text{к}}$ следует подбирать возможно меньшим, а материалы шланга, компенсатора и жидкость выбирать с близкими между собой коэффициентами объемного расширения.

Пример V.3. При $d_{\text{ш}} / d_{\text{к}} \approx 1/10$, $l_{\text{ш}} = 50$ м, $l_{\text{к}} = 0,05$ м, $\beta_{\text{ш}} = +660 \cdot 10^{-6}$ (полиэтилен ВД), $\beta_{\text{к}} = +300 \cdot 10^{-6}$ (полиметилметакрилат — оргстекло), $\beta_{\text{ж}} = +207 \times 10^{-6}$ (вода при $t = +20^\circ \text{C}$) и $\Delta t = t_i - t_s = +10^\circ$ поправка составит

$$\delta_V = (1/10)^2 \cdot 50 \cdot 10^3 (660 - 207) \cdot 10^{-6} (+10) + 0,05 \cdot 10^3 (300 - 207) \times 10^{-6} (+10) \approx +2,3 \text{ мм},$$

в ряде случаев ею можно пренебречь.

Из-за того, что у применяемых в настоящее время гидромеханических нивелиров величина $l_{\text{к}}$ примерно в 500—1000 раз меньше длины $l_{\text{ш}}$ шланга, а также из-за соотношения коэффициентов объемного расширения жидкости и материалов шланга и компенсатора влияние второго слагаемого в (V.74) примерно в 25—50 раз меньше, чем первого, содержащего $l_{\text{ш}}$. Это дает возможность поправку в измеренное превышение за изменение высоты уровня жидкости в компенсаторе с температурой находить по приближенной формуле

$$\delta_V \approx (d_{\text{ш}}^2 / d_{\text{к}}^2) l_{\text{ш}} \Delta t (\beta_{\text{ш}} - \beta_{\text{ж}}). \quad (\text{V.75})$$

В табл. V.2 даны результаты расчета точности гидромеханического нивелирования в зависимости от рабочей жидкости и некоторых ограничений по учету температуры, широты и высоты места на-

Таблица V.2

Условия измерений	Обозначения ошибок и поправок	Ошибки, поправки (мм) для рабочих жидкостей			
		спирты, масла $T = 7,8 \text{ мН/см}^2$	дистиллированная вода $T = 9,8 \text{ мН/см}^2$	водные растворы солей $T = 11,8 \text{ мН/см}^2$	ртуть $T = 133,4 \text{ мН/см}^2$
Коэффициент K и M_0 определяют по эталонным превышениям, а затем измерения производят в любых условиях с ограничениями: $t_i - t_a \leq 10^\circ \text{C}$, $\varphi_i - \varphi_a \leq 5^\circ$, $H_i - H_a \leq 1000 \text{ м}$, $h \leq 5 \text{ м}$, $l_{\text{ш}} = 50 \text{ м}$	m_p	$\pm 12,5$	$\pm 10 \text{ мм}$	$\pm 8 \text{ мм}$	$\pm 0,7 \text{ мм}$
	m_{M_0}	2,5	2,0	1,5	0,2
	$\delta_6 \pm m_6$	$1,4 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$	$0,08 \pm 0,01$
	$\delta_g \pm m_g$	$3,4 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,3$
	$\delta_\gamma \pm m_\gamma$	54 ± 18	$12,5 \pm 4,9$	$12,5 \pm 4,9$	$9,1 \pm 3,0$
	$\delta_V \pm m_V$	$3,5 \pm 1,3$	$2,3 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,9$	$2,4 \pm 0,9$

Средняя квадратическая ошибка m_h на одну укладку шланга

С учетом поправок за отклонения полевых условий от эталонных и средних квадратических ошибок их отыскания
 Без учета поправок

22	11	10	3,2
56	17	15	10

блюдений. Расчет выполнен по выведенным нами * формулам поправок и ошибок их отыскания **. При расчете исходили из следующих положений:

применяются мановакуумметры серийного выпуска с ошибками отсчета давления $\pm 0,001 \text{ кгс/см}^2$;

в одну укладку шланга измеряются превышения до $\pm 5 \text{ м}$ (в случае использования в качестве рабочей жидкости ртути: при работе прибора на вакуум — $0,7 \text{ м}$, на давление — 5 м);

шланг длиной 50 м из полиэтилена высокого давления (ВД);

рабочие жидкости: спирты, масла, вода, водные растворы солей, ртуть;

температурный диапазон работы — $20 \div +30^\circ \text{C}$;

высотный диапазон применения прибора $0-2000 \text{ м}$ над уровнем моря;

отношение диаметра шланга к диаметру компенсатора $1/10$;

* Мовчан С. Ф., Трембицкий В. И. О влиянии факторов внешней среды на точность гидромеханического нивелирования. — Тр. ПНИИИСа. — Методика инженерных изысканий в строительстве. М., 1974, вып. 25.

** Формулы средних квадратических ошибок отыскания поправок за отклонения условий внешней среды от имевших место при эталонировании прибора в этой книге опущены.

значение ускорения силы тяжести изменяется с широтой по нормальному закону.

Расчет показывает, что из погрешностей, вносимых в результаты измерений изменениями условий внешней среды, наиболее значительны температурные, поскольку определение действительной средней температуры жидкости в системе нивелира чрезвычайно затруднено.

Постоянный учет изменений внешней среды очень трудоемок. Особенно усложняется при этом, становясь недопустимо громоздкой, камеральная обработка результатов измерений. Поэтому практически применима лишь методика нивелирования без учета поправок за изменения внешней среды, при которой заранее рассчитываются те допустимые отклонения условий от «эталонных», влиянием которых можно пренебречь.

Коэффициент K [см. формулу (V.50)] гидромеханического нивелира, являясь величиной, обратно пропорциональной объемному весу рабочей жидкости, для конкретного экземпляра прибора зависит, кроме того, от юстировочной длины рычага множительного устройства, передающего движения конца спирали Бурдона на стрелку. Поэтому целесообразно регулировкой длины этого рычага коэффициент привести к единице, а место нуля MO поддерживать равным нулю с помощью корректора мановакуумметра. Тогда измеряемые превышения будут определяться непосредственно путем отсчетов по шкале мановакуумметра — без дополнительных вычислений.

Гидромеханическое нивелирование выполняют обычно два человека — техник, работающий с манометром и ведущий записи в полевом журнале, и рабочий, переносящий компенсатор. Для измерения отдельного превышения между двумя точками они разматывают шланг, устанавливая мановакуумметр и компенсатор над точками на специальных штырях. Поскольку более точные результаты дает работа мановакуумметра на избыточное давление, при превышениях более 3 м мановакуумметр целесообразно устанавливать на нижней точке.

Приведя шкалу прибора по круглому уровню в горизонтальное положение, техник отсчитывает по ней значение h измеряемого превышения. После этого рабочий изменяет высоту установочного штыря, опуская компенсатор на заведомо известную величину Δh , и техник производит второй (контрольный) отсчет h' по мановакуумметру. Если разность двух отсчетов $h-h'$ равняется значению Δh , то техник вычисляет среднее значение превышения $h_{cp} = (h+h'-\Delta h)/2$ при работе манометром вперед или $h_{cp} = (h+h'+\Delta h)/2$ при работе компенсатором вперед.

Если расстояние между точками больше длины шланга, прокладывают нивелирный ход. При переноске прибора на очередную станцию шланг возле манометра перекрывают с помощью арретира. Это защищает ЧЭ прибора от гидравлических ударов, благодаря чему шланг нивелира можно использовать для измерения расстояния между точками.

В большинстве случаев при проложении нивелирного хода более рационален способ «манометром вперед», при котором техник, идя впереди, выбирает направление хода. В ходах большой протяженности может иметь место значительное накопление систематической ошибки из-за неточной установки стрелки на нуль при коррекции места нуля. Его можно избежать, если, прокладывая ход, устанавливать впереди мановакуумметр и компенсатор попеременно (через точку).

Гидромеханический нивелир применялся в Ленинградской области для съемки рельефа строительного объекта линейного типа. Участок изысканий представлял собой полосу местности шириной 200 м и длиной 2700 м. На местности разбили и закрепили сетку из 216 квадратов размером 50×50 м, а затем выполнили нивелирование вершин квадратов — гидромеханическое и геометрическое (второе производилось для сравнения).

Гидромеханическое нивелирование выполняли при температуре воздуха от $+8$ до $+23^\circ \text{C}$; изменения атмосферного давления были в пределах от 747 до 755 мм рт. ст.; максимальное значение превышения, измеряемого в одну укладку шланга, составило 3 м. Никаких поправок за отклонения условий внешней среды от соответствующих показателей в момент установки коэффициента прибора не вводилось.

Значения превышений, полученные из геометрического нивелирования, принимались за истинные. При оценке точности гидромеханического нивелирования, выполненной без какой-либо отбраковки даже заведомо грубых результатов, средние квадратические ошибки определения превышения на станции составили 2,6 см (по истинным ошибкам) и 2,1 см (по невязкам в квадратах).

Проведенный хронометраж показал, что гидромеханическим нивелиром бригада из двух человек прокладывает ход примерно на $\frac{1}{3}$ быстрее, чем при геометрическом или тригонометрическом нивелировании.

В дальнейшем точность гидромеханического нивелирования была повышена применением более точных манометров. Осенью 1970 г. на полигоне МИСИ им. В. В. Куйбышева в Мытищах была выполнена опытная работа, в которой при нивелировании трассы автомобильной дороги применили гидромеханический нивелир типа МК. В качестве индикатора давления в нем использовали образцовый манометр класса точности 0,4 с диапазоном измерений от 0 до $+1$ кгс/см²; после пересадки стрелки на середину шкалы манометр измерял как избыточное давление, так и вакуум.

Система прибора заливалась 30%-ным водным раствором хлористого кальция (АНГА) с объемным весом $\gamma \approx 1,2$ гс/см³ = $11,8$ мН/см³. Юстировкой манометра коэффициент прибора был приведен к единице. После оцифровки шкалы прибора в метрах соответственно значениям измеряемых превышений ее цена деления составила 5 см, что дало возможность производить отсчеты с ошибками ± 5 мм. Таким образом, среднее арифметическое из двух от-

счетов, фиксирующее величину измеряемого давления, получалось с ошибками порядка $\pm 3,5$ мм.

При нивелировании трассы сооружения длиной 5,6 км, выполненном одновременно с помощью гидромеханического нивелира и нивелира НВ-1 (для сравнения), гидромеханическим нивелиром измерили по способу «манометр впереди» 147 превышений в диапазоне от $-3,8$ м до $+1,6$ м. При этом пятидесятиметровый шланг прибора использовали и для разбивки пикетажа.

Установка коэффициента прибора была произведена на стенде при температуре окружающего воздуха 15° и, хотя во время нивелирования трассы температура опускалась до 3° , никаких поправок за изменения условий внешней среды в результаты измерений не вводили. Средняя квадратическая ошибка измерения превышения гидромеханическим нивелиром, вычисленная по истинным ошибкам, составила 5,5 мм.

К настоящему времени конструкция гидромеханического нивелира типа МК усовершенствована*. Прибор имеет удобные устройства для коррекции места нуля и установки коэффициента (цены деления). Приведение места нуля к нулю выполняют поворотом циферблата мановакуумметра с помощью фрикционного устройства. Для установки коэффициента за счет изменения длины рычага множительного устройства, передающего движения конца спирали Бурдона на стрелку, служит специальный юстировочный винт, доступ к которому осуществляется через отверстие в корпусе мановакуумметра. Нивелир снабжен надежным перекрывающим устройством, защищающим ЧЭ прибора от гидравлических ударов при транспортировке и использовании шланга прибора для измерения расстояний между точками. Для повышения точности линейных измерений разработана конструкция шланга с повышенной продольной жесткостью; последняя достигается армированием полиэтиленового шланга четырьмя капроновыми нитями. Через каждые 0,5 м на шланге специальным составом нанесены метки. Армированный шланг позволяет выполнять линейные измерения с относительными ошибками не более $1/500$. При фиксированной силе натяжения точность измерений может быть повышена.

Значительные работы по конструированию гидромеханических нивелиров, исследованию их точности и внедрению в производство выполнены в последние годы под руководством А. Г. Приходы в лаборатории геодезии СНИИГГиМСа.

Надежность и точность гидромеханического нивелирования могут быть существенно повышены в случае применения нивелира с двумя компенсационными камерами** (рис. V.30). Нивелир представляет собой измерительное устройство с чувствительным элементом в виде полый мембранной коробки 2 или трубки Бурдона, со-

* Роев Ю. Д., Грошев В. В. Некоторые конструктивные особенности гидростатических нивелиров. — Геодезия и картография, 1978, № 7.

** Мозгов А. К., Прихода А. Г., Скобяк В. С. Гидростатическое устройство для определения превышений между смежными точками. — Авт. свидетельство СССР № 371430, 1973.

единенное шлангом через тройник с одинаковыми компенсаторами 1 и 7. Для снятия отсчетов по шкале прибора измерительное устройство по очереди соединяется краном 3 с компенсатором 1 и краном 6 с компенсатором 7. Тройник переходит в ловушку 5, выполненную в виде прозрачной трубки с краном 4, через который выпускают воздух из системы.

Установив один из компенсаторов 1 в точке А, измерительное устройство — в точке В, а второй компенсатор 7 — в точке С, от-

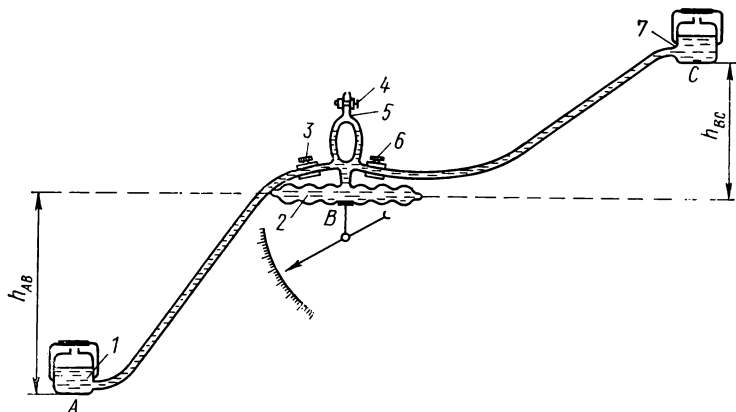


Рис. V.30. Принципиальная схема гидромеханического нивелира с двумя компенсаторами

крывают кран 3 и, измеряя вакуум, отсчитывают превышение h_{AB} . Перекрыв кран 3, открывают кран 6 и, измеряя избыточное давление, отсчитывают превышение h_{BC} . После этого компенсатор 1 переносят в точку В, измерительный блок — в точку С, а компенсатор 7 — на последующую точку хода и выполняют измерения по той же программе. Таким образом, каждое превышение в нивелирном ходе измеряется дважды при противоположных режимах работы измерительного устройства (на избыточное давление и на вакуум), благодаря чему повышаются надежность и точность нивелирования. Описанная схема гидромеханического нивелира с двумя компенсаторами использована в радиусомере — устройстве для определения радиусов кривизны профилированных поверхностей (см. сноску* на с. 189).

В другой конструкции нивелира* (рис. V.31) необходимость работы прибора на вакуум может быть устранена вообще. В компенсатор 4 вводится жидкость с удельным весом значительно большим чем у рабочей жидкости, заполняющей всю гидростатическую систему, например ртуть. Жидкости в компенсаторе разделяются эластичной мембраной 5. При расположении измерительного блока 1

* Мозгов А. К., Прихода А. Г., Скобяк В. С. Гидростатический нивелир. — Авт. свидетельство СССР № 502219, 1976.

ниже компенсатора измерительное устройство воспринимает избыточное давление и стрелка прибора отклоняется вправо от нуля. При расположении измерительного блока выше компенсатора стрелка отклоняется влево от нуля, но и в этом случае измеряется избыточное давление.

Интересную конструкцию двухжидкостного гидромеханического нивелира, предназначенного для измерений превышений в диапазоне $+3 \div -3$ м с точностью $\pm 1,5$ мм, предложил Д. В. Лисицкий (Научно-исследовательский институт прикладной геодезии).

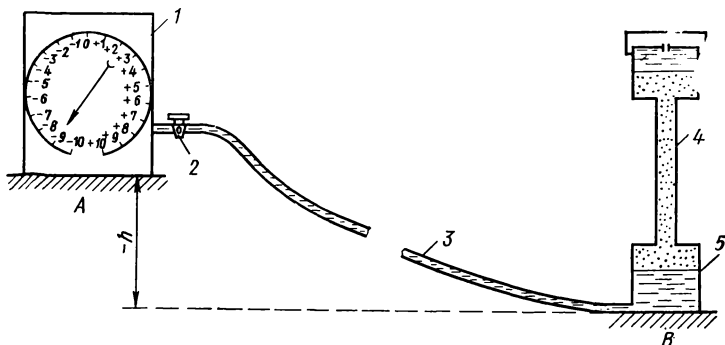


Рис. V.31. Принципиальная схема гидромеханического нивелира типа МК с введением в компенсатор тяжелой жидкости:

1 — измерительный блок; 2 — кран; 3 — соединительный шланг; 4 — компенсатор; 5 — эластичная мембрана

Гидромеханическое нивелирование в строительстве можно рекомендовать для геодезических изысканий трасс линейных сооружений (дорог, трубопроводов, линий электропередач и т. п.), для съемки рельефа строительных площадок в условиях сильно пересеченной и закрытой местности, а также для геодезического контроля по высоте при производстве земляных работ.

§ V.9. БАРОПРОФИЛОГРАФ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СЪЕМОК РЕЛЬЕФА ПРИ СКОРОСТНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

Геодезические изыскания, непосредственно предшествующие проектированию рельефа строительной площадки или объекта, выполняют в настоящее время главным образом методом геометрического нивелирования, который в целом является точным, но довольно громоздким и мало приспособленным для скоростных изысканий, а также для работы на закрытой местности, зимой, в темное время суток и т. п. Методика съемки рельефа совершенствуется медленно, хотя удельный вес земляных работ, особенно при строительстве линейных сооружений, все время увеличивается.

Оснащенность строительно-монтажных участков глубинной землеройной и строительной техникой за последние годы претерпела

коренные изменения. Появились мощные высокопроизводительные землеройные и планировочные механизмы. В количественном отношении землеройная техника возросла в несколько раз. Применение типовых сборных элементов позволяет переходить к скоростным методам строительства. Это создает некоторый разрыв между сроками изысканий и строительства и особенно чувствуется на этапе составления проектного задания для объектов линейного типа (дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов и др.), когда из нескольких возможных вариантов не всегда удается избрать выгоднейший из-за недостаточной оперативности методики геодезических изысканий.

В практике высотного обеспечения полевых геофизических съемок применяют барометрическое нивелирование. Отечественной промышленностью в последние годы выпускается несколько типов высокоточных микробарометров: ОМБ, МБНП, МБ-63, СМБ-1, СМБ-2 и другие, позволяющих повысить точность измерения атмосферного давления до 0,01—0,03 мбар, что обеспечивает в равнинной местности на площадке 30×30 км получение высот с точностью 0,5—1 м, а на площадке 3×3 км — 0,1—0,3 м. Среди этих приборов представляет интерес струнный микробарометр (СМБ), который может быть изготовлен как дифференциальный прибор, обеспечивающий автоматическую синхронизацию наблюдений на двух — определяемой и опорной — точках; выделение разностного давления и запись его графически на ленте пишущего миллиамперметра в виде профиля местности в заданных вертикальном и горизонтальном масштабах.

Проведенные опытно-производственные работы показали, что при установке определяемой станции на автомашине скорость нивелирования ограничивается практически только возможностью проезда по участку изысканий. При движении по шоссе скорость нивелирования доходила до 90 км/ч. Комплексование СМБ с топографическим привязчиком, обеспечивающим плановую привязку нивелируемых точек, открывает пути к автоматизации всего комплекса изысканий, включая и скоростной вынос проекта в натуру.

Барометрическое нивелирование основывается на предположении, что в точках с одинаковой высотой давление воздуха одинаково, т. е. изобарические поверхности параллельны уровенной. При перепаде высот до 50 м можно пользоваться упрощенной формулой, связывающей разность высот двух точек с разностью давления воздуха в них:

$$\Delta h = H_0 [(p_1 - p_2) / p_{cp}] (1 + \alpha t_{cp}), \quad (V.76)$$

где Δh — искомая разность высот двух точек 1 и 2; p_1 и p_2 — давление воздуха в этих точках; $p_{cp} = (p_1 + p_2) / 2$ и $t_{cp} = (t_1 + t_2) / 2$ — средние значения давления и температуры воздуха; $\alpha = 1/273$ — газовая постоянная.

Величина

$$(H_0 / p_{cp}) (1 + \alpha t_{cp}) = E \quad (V.77)$$

называется *барической ступенью* и показывает, на какую высоту нужно подняться или опуститься, чтобы давление изменилось на 1 мбар. Для величины E составлены таблицы для случая однородной атмосферы (атмосферы, плотность воздуха которой с высотой не изменяется). По результатам измерения давления воздуха в точках, разность высот которых известна, может быть определена и натуральная барическая ступень.

Таким образом, формулу (V.76) можно написать в виде

$$\Delta h = E(p_1 - p_2) = E\Delta p. \quad (\text{V.78})$$

Наиболее точные определения высот барометрическим нивелированием можно получить дифференциальным путем с помощью двух станций: опорной и определяемой. Опорную станцию устанавливают на участке изысканий неподвижно и на ней непрерывно измеряют давления воздуха; определяемую устанавливают на каком-либо транспортном средстве и перевозят по точкам, высоты которых нужно определить, или по заданному направлению — для получения непрерывного профиля местности. Информация о давлении на определяемой станции передается в виде радиочастотных сигналов на опорную станцию, на которой автоматически выделяется разностное давление Δp . Превышения искомых точек все время определяют относительно опорной станции. Для получения абсолютных отметок к полученным превышениям следует прибавить абсолютную высоту установки опорной станции.

Формула (V.76) получена в предположении, что атмосфера неподвижна. В действительности в атмосфере имеет место действие таких факторов, как приливо-отливные явления, движение воздуха в горизонтальном и вертикальном направлениях из-за неравномерного его нагревания и т. д. Это приводит к колебаниям давления атмосферы, которые можно разделить на периодические и случайные.

Периодические колебания имеют период, близкий к 24, 12, 8 и 6 ч. Наиболее резко выражена амплитуда двенадцатичасовых колебаний, достигающая в экваториальных областях 4 мбар, что эквивалентно изменению высоты до 40 м; по мере увеличения широты амплитуда этих колебаний уменьшается. Для периодических колебаний характерен глобальный характер, примерно одинаково сказывающийся на всех точках небольшого участка местности. Синхронизация наблюдений на опорной и определяемой станциях позволяет бороться с периодическими колебаниями, так как очевидно, что если давление одинаково изменилось на опорной и определяемой станциях, то в разности давлений это изменение исключится.

Случайные колебания давления являются фактором, определяющим точность барометрического нивелирования. Они представляют собой «локальный всплеск» давления с последующим затуханием колебаний в пределах от десятых долей секунды до нескольких минут; амплитуда их может составлять десятые доли миллибара.

Из всей массы факторов, вызывающих случайные колебания давления, следует отметить тепловую конвекцию и турбулентность.

Тепловая конвекция представляет собой неупорядоченное движение воздуха по вертикали, обусловленное нагреванием его от земли. Она наиболее резко выражена в ясные безветренные дни. В период изотермии, имеющей место в утренние и вечерние часы, тепловая конвекция уменьшается. *Турбулентность* — вихревое движение воздуха, обусловленное обтеканием воздушным потоком неровностей поверхности Земли, а также нарушением устойчивости воздушной среды от неравномерного ее прогревания. Меры борьбы со случайными колебаниями давления — правильный выбор времени наблюдений и (частично) синхронизация наблюдений на опорной и определяемой станциях. Экспериментальным путем доказано, что наиболее точные результаты нивелирования могут быть получены днем и ночью в пасмурную, туманную, безветренную погоду и в период изотермии.

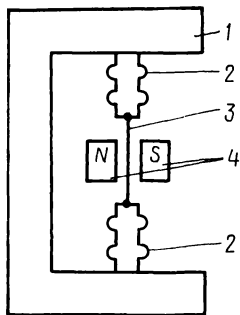


Рис. V.32. Принципиальная схема струнного датчика давления:

1 — П-образная рама; 2 — сильфоны; 3 — струна; 4 — возбуждающий магнит

Принципиальная схема струнного датчика давления (рис. V.32). Действие такого датчика основано на преобразовании силы натяжения струны 3, закрепленной между двумя сильфонами 2, в частоту f переменного тока (частоту колебаний струны). Частота колебаний струны определяется эмпирическим соотношением

$$f = 1/(2l) \sqrt{Fg/(\gamma s)}, \quad (V.79)$$

где l — длина струны; F — сила, растягивающая струну; g — ускорение силы тяжести; γ — удельный вес материала струны; s — площадь поперечного сечения струны.

При изменении атмосферного давления изменяется сила натяжения струны сильфонами. Так как параметры l и s при этом остаются постоянными (при малых изменениях давления), то изменяется частота колебаний f .

Для возбуждения и последующего поддержания незатухающих колебаний струна помещена в поперечное магнитное поле (проходит между полюсами постоянного магнита 4), а электрически изолированные концы струны подключены к входу усилителя с положительной обратной связью. Таким образом, струнный датчик атмосферного давления представляет собой генератор с самовозбуждением, называемый *струнным генератором*, резонатором которого служит струна. Обычно струнные генераторы работают в области звуковых частот (4—5 кГц).

Струнный датчик атмосферного давления выгодно отличается от других устройств измерения давления с помощью сильфонов или anerоидных коробок тем, что благодаря большой продольной жесткости струны (в несколько раз большей, чем у сильфонов) сильфоны работают без деформаций, чем практически почти полностью

исключается явление гистерезиса и обеспечивается более высокая точность измерения давления.

Давление атмосферы p через частоту колебаний f струны можно выразить следующим приближенным уравнением

$$p \approx p_0 + \beta f^2, \quad (\text{V.80})$$

где p_0 — некоторое постоянное давление внутри сильфонов; β — коэффициент, определяемый эмпирически и зависящий от параметров струны, сильфонов и ускорения силы тяжести.

Струнные датчики, используемые на опорной и определяемой станциях, подбирают с одинаковыми параметрами p_0 и β .

Пусть на опорной станции 1 и определяемой 2 установлены струнные датчики давления. Тогда для одного и того же физического момента времени давление p_1 и p_2 можно представить в виде $p_1 = p_0 + \beta f_1^2$; $p_2 = p_0 + \beta f_2^2$, откуда разность давлений

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \beta (f_1^2 - f_2^2) = 2\beta f_0 \Delta f, \quad (\text{V.81})$$

где $f_0 = (f_1 + f_2)/2$ — среднее значение частоты; $\Delta f = f_1 - f_2$ — разность частот.

Обозначая $2\beta f_0 = \varepsilon$ и подставляя значение Δp из (V.81) в (V.78), получим рабочую формулу барографографа

$$\Delta h = E \varepsilon \Delta f. \quad (\text{V.82})$$

Барическую ступень E определяют как функцию температуры и давления воздуха, значения которых измеряют в процессе нивелирования.

Структурная схема барографографа (рис. V.33). Барографограф представляет собой прибор дифференциального типа, состоящий из двух станций с радиотелеметрической аппаратурой для передачи информации о давлении атмосферы и пройденном пути с определяемой станции на опорную. На выходе опорной станции включен самописец, вычерчивающий непрерывный профиль местности, по которой движется определяемая станция.

Определяемая станция движется по искомым точкам или профилю. Струнный генератор (датчик давления) размещается над задней осью автомашины, возможно ближе к ней, с тем чтобы он повторял все вертикальные перемещения колеса, совершающего наезд на нивелируемую точку или прокатку по заданному профилю. Сигнал частоты f_1 , зависящий от давления воздуха, поступает в передатчик и излучается в эфир.

Датчиком пути является переднее колесо автомашины. Датчик (контактный прерыватель) отсчитывает количество оборотов колеса. Сигналы контактного прерывателя модулируют частоту вспомогательного генератора, и информация о расстоянии в виде последовательности модулирующих импульсов передается в эфир. При необходимости привязки профиля или искомым точкам в плане включается гироскопический курсопрокладчик топографического привязчика (на рис. V.33 курсопрокладчик не показан), и по команде оператора опорной станции визуально со счетчиков координат (или графически — по карте) оператор определяемой станции снимает

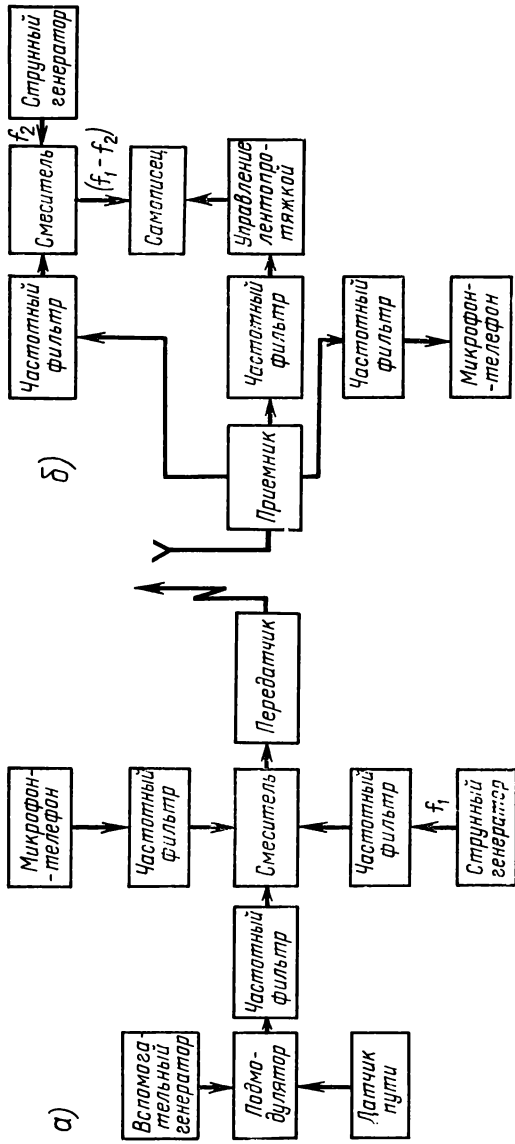


Рис. V.33. Структурная схема баропрофилографа:
 а — определяемая станция; б — опорная станция

координаты x и y или азимут профиля. Микрофон-телефон служит для переговоров между операторами станций.

Опорная станция устанавливается приблизительно в середине участка изысканий. При необходимости получения абсолютных отметок искомым точек станция устанавливается на точке с известной высотой. Частота f_1 определяемой станции улавливается приемником и поступает в смеситель. В этот же смеситель поступает частота f_2 от струнного генератора (датчика давления) опорной станции. В смесителе выделяется разностная частота $\Delta f = f_1 - f_2$. Постоянный ток, пропорциональный величине $E \varepsilon \Delta f$ [см. (V.82)], по-

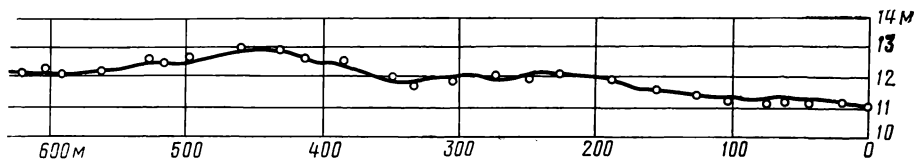


Рис. V.34. Образец записи профиля:

волнистая линия — барометрический профиль; кружки — точки геометрического нивелирования

ступает в механизм управления пером самописца. В зависимости от величины тока перо занимает то или иное положение по высоте на бумажной ленте, обеспечивая этим масштаб записи по вертикали.

Информация о пройденном пути в виде последовательности импульсов поступает в шаговый механизм управления лентопротяжкой. От каждого поступившего импульса лента продергивается на величину D/M , где D — длина окружности колеса автомашины (датчика расстояния), M — знаменатель горизонтального масштаба записи профиля. Таким образом, на ленте самописца вычерчивается профиль в заданных вертикальном и горизонтальном масштабах.

Баропрофилограф был многократно опробован на опытных и опытно-производственных работах при съемках рельефа объектов линейного типа. На рис. V.34 приведен образец профиля, полученного с помощью баропрофилографа за один проезд. Кружками показаны пикеты, взятые на характерных точках рельефа, высоты которых для оценки точности были определены геометрическим нивелированием. Как видно из рисунка, отклонения «барометрического» профиля от «геометрического» не превышают 0,2 м.

На основании многочисленных оценок точности по истинным ошибкам точность барометрического нивелирования при удалении определяемой станции от опорной до 4 км характеризуется средней квадратической ошибкой (м) определения высоты точки

$$m_h = [0,09 + (0,08/\sqrt{n})], \quad (V.83)$$

где n — количество рейсов по профилю (количество определений высоты данной точки).

Обычно нивелирование выполняется в прямом и обратном направлениях ($n=2$). В этом случае $m_h=0,15$ м.

§ V.10. ЛАЗЕРНЫЕ НИВЕЛИРЫ

В последние годы для определения отметок точек при инженерно-геодезических работах в промышленном и гражданском строительстве все больше начинают применять лазерные нивелиры. В отличие от обычных нивелиров, применяемых для определения отметок точек путем прокладки нивелирных ходов, лазерные нивелиры для подобных целей практически не применяются. Они дороже обычных, более громоздки, требуют источников питания для лазера и фоторегистрирующего устройства, а также соблюдения до-

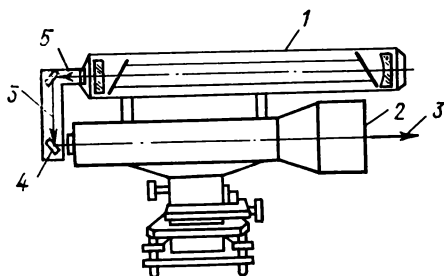


Рис. V.35. Оптическая схема лазерной насадки к нивелиру:

1 — гелий-неоновый лазер; 2 — зрительная труба нивелира; 3 — пучок лазерного излучения; 4, 5 — зеркала

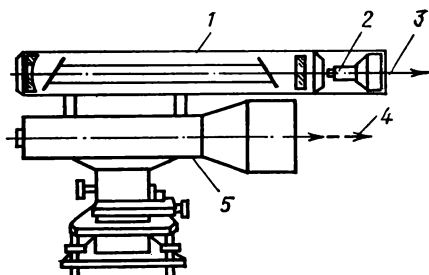


Рис. V.36. Оптическая схема лазерной насадки с коллиматором к нивелиру:

1 — гелий-неоновый лазер; 2 — коллиматор; 3 — пучок лазерного излучения; 4 — визирная ось нивелира; 5 — нивелир

полнительных мер по технике безопасности при работе с ними (см. § VI.2). По этим причинам их в основном используют для высокоточной передачи высот через водные препятствия, для нивелирования площадей и автоматизации геодезического контроля при движении строительных машин и механизмов во время работы. В соответствии с решаемой инженерно-геодезической задачей используют ту или иную конструкцию, например, для передачи высот через значительные водные препятствия — лазерные нивелиры, подобные традиционным или представляющие собой насадку к обычным нивелиром. Насадка крепится сверху зрительной трубы, роль коллиматора может выполнять зрительная труба (рис. V.35), в которую лазерный пучок направляется с помощью системы зеркал. Кроме того, насадка может иметь и автономную коллимирующую систему (рис. V.36).

Самоустанавливающийся лазерный нивелир представляет собой обычный самоустанавливающийся нивелир с лазерной насадкой, разработан на базе нивелира Ni-007 (рис. V.37) в отделе геодезии Нью-Браксвикского университета (Канада) и предназначен для передачи отметок с высокой точностью на большие расстояния с одной установки инструмента. В этом приборе газовый лазер мощностью 1,4 мВт крепится вертикально к корпусу нивелира Ni-007 при помощи колец, снабженных регулировочными винтами, позво-

ляющими наклонять лазер в небольших пределах. Против выходного отверстия лазера установлено зеркало, с помощью которого световой пучок направляется в окуляр зрительной трубы. На выходе из объектива расходимость лазерного пучка составляет 20"; диаметр лазерного пучка — 30 мм, а на расстоянии 400 м — около 40 мм.

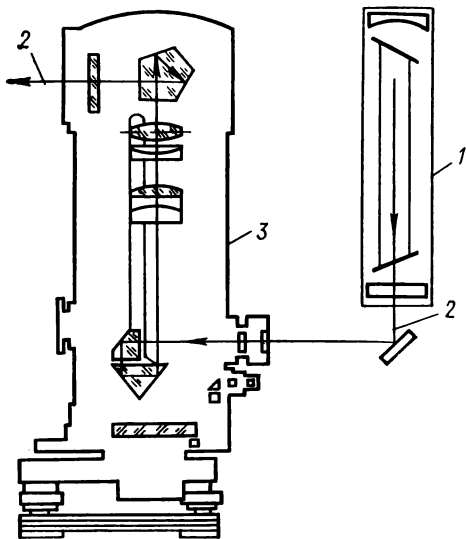


Рис. V.37. Оптическая схема нивелира Ni-007 с лазерной насадкой:

1 — гелий-неоновый лазер; 2 — пучок лазерного излучения; 3 — нивелир

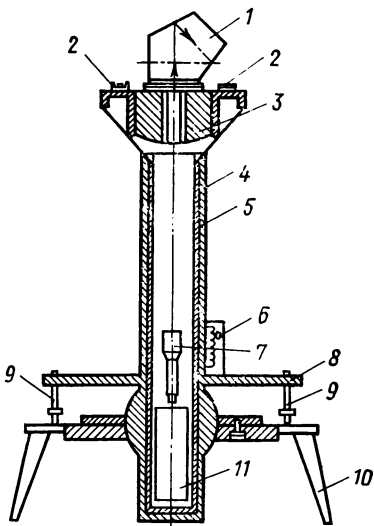


Рис. V.38. Лазерный прибор для задания световой плоскости:

1 — пентапризма; 2 — цилиндрические уровни; 3 — электродвигатель с полым валом; 4 — корпус прибора; 5 — полая обойма; 6 — трипка, с помощью которой можно изменять высоту световой плоскости; 7 — коллиматор; 8 — трегер; 9 — подъемные винты горизонтирующего устройства; 10 — головка штатива; 11 — лазер

Благодаря наличию компенсатора, выполненного в виде двух призм на маятниковой подвеске, лазерный пучок автоматически устанавливается в горизонтальное положение с точностью $\pm 0,5''$. Диапазон действия компенсатора составляет 15'.

При работе с прибором для регистрации положения лазерного пучка на нивелирной рейке используют фотодетекторы, которые можно смещать вдоль рейки.

Нивелир был использован для передачи высотных отметок на расстояние 700 м через реку Сант Джон во Фредериктоне (Канада). Обычно отметки через водную преграду передают геометрическим нивелированием по льду методом двойного нивелирования.

Чтобы исключить влияние вертикальных перемещений льда, делают одновременно нивелирование четырьмя-пятью инструментами, либо одним, но для контроля выполняют четыре-пять ходов.

Для определения точности лазерного нивелирования был проложен через мост обычный нивелирный ход, вычисленная средняя квадратическая ошибка которого составила 1 мм. Разность высот, полученная из сравнения лазерного нивелирования с обычным, составила 3,1 мм.

Согласно требованию строительных норм и правил (СНИП) для мостов длиной более 300 м на каждом берегу должно быть установлено не менее двух постоянных реперов. Ошибка в определении отметок каждого репера относительно исходного не должна превышать ± 10 мм.

В условиях севера и умеренной полосы передача отметок путем геометрического нивелирования по льду позволяет обеспечить требуемую точность. Методами тригонометрического нивелирования получить такую точность достаточно сложно, поэтому для решения подобных задач целесообразно использовать лазерные нивелиры.

При нивелировании поверхности высокая производительность достигается использованием лазерных приборов со сканирующими излучателями [7, 16].

В качестве источников излучения у этих приборов применяют газовые лазеры, устанавливаемые в подвижной трубе прибора вертикально (рис. V.38).

Для уменьшения угловой расходимости пучка используют телескопическую систему, устанавливаемую перед лазером по ходу светового пучка. В верхней части прибора размещается сканирующее устройство, которое обычно выполнено в виде призмы, закрепленной на выходном конце вала электродвигателя.

Прибор приводят в рабочее положение по цилиндрическим уровням, устанавливаемым с помощью подъемных винтов горизонтирующего устройства. Высота излучателя может меняться путем вертикального смещения трубки относительно корпуса прибора.

У некоторых лазерных приборов со сканирующим излучателем источник излучения размещается в карданном подвесе, чем достигается автоматическая вертикальная установка лазерного луча.

При вращении вала электродвигателя, а следовательно, и пентапризмы лазерный пучок, выходящий из пентапризмы, развертывается в горизонтальной плоскости, относительно которой выполняют измерения.

Такие приборы используют при бетонировании фундаментов и полов, выемке и перемещении грунта, забивке свай, строительстве аэродромов и т. д.

В СССР серийно выпускается сканирующий лазерный излучатель, который входит в комплект системы СКП, используемой для вертикальной планировки (см. § VI.4).

Лазерный прибор «Геоплан-300», выпускаемый фирмой «AGA Geotronics AB» (Швеция). Его внешний вид и оптическая схема

показаны на рис. V.39, а, б. Лазерный пучок от вертикально расположенного лазера попадает на сканирующий узел, осуществляющий не только развертку пучка с определенной угловой скоростью, но и расщепление его на два пучка. Один из световых пучков составляет с горизонтальной плоскостью угол $-\varepsilon$, а другой $+\varepsilon$, благодаря чему достигается возможность создания равносигнальной зоны, так как при сканировании световые пучки частично перекрывают друг друга (рис. V.40, а). Отсчет производится по плоскости, симметричной положению которой соответствует одинаковой амплитуде светово-

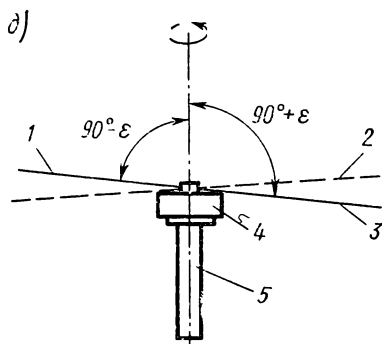
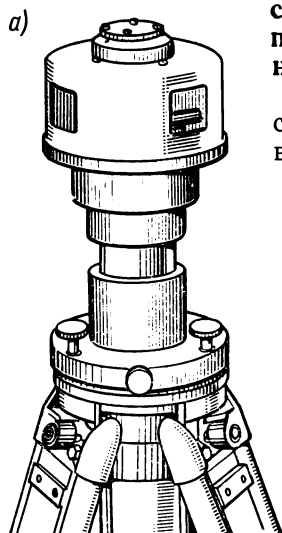


Рис. V.39. Лазерный прибор «Геоплан-300» (а) и его оптическая схема (б):

1 и 3 — пучки лазерного излучения, составляющие с горизонтальной плоскостью углы $+\varepsilon$ и $-\varepsilon$ или с вертикалью углы $90^\circ + \varepsilon$ и $90^\circ - \varepsilon$; 2 — горизонтальная линия; 4 — сканирующая головка; 5 — лазер с коллиматором

го сигнала. При небольшом смещении относительно плоскости симметрии вниз или вверх меняется соотношение интенсивностей в пучках 2 и 1, как это показано на рис. V.40, б. Если глаз находится в плоскости симметрии, то при частоте вращения вала двигателя, равной 10 с^{-1} , свет от сканирующего излучателя, вследствие инерционности глаза, будет казаться непрерывным, хотя в действительности за 1 с будет 20 вспышек одинаковой интенсивности (рис. V.40, в). Если глаз сместить ниже или выше плоскости симметрии, то он зафиксирует в течение одной секунды взаимно чередующиеся десять ярких и десять слабых вспышек.

Для определения положения плоскости симметрии, т. е. горизонтальной плоскости, визуальным методом используют стеклянный диск, в оправе которого имеется прорезь, а на поверхности стекла нанесена сетка (рис. V.41). Диск перемещают вдоль нивелирной рейки, пока мерцающие нижний и верхний лазерные пучки А и В

не расположатся симметрично на сетке диска в точках A и B , как показано на рисунке. В этот момент плоскость симметрии проходит через точку C , соответствующую средней прорези, по центру которой берут отсчет.

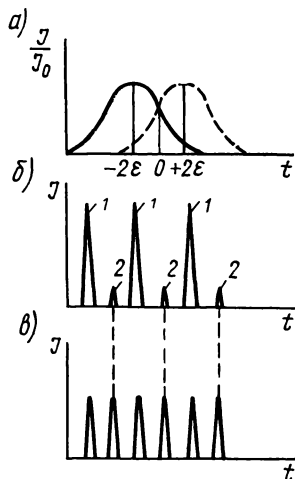


Рис. V.40. Распределение интенсивности I/I_0 в пучках лазерного излучения, создаваемых прибором «Геоплан-300» (а), интенсивность световых сигналов, регистрируемых при смещении фотоприемного устройства относительно плоскости симметрии (б) и интенсивность световых сигналов, регистрируемых с помощью фотоприемного устройства, находящегося в плоскости симметрии (в)

При работе с прибором «Геоплан-300» могут быть использованы рейки, снабженные фотодетекторами. При фотоэлектрической

индикации фотоэлектрический детектор передвигается по рейке в поисках минимального отсчета между двумя максимумами. Когда положение фотодетектора соответствует положению плоскости симметрии, стрелка индикатора находится на нуле. При смещении фотодетектора вниз или вверх стрелка отклоняется вправо или влево. Точность измерений составляет 2 мм на 100 м, а дальность действия — 150 м при визуальной индикации 50—100 м.

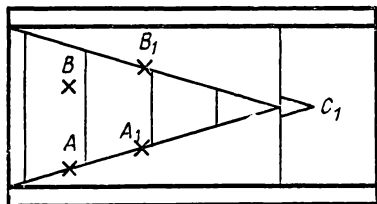


Рис. V.41. Схема определения нулевой точки лазерной плоскости при помощи визирного диска

На рис. V.42 показан лазерный нивелир «Лазерплейн», выпускаемый фирмой «Лазерплейн корпорейшн» (США). Он задает горизонтальную световую плоскость, относительно которой выполняют измерения с помощью рейки, снабженной фотоприемником; приводится в рабочее положение по двум цилиндрическим уровням с ценой деления, равной 5". Дальность действия прибора 300 м, точность — порядка 5 мм.

Для аналогичных работ за рубежом также используют лазерный нивелир — «Ротолйт» (рис. V.43).

Лазерные приборы со сканирующими излучателями и лазерные нивелиры, задающие узконаправленный лазерный пучок, или пучок, растянутый с помощью цилиндрической линзы в виде веера, можно использовать не только для нивелирования поверхности, но и для автоматизации геодезического контроля при выполнении планировочных работ с помощью различных машин и механизмов, а также в качестве излучателей, задающих опорную линию при вы-

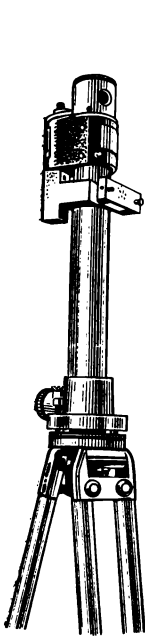


Рис. V.42. Лазерный нивелир «Лазерплайн»

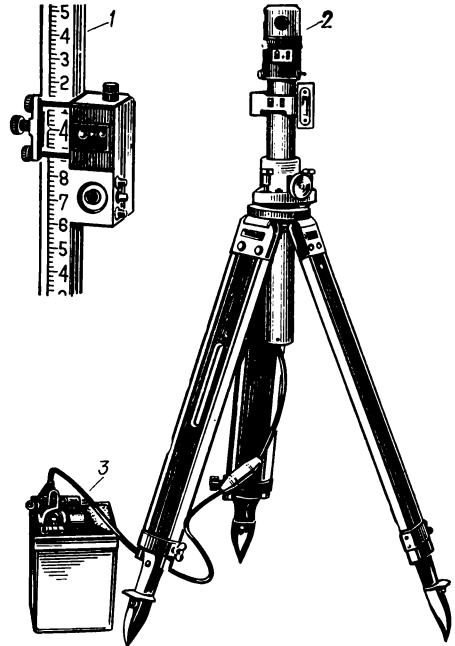


Рис. V.43. Лазерный нивелир «Ротолйт»:

1 — рейка с фотоприемником; 2 — лазерный излучатель; 3 — аккумулятор

полнении детального нивелирования трассы. Приемным устройством может быть линейная матрица фотоэлементов, однако она имеет много коммутирующих соединений и поэтому довольно сложна.

В СССР разработан лазерный профилограф [4], у которого в качестве приемного устройства используется многолинзовая линейная матрица, содержащая 50 линз (рис. V.44). Линзы расположены на рейке в два ряда таким образом, что их главные фокусы находятся на расстоянии 10 мм друг от друга. В свою очередь, рейка установлена в карданном подвесе на подвижном экипаже. В фокусах

линз расположены торцы световодов, а противоположные торцы световодов — по окружности на неподвижном диске (рис. V.45).

Для передачи светового сигнала с торцов световодов служит подвижный световод, вход которого находится на расстоянии примерно 1 мм от неподвижного диска и закреплен на подвижном кодирующем диске, а выходной торец направлен на вход фотоприемника. Фотоприемник состоит из двух светофильтров, объектива и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Подвижный и неподвижный диски, а также торцы световодов выполнены таким образом, что при вращении подвижного диска конец подвижного световода последовательно проходит под торцами неподвижных световодов.

На кодовом диске сделано 50 отверстий, угловое положение которых соответствует положению световодов на неподвижном диске. Кодовые отверстия служат для определения отсчета в решающем блоке, соответствующего моменту засветки торца подвижного световода световым сигналом. Регистрация сигнального импульса осуществляется с помощью ФЭУ.

Для подсветки кодообразователя служит лампа с цилиндрической линзой, а для приема кодовых импульсов — фотодиод. Подвижный кодовый диск вращается с помощью электродвигателя с частотой 1 с^{-1} . Таким образом, в течение 1 с происходит просмотр всех торцов световодов и определяется, какой порядковый номер имеют освещенные торцы световодов, в соответствии с чем счетно-решающее устройство выдает информацию о положении лазерного пучка на индикатор профилографа.

Помимо кодовых отверстий, используемых для определения отсчета, на различных радиальных расстояниях от центра на кодовом диске нанесены кодовые отверстия, необходимые для управления цифropечатающим устройством и для установки электронного счетчика и элементов решающего блока на нуль.

При выполнении нивелирования лазерным профилографом опорный пучок задается с помощью лазерного визира, устанавливаемого в начале трассы. При движении приемного устройства профилографа лазерный пучок попадает на вход нескольких линз. С помощью счетно-решающего устройства находится отсчет, соответствующий положению геометрического центра пучка, который выдается на цифровой индикатор и на цифropечатающее устройство. Точность отсчета составляет 5 мм. Нулевая плоскость отсчета расположена ниже первого элемента матрицы линз на расстоянии 10 мм от центра первой линзы. Для определения расстояния от излучателя до рейки с колесом тележки связан датчик пути.

На тележке помимо индикатора и многолинзовой рейки размещены также блок питания, цифropечатающее устройство, устройство для графической записи и источники питания (аккумуляторы).

Дальность действия лазерного профилографа составляет 500 м. При определении значений отметок пикетов необходимо учитывать расстояние между излучателем и приемником, чтобы в случае необходимости ввести поправку за кривизну Земли.

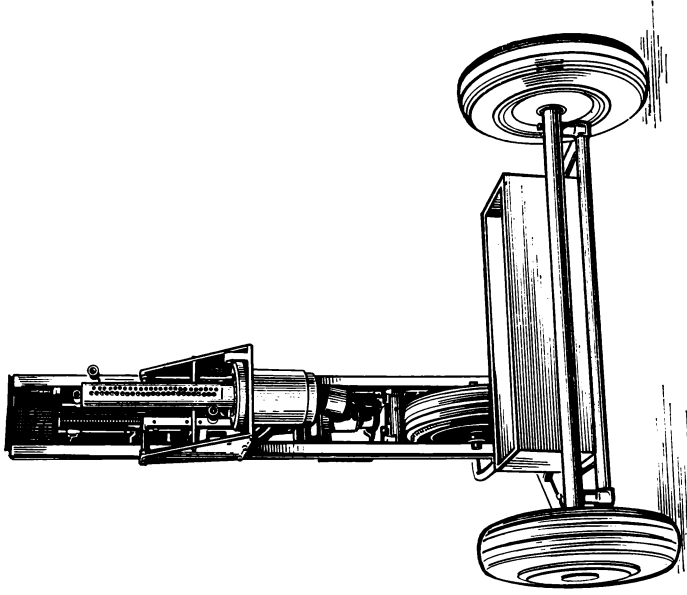


Рис. V.44. Общий вид лазерного профилографа

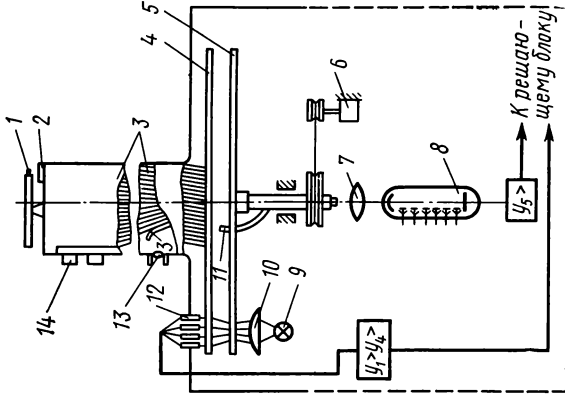


Рис. V.45. Схема приемного устройства лазерного профилографа:

1 — оптический визир; 2 — круглый световод; 3 — неподвижные волоконные уровни; 4 и 5 — неподвижный и подвижный кодирующие диски; 6 — фотоэлектронный умножитель; 7 — линза; 8 — фотоподсветка; 9 — лампа подсветки; 10 — цилиндрическая линза; 11 — подвижный световод; 12 — фотодиоды; 13 — линза входного зрачка; 14 — бленда приемной линзы.

Для проверки точности определения отметок точек были проведены измерения профиля взлетно-посадочной полосы строящегося аэродрома в Адлере с помощью лазерного профилографа и нивелира

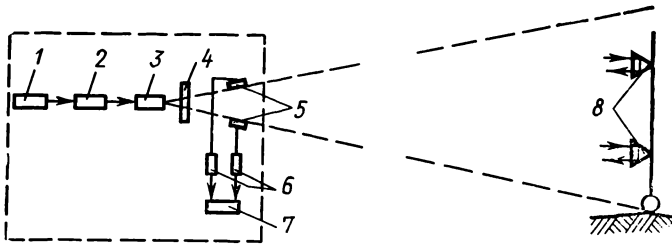


Рис. V.46. Принципиальная схема лазерного сканирующего профилографа:

1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — сканирующий узел; 4 — цилиндрическая линза; 5 — фотоприемник; 6 — усилитель; 7 — блок обработки информации; 8 — рейка с отражателями

лира НВ-1. Ниже приведены средние квадратические ошибки определения пикетов трассы для различных расстояний, которые вычисляли на основании сравнения результатов нивелирования, выполненного лазерным профилографом и нивелиром НВ-1.

Средняя квадратическая ошибка геометрического нивелирования этой же трассы составляет 5 мм.

Участок трассы, м	. . . 0—100	100—200	200—300	300—400	400—500
Средняя квадратическая ошибка, мм	. . . . . 15,6	22,0	23,7	31,0	35,0

Лазерный профилограф с многоэлементной рейкой из-за небольшого допустимого диапазона измеряемых превышений вдоль профиля трассы может быть использован только на горизонтальных участках, где вертикальная планировка уже проведена. Причем из-за инерционности фотоприемников, небольших неровностей рельефа скорость его должна быть ограничена до 0,6 м/с. Таким образом, при максимальной скорости движения профилографа отметки пикетов можно получать через каждые 0,6 м, так как частота съема информации равна 1 Гц.

Лазерный профилограф наиболее целесообразно применять там, где необходима очень детальная вертикальная съемка, например, при определении неровностей дорог и аэродромов с целью определения спектральных характеристик рельефа и эффекта их воздействия на автомобили или самолеты, движущиеся с той или иной скоростью.

Весьма существенные недостатки таких профилографов — малый диапазон измеряемых превышений, обусловленный размерами

линейной матрицы; невысокая скорость измерений, ограниченная инерционностью механических элементов приемного устройства.

Скорость и диапазон измерений могут быть во много раз повышены, если использовать принцип измерений, основанный на сканировании лазерным пучком в вертикальной плоскости с угловой скоростью, закон изменения которой известен. При этом вдоль нивелируемой трассы в плоскости развертки лазерного пучка перемещают отражатель (рис. V.46).

Угол наклона ν из центра развертки пучка на отражатель определяют по временным интервалам между отраженным импульсом и импульсом, полученным от опорного фотоприемника, т. е. так же, как при измерении углов сканирующим теодолитом (см. § III.3).

Превышение

$$h = L \operatorname{tg} \nu + i - l, \quad (\text{V.84})$$

где i и l — высота излучателя и отражателя.

Так как частота сканирования может составлять сотни и даже тысячи герц, то скорость передвижения отражателя вдоль трассы может быть практически не ограничена.

Для нивелирования трасс рассмотренным методом можно использовать контрольно-измерительную систему (ЛКИС) (см. рис. III.29).

Для определения расстояния L между станцией и текущим пикетом профиля устанавливают второй отражатель. Измеряя углы наклона на оба отражателя, расстояние вычисляют по известному базису и параллактическому углу, который равен разности углов наклона на нижний и верхний отражатели.

Расстояние также можно вычислять на ЭКВМ.

Глава VI

НОВАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ПРИМЕНЯЕМАЯ ПРИ РЕШЕНИИ ТИПОВЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

§ VI.1. СЪЕМКА ИНЖЕНЕРНЫХ ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

К инженерным подземным коммуникациям (ИПК) относятся: кабели электро- и телефонных линий, трубопроводы для транспортировки воды, горючих жидкостей, газа, воздуха и т. п. Съёмка ИПК производится в плане и по высоте. Съёмке подлежат все наземные сооружения — колодцы, камеры, подстанции, водокачки и другие подземные прокладки.

Особенность строительства ИПК — неравномерность продвига этого вида работ, обусловленная сложностью их организации, возможностью выполнения по частям в неудобное для топографических съёмок время, например зимой, в темное время суток и т. д. Вследствие этого исполнительная топографическая съёмка непосредственно уложенных труб или кабелей не всегда возможна и выполняется часто после засыпки траншей. Обычные методы съёмки предусматривают в этих случаях рытье шурфов на характерных точках ИПК с последующими инструментальными промерами подземного объекта. Такие работы весьма трудоемки, особенно в условиях заводских территорий или города, когда они часто сопряжены со вскрытием дорожного покрытия.

В последние годы при съёмках и инвентаризации ИПК начали применять индукционные методы выноса на поверхность и определения глубины заложения объекта приборами, получившими общее название *трубокабелеискателей* (ТКИ), без вскрытия траншей. Вынесенная на поверхность и отмеченная на ней ИПК в дальнейшем снимается топогеодезическими методами.

Если по достаточно длинному проводнику пропустить переменный ток, то вокруг него образуется переменное электромагнитное поле, силовые линии которого имеют в первом приближении вид концентрических окружностей. В антенне, внесенной в электромагнитное поле, наводится ЭДС, пропорциональная эффективности антенны и интенсивности поля.

В настоящее время чаще всего применяют активные — контактные методы съёмки ИПК: энергия вводится в проводник от спе-

циального генератора и создается искусственное электромагнитное поле. Роль проводника играет металлический трубопровод, кабель или его защитная свинцовая оболочка. В керамических трубопроводах, а также металлических, но не имеющих между собой электрического контакта, проводником может служить жидкость, если она заполняет их без разрыва и является электропроводной. Часто электропроводность воды усиливают искусственно, подсыпая в нее соль. Контактные методы съемки ИПК дают наибольшую точность определения координат объекта.

Применение пассивных (бесконтактных) методов может иметь место в двух случаях: обнаружение кабелей, находящихся под напряжением, за счет создания силового электромагнитного поля проходящим током, и обнаружение электропроводящих предметов за счет поля, наводимого блуждающими токами. В последнем случае метод менее эффективен из-за слабости сигналов и в связи с этим более низкой точности определения координат предмета.

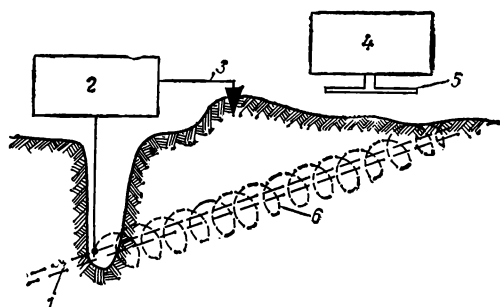


Рис. VI.1. Схема контактного ТКИ:

1 — инженерные подземные коммуникации; 2 — генератор звуковой частоты; 3 — заземлитель; 4 — приемник; 5 — антенна; 6 — схематическое изображение электромагнитных волн

Схема контактного ТКИ показана на рис. VI.1. Генератор звуковой частоты 2 подключается своими точками к ИПК 1 и заземлителю 3, забиваемому в землю на расстоянии 5—20 м от оси ИПК. Приемник 4 с направленной антенной (рамочной, кольцевой, стержневой) и телефонами переносится по направлению оси ИПК.

Электродвижущая сила в антенне зависит от взаимного расположения электромагнитных волн и плоскости рамки антенны. Если антенну расположить горизонтально (рис. VI.2, а), то наведенная в ней ЭДС будет зависеть от взаимного расположения антенны в ИПК. В положении 1, когда плоскость рамки антенны расположена горизонтально, симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ИПК, антенну перескачет наименьшее количество силовых линий поля и ЭДС будет минимальной. В положениях 2 и 3 ЭДС будет большей. На рис. VI.2, а ЭДС отождествлена с кривой силы звука. Это свойство антенны используется для выноса (проектирования на поверхность земли) оси ИПК.

Оператор, держа антенну горизонтально и покачивая ее из стороны в сторону, слушает в телефоны звуковой тон и при минимуме интенсивности звука, что соответствует положению 1 антенны, проектирует на землю середину рамки антенны, отме-

чая это колышком на земле или мелом (при работе над асфальтом). Далее оператор движется в направлении оси ИПК, придерживаясь все время минимального звукового сигнала, и отмечает все точки поворотов ИПК, ответвлений, закруглений и т. п.

Для определения глубины h (рис. VI.2, б) заложения ИПК оператор наклоняет рамку антенны на угол 45° по отношению к горизонту (положение 1) и начиная от колышка, забитого над осью ИПК (точка А), передвигает антенну перпендикулярно к оси, до получения минимума звукового сигнала, что будет иметь

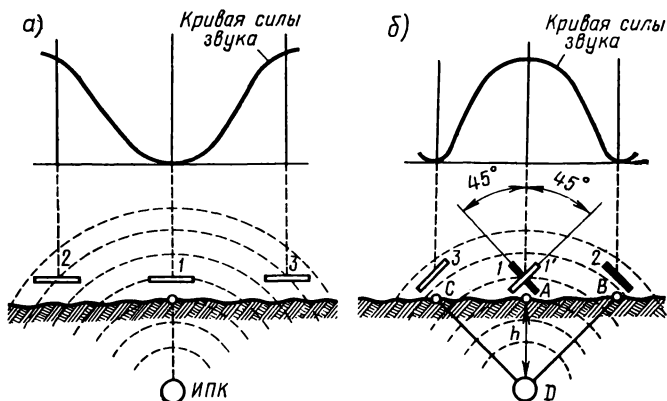


Рис. VI.2. Определение планового положения ИПК (а) и глубины заложения ИПК (б)

место, когда силовые линии поля скользят по плоскости антенны (положение 2). Фиксируют точку В минимума звука колышком. Повернув антенну на 90° , находят таким же образом точку С с другой стороны оси ИПК. Измеряют рулеткой расстояние СВ. Так как силовые линии имеют, как правило, вид концентрических окружностей, то полученный треугольник CDB является равнобедренным, прямоугольным в точке D . Высота треугольника $h = 0,5 \overline{CB}$.

При наличии в одной траншее нескольких ИПК для отдельной их съемки генератор ТКИ поочередно подключают к каждой из ИПК в отдельности. Точность определения местоположения ИПК зависит от помех, возникающих от посторонних источников тока, а также и от тока генератора ТКИ. Особенно сильны помехи на участках с большим количеством пересекающихся кабелей и трубопроводов, а также при работе на увлажненных грунтах. Помехи ослабляются при подключении генератора к ИПК в двух и более точках.

Если в траншее уложено несколько трубопроводов, то при сильном сигнале генератора наблюдается искажение сигнала за счет наводок ЭДС от подключенного трубопровода на неподклю-

ченные. Сигналы искажаются в местах разветвления ИПК из-за интерференции электромагнитных волн в местах ответвлений трубопроводов, если они имеют существенно разные диаметры и т. п.

Для более точного определения глубины заложения ИПК антенну следует держать возможно ближе к поверхности земли. Точность определений можно повысить путем изменения мощности генератора, особенно если рядом с определяемой линией расположены смежные трубопроводы или кабели. В общем случае для ТКИ небольшой мощности (до 30—35 Вт) точность определения объекта в плане m_s и по высоте m_h приблизительно одинакова и может быть оценена по эмпирической формуле

$$m_h \approx m_s \approx 0,5(0,1h + d),$$

где h — глубина заложения ИПК; d — диаметр ИПК.

Например, при $h = 2$ м и $d = 30$ см имеем $m_s = m_h = 0,5(0,1 \times 200 + 30) = \pm 25$ см.

В табл. VI.1 приведены технические характеристики некоторых ТКИ.

Таблица VI.1

Фактор	Марка трубкабелеискателя				
	ТКИ-1	ТКИ-2	ТПК-1	ВТР-IVM	ВТР-V
Дальность действия от точки подключения, км	0,5	1,0	3,0	2,0	3,0
Глубина прослушивания, м	5	6	10	10	10
Точность определения ИПК в плане и по высоте, см	10% от глубины		10—30	10	10
Мощность генератора, Вт	2—3	4—5	30	50	40
Частота генерации, Гц	400	1000	1000	2000	2000
Тип антенны	Рамочная		Ферритовая стержневая		
Температурный диапазон работы, °С	—30+45	—30+40	—20+40	—30+40	—50+40
Масса комплекта (брутто), кг	8	8	15	26	26

§ VI.2. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ С ВИЗУАЛЬНОЙ ИНДИКАЦИЕЙ ПРИ РАЗБИВОЧНЫХ РАБОТАХ, ПЛАНОВО-ВЫСОТНОМ КОНТРОЛЕ И ЗАДАНИИ НАПРАВЛЕНИЯ

Лазерные геодезические приборы применяют как с визуальной, так и фотоэлектрической индикацией лазерного пучка. Приборы с визуальной индикацией целесообразно использовать в условиях плохой освещенности, когда необходимо при одной установке прибора выполнить большой объем работы в тех случаях, когда использование обычных геодезических инструментов затруднено, например, при работах над водной поверхностью, под водой, в узких траншеях и т. п.

Достоинство лазерных приборов — возможность задавать с их помощью вещественную линию, соответствующую визирной оси обычных геодезических инструментов. Недостатки — большие габариты и масса, необходимость в источниках питания. Кроме того, из-за высокой плотности световой энергии в лазерном пучке и высокого напряжения, необходимого для питания лазеров, при работе с ними следует соблюдать дополнительные меры предосторожности.

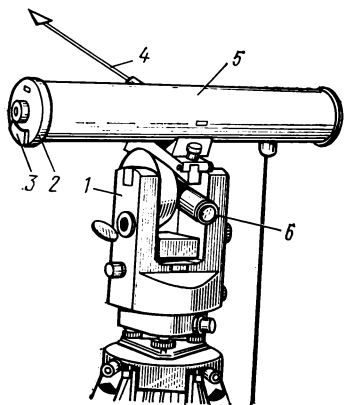


Рис. VI.3. Лазерная насадка к теодолиту:

1 — теодолит; 2 — шкала делений;
3 — уровень; 4 — световой пучок;
5 — лазер; 6 — окуляр зрительной трубы

Как правило конструктивно лазер устанавливают в геодезическом приборе так, чтобы ось лазера была параллельна визирной оси прибора или пучок излучения, выходящий из лазера, направлялся с помощью оптических элементов параллельно визирной оси зрительной трубы, служащей для наведения пучка. На рис. VI.3 показан внешний вид одного из таких приборов. Перед выходным отверстием лазера для уменьшения угловой расходимости пучка лазерного излучения и его фокусировки устанавливают оптическую систему.

По методу формирования лазерного пучка и конструктивным признакам лазерные приборы можно разделить на несколько групп: приборы, задающие

световую линию, световую плоскость в ограниченном секторе, световую плоскость в пределах окружности на основании сканирования, и универсальные, т. е. задающие световую плоскость или линию.

Лазерные визиры, теодолиты и нивелиры относятся к приборам, задающим световую линию. Некоторые из них снабжены объективами в виде цилиндрических линз. Пучок, проходя через такой объектив, трансформируется и приобретает веерообразную форму. Лазерные приборы, снабженные оптическими насадками в виде цилиндрической линзы, во время работы задают световую плоскость в ограниченном секторе.

Чтобы задать световую плоскость в пределах 360° , обычно сканируют пучком лазерного излучения с помощью оптико-механических устройств, например электродвигателя, на выходном конце вала которого установлен отражательный элемент.

В настоящее время широко распространены лазерные приборы, предназначенные для выполнения широкого круга геодезических задач [17, 20]. Такие универсальные приборы имеют съемные насадки, устанавливаемые перед выходным зеркалом лазера, и представляющие собой цилиндрические линзы, растягивающие пучок в вертикальной или горизонтальной плоскостях; призмы,

изменяющие направление пучка, а также сканирующие узлы, позволяющие задавать световую плоскость. В зависимости от выполняемого вида работ на выходе лазерного прибора устанавливается та или иная насадка.

Если лазерный геодезический прибор используют в качестве излучателя, задающего световую линию или плоскость, его устанавливают на исходной точке и световому пучку задают нужное направление в пространстве. В требуемых точках контролируемого сооружения (местности) по ходу лазерного пучка устанавливают рейку или экран.

Экраны выполняют в виде сетки квадратов со сторонами, параллельными осям X и Y , ориентированными соответственно по вертикали и горизонтали. Иногда применяют экраны с нанесенными на них линиями в виде концентрических окружностей.

Отсчеты по световому пятну на экране или рейке позволяют определять положение снимаемой точки относительно пучка.

В некоторых случаях применяется способ «вхождения в луч» заключающийся в том, что отсчеты берут с помощью линейки по краям лазерного пучка, направленного в глаз наблюдателя. Однако этот способ следует использовать весьма осторожно, так как прямое попадание в глаз пучка достаточной мощности может привести к ухудшению зрения. Кроме того лазерное излучение обладает свойством вызывать кумулятивный эффект, следовательно, допустимая доза облучения зависит от времени и спектрального состава излучения.

Установлено, что в диапазоне $0,4—1,4$ мкм лазерное излучение проходит через глаз практически без поглощения и фокусируется на сетчатке, в результате чего плотность возрастает на четыре-пять порядков.

Экспериментальные исследования показывают, что пороговое значение энергетического количества освещения на сетчатке составляет $0,1—1 \cdot 10^4$ Дж/м² при длительности действия $10—15$ нс, а предельно допустимый безопасный уровень энергетического количества освещения для глаза при работе с лазером — $1 \cdot 10^{-4}$ Дж/м².

Обычно в лазерных приборах используют гелий-неоновые лазеры с мощностью излучения не более 10 мВт, которая не оказывает отрицательного влияния на кожу человека. Но при использовании телескопических систем, приводящих к увеличению энергетического количества освещения, даже на значительных расстояниях облученность может оказаться значительно больше пороговой и опасной для зрения.

Пример VI.1. Мощность лазера $P=10$ мВт, расходимость пучка на выходе из телескопической системы лазерного прибора $\alpha=20''$, диаметр телескопа $D_T=34$ мм, длина трассы $L=1$ км, суммарная потеря энергии на оптических элементах прибора и за счет затухания в атмосфере $K=50\%$, время облученности глаза $t=1$ с.

На расстоянии 1 км диаметр лазерного пучка

$$D_c = L\alpha/\rho'' + D_T = 1 \cdot 10^6 \cdot 20'' / 206265'' + 34 = 131 \text{ мм.}$$

Считая, что распределение интенсивности в пятне рассеяния равномерное, поверхностная плотность потока излучения на расстоянии l км

$$E_c = PK_a/S = 4PK_a/(\pi D_c^2) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5/(3,14 \cdot 0,13^2) = 0,4 \text{ Вт/м}^2.$$

Следовательно, энергетическое количество освещения на сетчатке глаза

$$H_э = E_c t = 0,4 \cdot 1 = 0,4 \text{ Дж/м}^2.$$

Полученное $H_э$ значительно превышает предельно допустимый безопасный уровень для глаза.

В действительности распределение интенсивности в лазерном пучке неравномерно, поэтому энергетическое количество освещения в отдельных точках пятна рассеяния будет выше расчетной. Следовательно, необходимо оберегать глаза от прямого попадания лазерного излучения и соблюдать такие же меры предосторожности, как и при работе с яркими источниками света.

Во время работы с лазерными приборами рекомендуется соблюдать следующие правила техники безопасности: пучок лазерного излучения не должен попадать непосредственно в глаза, выходить за пределы строительной площадки; должен проходить по возможности выше головы или ниже пояса человека; перед работой необходимо удалять все хорошо отражающие предметы из зоны действия лазерного пучка; во время работы соблюдать меры по технике безопасности как при работе с высоковольтными установками; все рабочие должны быть информированы о вредном действии лазерного излучения на сетчатку глаз; место производства работ должно быть ограждено и установлен предупредительный сигнал, сигнальная лампа или предупредительный плакат.

При использовании как визуальной, так и фотоэлектрической индикации необходимо знать распределение интенсивности в лазерном пучке, которое является довольно сложным и зависит от параметров резонатора лазера, оптической системы, применяемой для формирования пучка, условий прохождения излучения в атмосфере, а также от расстояния между лазером и экраном.

В поперечном сечении пучок, выходящий из лазера, имеет неравномерную интенсивность, что обусловлено конфигурацией (центральной или двухосевой) и видом сечения резонатора лазера.

При многомодовом режиме работы лазера [13] распределение интенсивности пучка на выходе из резонатора, имеющего двухосевую симметрию:

$$I_{pl}(r, \varphi) = I_0 \left(\sqrt{2} \frac{r}{\omega(z)} \right)^{2l} \left[L_p^l \left(2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) \right]^2 \cos^2(l\varphi) \exp \left(-2 \frac{r^2}{\omega(z)^2} \right), \quad (\text{VI.1})$$

а при одномодовом

$$I = I_0 e^{2z^2/\omega^2(z)}, \quad (\text{VI.2})$$

где p и l — радиальный и угловой индексы моды; I_0 — интенсивность на оси пучка; r, φ — текущие полярные координаты в сечении пучка; $\omega(z)$ — параметр, называемый размером пятна, харак-

теризующий масштаб распределения и равный расстоянию от оси пучка до той точки, где интенсивность в сечении основной моды уменьшается в e^2 раз; L_p' — полином Лагера.

Отдельные типы колебаний для резонатора со сферическими зеркалами показаны на рис. VI.4.

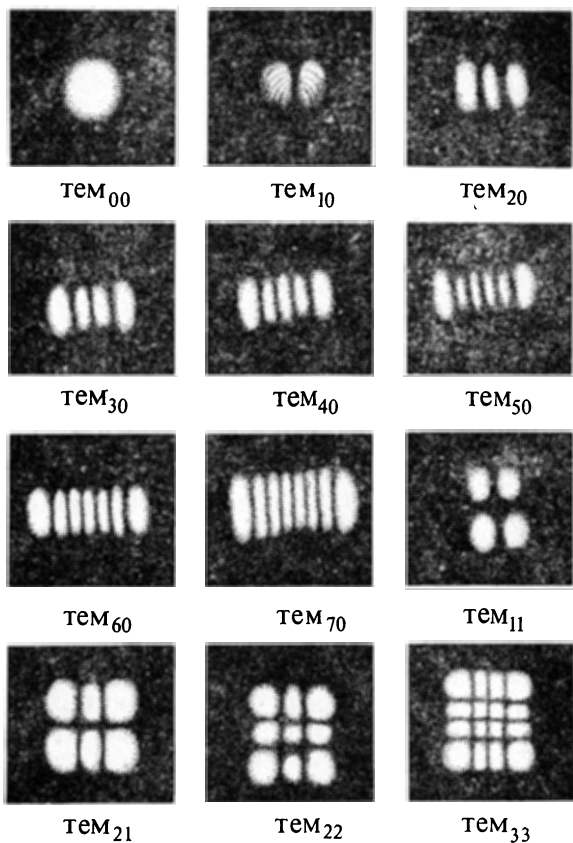


Рис. VI.4. Фотографии структуры поля излучения типов колебаний лазерного резонатора со сферическими зеркалами

Для уменьшения угловой расходимости лазерного пучка используют линзы либо оптические системы. Идеальная линзовая система не влияет на модовую структуру пучка в дальней зоне (области Фраунгофера), а изменяет только масштаб изображения. В том случае, когда пучок проходит оптическую систему, например телескоп, и обрезается круглой диафрагмой, на пространственное распределение влияет диафрагма, амплитудный коэффициент пропускания которой

$$t(r_1) = \text{circ}(r/r_0), \tag{VI.3}$$

где r — величина радиуса-вектора в плоскости диафрагмы; r_0 — радиус диафрагмы.

Распределение интенсивности лазерного излучения будет различным для ближней зоны — области Френеля (рис. IV.5, а) и дальней зоны — области Фраунгофера (рис. VI.5, б).

Обычно расстояние между экраном и лазером составляет несколько метров, что соответствует дальней зоне.

Для интенсивности I в точке, удаленной от оси пучка на расстоянии r' , можно написать

$$I = I_0 [2I_1(x)/x]^2, \quad (\text{VII.4})$$

где I_0 — интенсивность на оси пучка; I_1 — функция Бесселя первого рода и первого порядка; $x = 2\pi r' \alpha' / \lambda$; r' — радиус-вектор в плоскости наблюдения; α' — апертурный угол.

В идеальной картине (рис. VI.5, а) радиус окружности r'_n , точки которой имеют минимальную или максимальную яркость

$$r'_n = c_k \lambda z / (2\pi r_0), \quad (\text{VI.5})$$

где c_k — числовой коэффициент; k — номер темного или светлого кольца; λ — длина волны света, мкм; r_0 — радиус выходного отверстия телескопа, мкм.

Выражение (VI.5) показывает, что диаметры колец, а следовательно, и размеры всего пятна будут тем меньше, чем больше радиус выходного зрачка r_0 . При уменьшении размеров передающей апертуры диаметр светового пятна увеличивается, но отношение диаметров колец характеризуется одними и теми же числами и не зависит от параметров оптики.

Так как лазер можно считать точечным источником света с некоторым приближением, а распределение интенсивности светового пучка имеет довольно сложную структуру, то пространственное распределение сигнала после прохождения телескопической системы будет отличаться от идеального. На фотографии светового пятна (рис. VI.5, в) четко видна интерференционная картина, состоящая из чередующихся темных и светлых колец.

На фотографиях, полученных в полевых условиях, отношение размеров колец соответствует теоретическому. При благоприятных условиях можно наблюдать дифракционную картину на расстоянии ≈ 700 м (рис. VI.5, г).

При наличии сравнительно небольшой сферической аберрации положение максимумов и минимумов в дифракционной картине меняется незначительно, но часть световой энергии перераспределяется, вследствие чего центральный максимум понижается, максимум в кольцах становится более высоким. В то же время падение освещенности в минимуме не достигает нуля (рис. VI.5, в, г). При большей сферической аберрации кольца могут сливаться с кружком Эри, а иногда даже наблюдается падение освещенности к центру (см. рис. VI.5, д).

На фотографиях (рис. VI.5, в) кружок Эри хотя и превосходит по яркости другие точки светового пятна, но в меньшей сте-

пени, чем при идеальной дифракционной картине. Это объясняется тем, что поперечное сечение пучка на выходе из резонатора имеет конечные размеры, а распределение в пучке — модовую структуру. Наименьший поперечный размер пучка может быть создан при одномодовом режиме работы лазера.

В работе [13] приведены расчеты распределения интенсивности излучения в дальней зоне для гауссового пучка, ограниченного круглой диафрагмой. Распределение интенсивности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в дифракционной картине не зависит от степени ограничения пучка радиусом $\omega(z)$ апертурой, т. е. от величины $r_0/\omega(z)$. Например, распределение интенсивности при $r_0/\omega(z) \leq 0,2$ практически соответствует дифракции однородного пучка и, следовательно, при оценке распределения интенсивности можно использовать формулу (VI.4).

При выполнении условия $r_0/\omega(z) \geq 2,2$, что соответствует уменьшению величины поля на краях апертуры в 100 раз, распределение интенсивности описывается кривой Гаусса (VI.2). Угловая расходимость пучка, ограниченного дифракционным максимумом, в котором содержится большая часть световой энергии, может быть найдена из отношения

$$\beta = k\lambda / (r_0 \Gamma), \quad (\text{VI.6})$$

где k — коэффициент, числовое значение которого зависит от отношения $r_0/\omega(z)$:

$r_0/\omega(z)$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,8	2,2
k	1,22	1,25	1,28	1,34	1,43	1,55	1,74	3,42	3,73

Γ — увеличение телескопической системы.

Обычно при визуальной индикации отсчет производится по «центру тяжести» лазерного пучка, т. е. максимуму интенсивности,

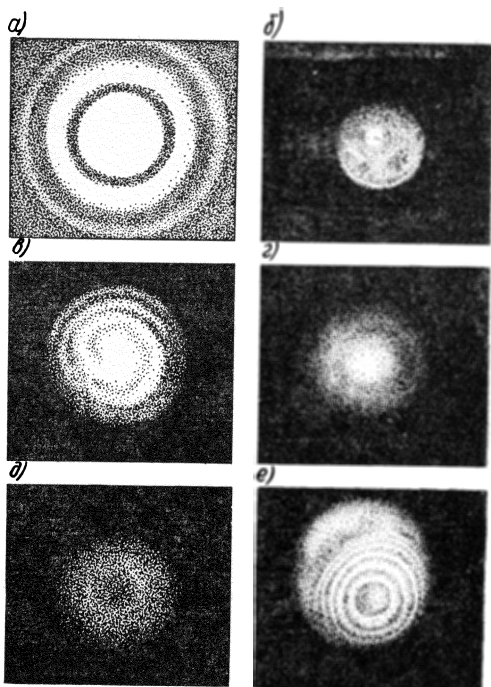


Рис. VI.5. Дифракционные картины:

a — идеальная; *b*, *в*, *г* — создаваемая на экране пучком одномодового лазера, снабженного телескопической системой, на расстоянии 2, 50, 700 м; *д* — получаемая на экране при дефокусировке телескопа (в центре основного максимума наблюдается падение освещенности); *е* — создаваемая на экране пучком многомодового лазера на расстоянии 100 м. Ось пучка смещена относительно оптической оси телескопа

который в большинстве случаев совпадает с центром кружка Эри. Визуальный отсчет можно производить и по другой какой-либо точке лазерного пучка, например по минимуму освещенности в центре светового пятна, который может быть создан при дефокусировке телескопической системы (рис. VI.5, *д*).

При прохождении лазерного пучка в атмосфере вследствие пульсации показателя преломления воздуха происходит перераспределение интенсивности в поперечном сечении пучка («кипение»)

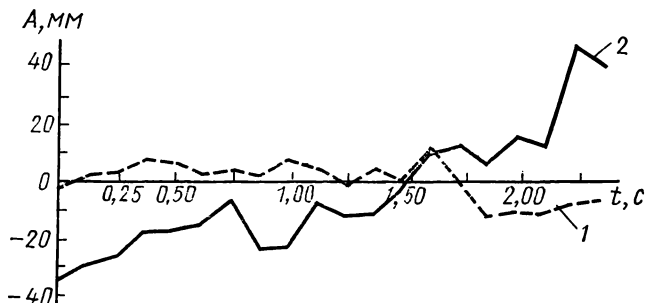


Рис. VI.6. Колебания светового пятна в вертикальной плоскости, наблюдаемые на трассах:
1 — 0,5 км; 2 — 1,1 км

колебания пучка, а также хаотические изменения поперечного сечения («дыхание»). На рис. VI.6 представлен график колебаний лазерного пучка на расстоянии 500, 1100 м.

Эмпирическая зависимость точности отсчета по световому пятну при работе с лазерным визиром, имеющим увеличение $\Gamma = 25\times$ на расстояниях до 1000 м, выражается формулой

$$m_0 = 0,23(r + A) + 1,5 \text{ мм}, \quad (\text{VI.7})$$

где r — радиус светового пятна (кружка Эри), мм; A — средняя квадратическая амплитуда колебаний светового пятна, мм.

Так как в большинстве случаев величина амплитуды колебаний лазерного пучка не известна, то для оценки точности отсчета на экране, имеющем координатную сетку в виде квадратов со стороной 1 см, может быть использовано выражение

$$m = 0,5 \cdot 10^{-5} L, \quad (\text{VI.8})$$

где L — расстояние между экраном и лазерным прибором, мм.

Числовой коэффициент в (VI.8) меняется в зависимости от увеличения телескопической системы, используемой для коллимирования светового пучка. Коэффициент 0,5 соответствует увеличению телескопической системы, равному $25\times$.

Увеличение точности визуального отсчета достигается размещением зонных пластин в световом пучке, выходящем из телескопической системы.

Зонные пластины могут быть выполнены из чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических колец, нанесенных на прозрачное основание. При установке такой зонной пластины на выходе из телескопа световой пучок вследствие дифракции преобразуется, и на экране можно наблюдать световое пятно, состоящее из чередующихся светлых и темных концентрических колец (рис. VI.7), позволяющих с высокой точностью отыскать ось светового пучка. Для отсчета по экрану, на который проектируется такое световое пятно, служит специальное приспособление, состоящее из окуляра с сеткой нитей.

Во время отсчета центр сетки нитей при помощи микрометрических винтов совмещается с центром дифракционной картины. Микрометрические винты обеспечивают вертикальное и горизонтальное перемещение с точностью до 0,01 мм. Точность отсчета по дифракционной картине в значительной степени зависит от условий прохождения лазерного пучка в атмосфере, так как из-за влияния турбулентности дифракционная картина становится нечеткой.

Для формирования пучка с заданными параметрами могут быть использованы зонные пластины и другого типа, например, такие, на которых прозрачные и непрозрачные зоны нанесены в виде полос [25].

Одним из первых приборов, который был использован в практике геодезических работ, можно назвать лазерный визир ЛВ-2 (рис. VI.8, а), который впервые был применен в 1965 г. в Москве для контроля положения горнопроходческого щита во время строительства туннеля для р. Неглинной.

Известные методы геодезического контроля направления проходки туннеля имеют ряд недостатков, так как контроль проходки осуществляется в отдельных точках и требуется остановка работ во время измерений. С появлением механической проходческой машины и проходческого комбайна скорости проходки сильно возросли, поэтому обычные методы маркшейдерского контроля проходки туннелей недостаточны. Это объясняется большой трудоемкостью обычных методов контроля и малой производительностью.

Наиболее удобно для задания направления проходки туннеля использовать светопроекционные приборы. Однако, если в качестве источника света использовать лампу накаливания или газо-

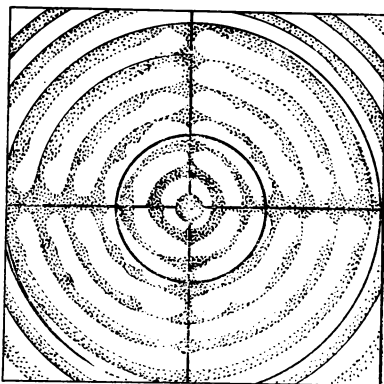


Рис. VI.7. Дифракционная картина, создаваемая на экране зонной пластиной, установленной на выходе из коллиматора лазерного теодолита. Для повышения точности отсчитывания на экране нанесены концентрические кольца

разрядную лампу, то они мало пригодны в условиях запыленной атмосферы. Это объясняется недостаточной мощностью светового пучка, так как средствами оптики нельзя получить узконаправленный пучок света при недостаточно малых размерах светящегося тела. Поэтому наиболее перспективными являются такие при-

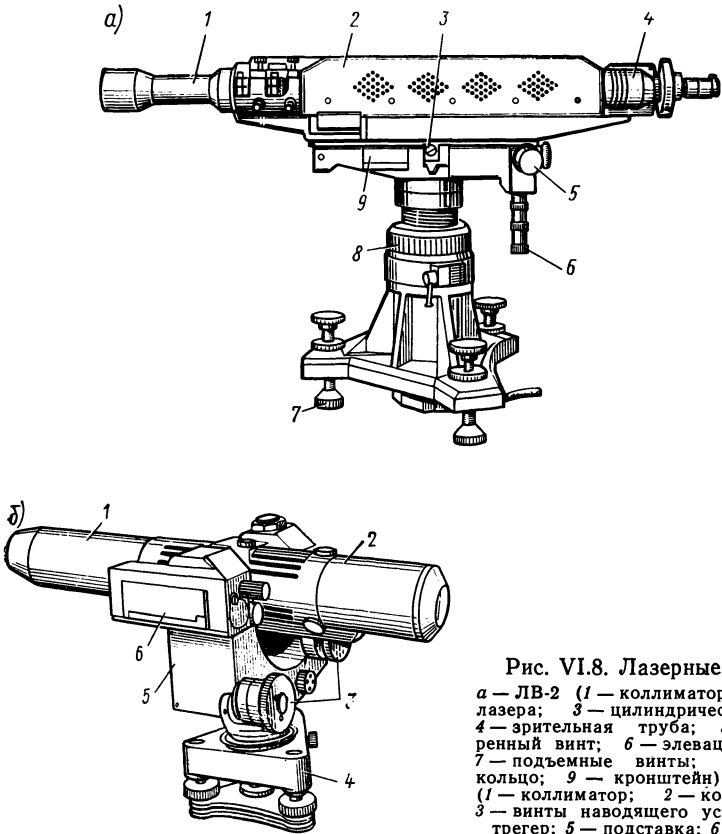


Рис. VI.8. Лазерные визиры:

a — ЛВ-2 (1 — коллиматор; 2 — корпус лазера; 3 — цилиндрические уровни; 4 — зрительная труба; 5 — микрометрический винт; 6 — элевационный винт; 7 — подъемные винты; 8 — стопорное кольцо; 9 — кронштейн); *б* — ЛВ-5 (1 — коллиматор; 2 — корпус лазера; 3 — винты наводящего устройства; 4 — трегер; 5 — подставка; 6 — уровень)

боры, у которых в качестве источника света используют лазеры.

При строительстве туннеля лазерный визир ЛВ-2 был установлен на неподвижном основании, и лазерному пучку задано прямое направление.

Для визуальной индикации положения горнопроходческого щита служат два экрана, укрепленные на передние и задние опорные кольца щита с помощью дуг (рис. VI.9, *a*). Установка экранов в рабочее положение осуществляется по цилиндрическим уровням. При установке экраны перемещаются по дугам до тех пор, пока пузырек уровня не устанавливался в нуль-пункте. Задний экран был полупрозрачным, поэтому часть лазерного пучка попадала

на передний экран. На каждом экране нанесена сетка квадратов со сторонами 10 мм.

Положение щита относительно проектного направления определялось путем взятия отсчетов по экранам. Помимо линейного смещения щита по осям X и Y (рис. VI.9, б) в процессе работы контролировались углы разворота щита α и β вокруг осей X и Y :

$$\operatorname{tg} \alpha = (\Delta x_1 - \Delta x_2) / L; \quad \operatorname{tg} \beta = (\Delta y_1 - \Delta y_2) / L,$$

где Δx_1 ; Δx_2 ; Δy_1 ; Δy_2 — приращения координат по осям X и Y при измерениях по первому и второму экранам, мм; L — расстояние между экранами, мм.

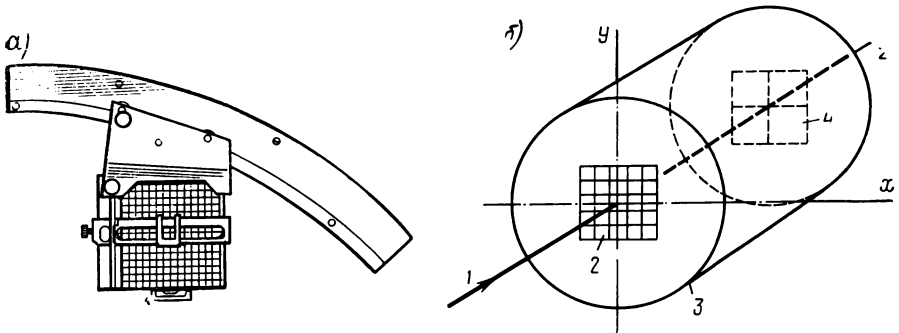


Рис. VI.9. Экран для визуального контроля (а) и схема определения координат щита (б):

1 — пучок лазерного излучения; 2 — задний экран; 3 — корпус проходческого щита; 4 — передний экран

Положение горнопроходческого щита было определено с точностью 3—4 мм на расстоянии до 100 м.

В настоящее время в СССР вместо ЛВ-2 выпускается более совершенный прибор ЛВ-5, более удобный в работе, обладающий меньшими габаритами и массой. ЛВ-5 создан на базе гелий-неонового лазера ОКГ-13 и устанавливается на стандартном штативе. Прибор имеет вертикальную и горизонтальную оси вращения и может поворачиваться в горизонтальной плоскости на 360° и в вертикальной — до 10° . Для точного наведения служит наводящее устройство. С горизонтальной осью прибора жестко связан цилиндрический контактный уровень с ценой деления $20''$. Питание прибора осуществляется от сети 220 В промышленной частоты или от аккумулятора 12 В. Потребляемая мощность составляет 20 Вт, масса блока питания — 1 кг, масса прибора — 5,8 кг.

Для работы в подземных условиях в СССР разработаны специальные взрывобезопасные лазерные приборы. К таким приборам относится взрывобезопасный лазерный указатель направления ЛУН-1 (рис. VI.10), созданный во Всесоюзном НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ). Он предназначен для задания направления при проведении подготовительных и

очистных выработок с использованием горнопроходческих машин или буровзрывным способом.

В настоящее время уже накоплен значительный опыт применения лазерных приборов, обеспечивающих визуальный контроль положения горнопроходческого щита при прокладке туннелей не только на прямолинейных, но и на криволинейных участках.

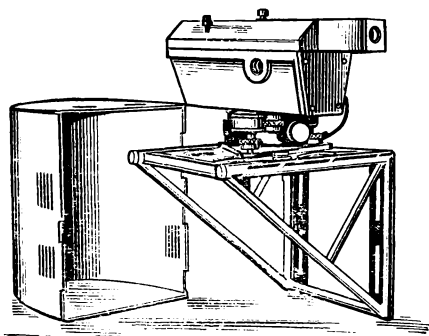


Рис. VI.10. Лазерный указатель направления ЛУН-1

На криволинейных участках трассы положение щита определяется относительно хорды, направление которой задается лазером. Величины вертикальных и горизонтальных отклонений относительно хорд для участков трассы переходных и круговых кривых рассчитываются заранее. Эти расчетные данные наносят на прозрачную пленку, которую крепят на прозрачной рамке из пластика, установленного на щите.

При разбивке круговой кривой на короткие хорды, стрелкой прогиба можно пренебречь, щит можно вести по прямолинейному пути, т. е. по хорде, но в этом случае количество перестановок лазерного излучателя увеличивается.

При использовании лазерных приборов для геодезического контроля при укладке труб, строительстве каналов, разработке подводных траншей можно значительно повысить производительность труда (до 20—50%), что обусловлено следующими факторами: лазерные приборы обеспечивают постоянное видимое направление; постоянный контроль за неупругими деформациями грунта; отпадает необходимость в проведении контрольных измерений, необходимость в использовании реек, отвесов и створных проволоч.

При прокладке канализационных магистралей традиционным методом приходилось выполнять не менее 60 операций по контролю задания направления и вычислению углов наклона на каждые 100 м между двумя входными шахтами и провешивать направления для натяжения проволоки через каждые 8 м. При использовании лазерных приборов отпала необходимость в проведении таких операций и значительно сократился объем геодезических работ.

При укладке трубы лазерный прибор может быть установлен на дне траншеи или колодца, а световому пучку задается требуемый уклон, и положение начала и конца трубы контролируется с помощью самоцентрирующейся полупрозрачной визирной марки, устанавливаемой внутри трубы (рис. VI.11). При работе конец трубы перемещают до тех пор, пока лазерный пучок не попадет в центры марок, установленных в начале и в конце секции трубы.

Значительные трудности возникают при использовании традиционных методов геодезического контроля во время работ, связанных со строительством мостов, подводных туннелей, разработкой подводных траншей и т. п., что обусловлено сложностью закрепления направлений и опорных точек над водной поверхностью. Применение лазерных приборов при работе над водной поверхностью предпочтительно, так как с их помощью можно задавать направления, а в местах пересечения лучей — опорные точки, которые хорошо видны ночью, а днем могут быть зафиксированы с помощью приемных устройств.

В 1969 г. в устье р. Кама были выполнены исследования, в задачу которых входило определение точности ориентирования земснаряда по лазерному пучку. С помощью лазерного визира ЛВ-3, который установили на берегу реки, пучком лазерного излучения задавался створ (рис. VI.12). На этом же берегу разбили базис, с концов которого выполнялась для контроля фототеодолитная съемка судна.

Чтобы получить всю трассу движения судна на одной стереопаре, фотографирование проводилось ночью, причем во время движения судна по лазерному створу судовой прожектор периодически включался и выключался с интервалом 5 с. В результате съемки на каждой пластинке получалось изображение трассы судна в виде пунктирной линии.

Обработка снимков проводилась на стереофотограмметрическом приборе «Стекометр». В результате обработки измерений оказалось, что на всем участке пути длиной около 4 км средняя квадратическая ошибка отклонения катера от оси створа составила ± 20 см.

Обычный метод ориентирования земснаряда в створе разрабатываемой подводной траншеи заключается в использовании створных знаков, установленных по берегам реки. Такой метод ориентирования приводит к ошибкам в несколько метров на расстоянии 1 км.

Лазерные геодезические приборы также применяли для съемки подкрановых путей.

Для обеспечения бесперебойной работы мостовых кранов в цехах промышленных предприятий периодически производят геодезическую съемку подкрановых путей, заключающуюся в определении планового и высотного положения рельсов.

К состоянию подкрановых путей предъявляются жесткие требования, поскольку перемещения мостовыми кранами больших грузов вызывают изменения в положении несущих колонн, а следовательно, и деформации подкрановых путей. Деформации вызываются, кроме того, неравномерными осадками фундаментов несущих колонн сооружения, температурными влияниями на конструкцию и др. В результате возможен перекосяк крана, преждевременный износ рельсов, балок, реборд ведущих колес крана и другие нарушения эксплуатационных норм.

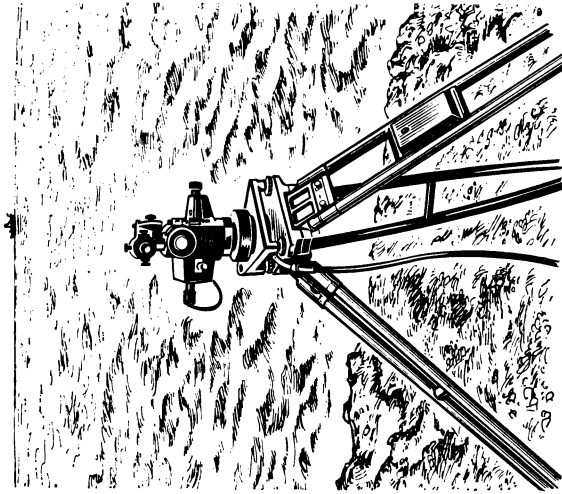


Рис. VI.12. Задание лазерного створа с помощью лазерного визира ЛВ-3 при строительстве подводной траншеи в устье р. Камеры (Набережные Челны)

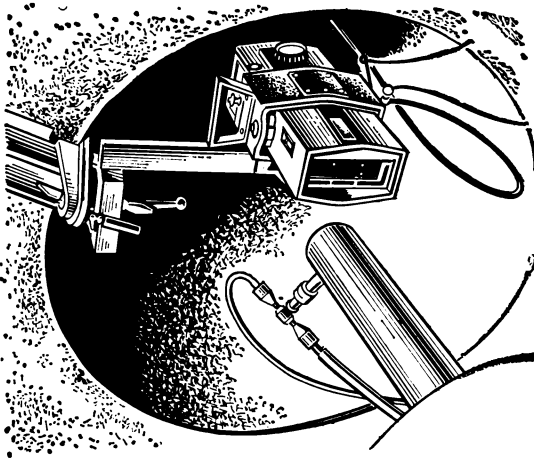


Рис. VI.11. Контроль укладки труб с помощью лазера

При съемке подкранового пути расстояние между осями рельсов обычно измеряют стальной рулеткой. Высоту головки рельса над исходной точкой определяют с помощью нивелира, а прямолинейность пути — створным методом. Как правило, в цехах заводов из-за плохих условий освещенности и сильных конвекционных потоков воздуха можно произвести съемку пути на расстоянии 40—70 м с одной точки стояния теодолита или нивелира.

Применение же лазеров позволяет с одной установки прибора проконтролировать положение рельса на участке 300—400 м. Это достигается благодаря высокой плотности энергии лазерного пучка, причем условия освещенности в цехе не имеют почти никакого значения.

Пучок лазерного излучения (рис. VI.13), ориентированный по проектному положению оси рельса. 3 и наблюдаемый визуально, является той базисной линией, относительно которой с помощью специального экрана 2 можно измерить деформацию головки рельса в плане и по высоте. Положение оси рельса относительно прямолинейного лазерного пучка определяют визуально по проекции пучка на экране. Экран последовательно устанавливают в требуемых точках и берут отсчеты по «центру тяжести» светового пятна, т. е. по максимуму освещенности.

При работе с прибором ЛВ-1, у которого диаметр объектива равен 34 мм, а длина волны излучения лазера — 0,63 мкм, ошибка отсчета на экране, имеющем координатную сетку, в виде квадратов со стороной 1 см:

$$m = 0,5 \cdot 10^{-5} L,$$

где L — расстояние между лазером и экраном, мм.

При небольших расстояниях между лазером и экраном наблюдается четкая дифракционная картина. При увеличении расстояния за счет удлинения пути луча в атмосфере начинают сказываться случайные изменения параметров лазерного пучка, вызываемые флуктуациями показателя преломления воздуха, и поэтому дифракционная картина становится размытой.

При съемке подкранового пути допустимая ошибка определения положения оси рельса в плане характеризуется величиной 2—3 мм. Такая точность достижима при съемке лазерным визиром на расстоянии до 300 м.

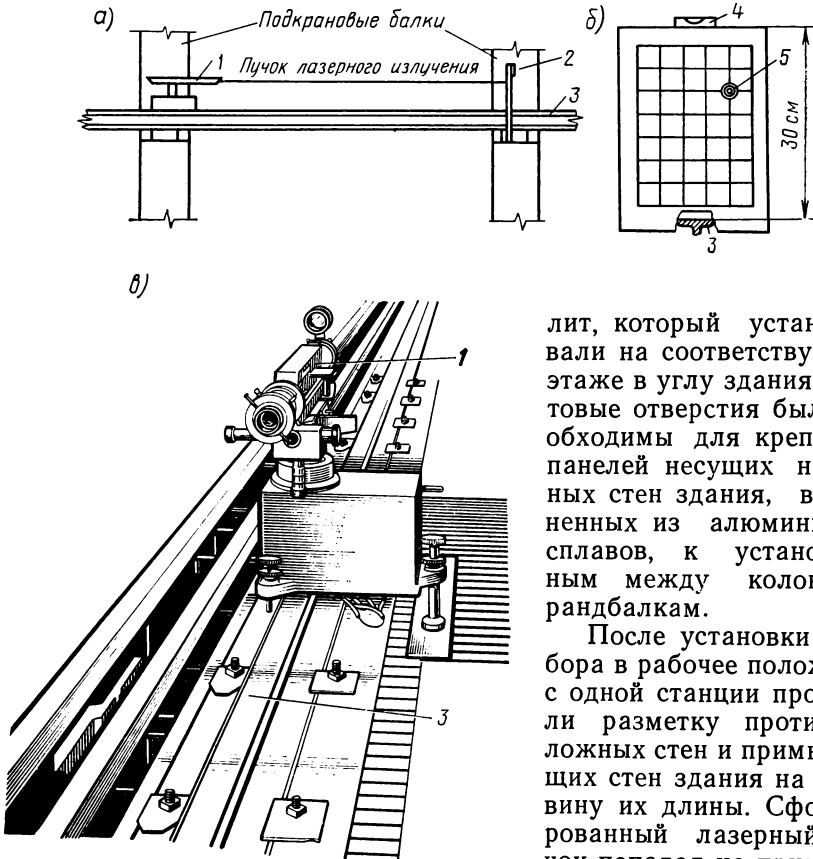
На рис. VI.14 приведены графики, полученные при съемке подкранового пути длиной 270 м лазером и теодолитом. Измерения в прямом и обратном направлениях по каждой нити рельса выполнялись дважды с применением ЛВ-1 и дважды с применением теодолита. При съемке лазерным визиром потребовалось сделать только одну станцию, а при съемке теодолитом — четыре. Результаты обеих съемок контролировались значениями расстояний между осями рельсов, полученными из непосредственных измерений стальной рулеткой, принимаемых за истинные величины.

Ошибки определения оси рельсов 1 и 2 с помощью ЛВ-1 и теодолита оказались одинаковыми (3 мм), но затрата времени на съемку с помощью лазера почти в три раза меньше, чем при съемке теодолитом.

Процесс съемки подкранового пути с помощью лазера довольно легко поддается автоматизации. В настоящее время для съемки подкрановых путей используют лазерный визир ЛВ-5. Довольно эффективным является использование лазерных приборов при выполнении разбивочных работ. Например, при строительстве двух 110-этажных зданий торгового центра в Нью-Йорке для разметки более 140 тыс. болтовых отверстий был применен лазерный теодо-

Рис. VI.13. Схема определения положения рельса в плане и по высоте:

а — расположение лазера, рельса и экрана; б — экран; в — лазерный визир, установленный на подкрановых путях Луганской ГРЭС; 1 — лазер; 2 — экран; 3 — рельс; 4 — уровень; 5 — проекция пучка лазерного излучения на экране



лит, который устанавливали на соответствующем этаже в углу здания. Болтовые отверстия были необходимы для крепления панелей несущих наружных стен здания, выполненных из алюминиевых сплавов, к установленным между колоннами рандбалкам.

После установки прибора в рабочее положение с одной станции проводили разметку противоположных стен и примыкающих стен здания на половину их длины. Сфокусированный лазерный пучок попадал на приклеен-

ную в центральной части колонны фотобумагу, покрытую активатором.

Для того чтобы на фотобумаге отобразилась точка, лазерным пучком облучали фотобумагу в течение 7 с, а затем на нее наносили фиксатор. Затем метку наносили бородком на колонну, а фотобумагу снимали.

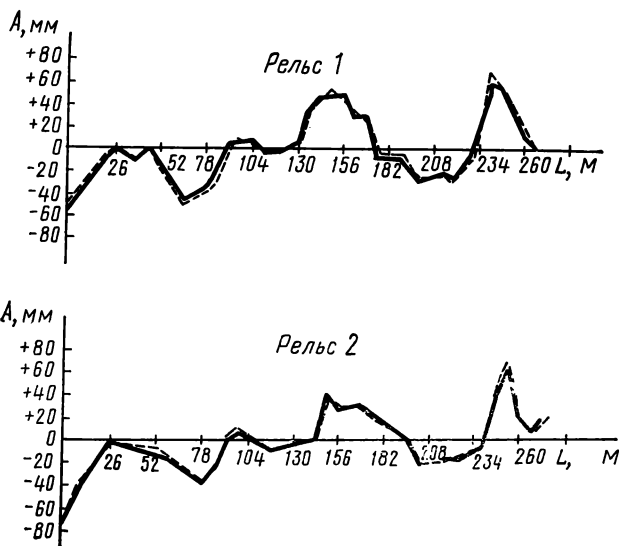


Рис. VI.14. График ошибок в положении подкрановых рельсов: Штриховой линией показано положение оси рельсов по результатам съемки лазером, сплошной — по результатам съемки теодолитом

Процесс разметки отверстий с помощью лазера значительно быстрее, чем с помощью теодолита, так как отпадает необходимость наблюдателю, стоящему у прибора, корректировать действия рабочего, делающего разметку.

В настоящее время лазерные приборы с визуальной индикацией лазерного пучка также применяются при выверке осей вращающихся печей, для задания направления горным выработкам, контроля передвижки ленточного конвейера, при разбивочных работах в процессе строительства подводных туннелей, при строительстве протяженных промышленных комплексов (прокатных станков, транспортных систем, коксовых батарей, вращающихся цементных печей и т. д.) [16].

§ VI.3. ЛАЗЕРНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

При выполнении некоторых видов работ, связанных с вертикальной планировкой, рытьем траншей и другими, контроль за положением рабочих органов машин и механизмов осуществляют

с помощью теодолита. Если такой контроль осуществлять сложно, то на местности с помощью вспомогательных средств (вешек, кольев, марок, шнуров) задают проектное направление (плоскость), относительно которого выполняют соответствующие работы. Недостаток обычных методов геодезического контроля заключается в том, что в процессе выполнения работ знаки, служащие для закрепления проектного положения, могут быть уничтожены и поэтому приходится их восстанавливать, что влияет на сроки выполнения и точность. С увеличением производительности строительных машин традиционные средства и обычные методы геодезического контроля становятся тормозом на пути повышения производительности работ.

С появлением лазеров созданы реальные условия не только для повышения производительности работ, но и полной их автоматизации. Проектное направление при использовании лазеров может быть задано узконаправленным лазерным пучком, близким к идеальной линии. Положение этого пучка не изменяется, и задаваемое им опорное направление не уничтожается в процессе работы. Отсчет положения рабочего органа машины относительно опорного направления можно осуществлять с помощью фотоприемников автоматически с высокой точностью и с любой дискретностью — практически непрерывно. Кроме того применение лазеров сокращает потребность в обслуживающем персонале, что ведет к уменьшению влияния субъективных ошибок на результаты работ; устраняет частные контрольные измерения, мешающие работе.

В ряде случаев при управлении строительными машинами (например, дренажными машинами, землечерпальными снарядами, машинами для рихтовки железнодорожного пути и др.) необходима высокая точность контроля положения рабочего органа только в одной плоскости, в то время как в плоскости, перпендикулярной к ней, можно допустить значительную свободу движения.

На рис. VII.15 показана структурная схема лазерной автоматической системы планово-высотного контроля и управления. Лазерная система состоит из лазерного датчика 1 опорного направления, фотоприемника 2, блока электроники 3 и исполнительного механизма 4.

При контроле и управлении строительными машинами в одной плоскости применяют лазерные излучатели, задающие не линию, а плоскость. В качестве излучателей могут быть использованы лазерные визиры, лазерные теодолиты и лазерные нивелиры, снабженные насадками в виде цилиндрических линз либо вращающихся зеркал (рис. VI.16). При этом направление развертки пучка всегда должно быть перпендикулярно плоскости измерений. Например, для строительных машин, положение которых контролируется в плане, световая плоскость должна быть вертикальной.

Основные параметры лазерной системы автоматического управления — надежность, точность и дальность действия, а также простота и удобство в эксплуатации.

Надежность лазерной системы управления зависит в основном от надежности лазера, которая характеризуется временем работы 500—2000 ч.

За рубежом созданы лазеры, гарантийное время работы которых составляет 10^4 ч и более. К лазерным системам, используемым для автоматизации контроля и управления, предъявляются точно такие же требования, как и к лазерам, используемым в приборах с визуальной индикацией светового луча; они должны работать в сложных метеорологических условиях при резких перепадах температуры и высокой влажности.

Дальность действия лазерных систем зависит от мощности лазера, применяемой оптики, чувствительности фотоприемника, метеорологической

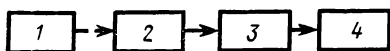


Рис. VI.15. Структурная схема лазерной автоматической системы планово-высотного контроля и управления строительными машинами

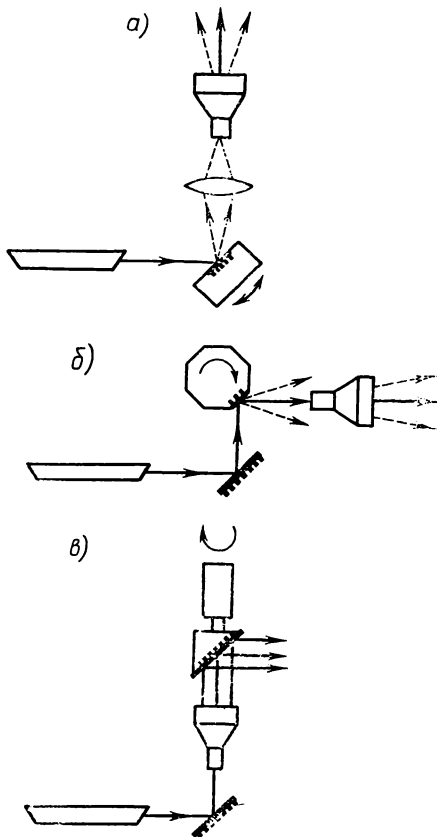


Рис. VI.16. Устройства для развертки пучка лазерного излучения:

a — с помощью гальванометра; *б* — с помощью вращающейся многогранной призмы; *в* — с помощью вращающейся прямоугольной призмы

дальности видимости, угловой скорости развертки лазерного пучка, требуемой точности.

Для приближенной оценки дальности действия L лазерной системы геодезического контроля и управления можно использовать формулу [26]

$$L = \sqrt{(P_l \tau_a \tau_n \varphi_\Phi d^2) (P_\Phi \theta^2)}, \quad (\text{VI.9})$$

где $P_{\text{л}}$ — мощность лазера мВт; $\tau_{\text{а}}$, $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{ф}}$ — коэффициенты пропускания атмосферы, передатчика и приемника; d — диаметр входного отверстия объектива приемника, м; $P_{\text{ф}}$ — минимальная мощность лазерного излучения, принимаемая фотозлементом, мВт; θ — расходимость лазерного пучка на выходе из передатчика, рад.

Например, при $P_{\text{л}} = 2$ мВт; $P_{\text{ф}} = 0,01$ мВт; $\theta = 20'' = 10^{-4}$ град; $d = 0,01$ м; $\tau_{\text{н}} = 0,7$; $\tau_{\text{а}} = 0,8$, $\tau_{\text{ф}} = 0,6$ дальность действия $L = 9$ км.

Дальность действия лазерных систем автоматического контроля и управления зависит от требуемой точности, так как при увеличении расстояния между излучателями и фотоприемником возрастают ошибки измерений, вызываемые влиянием внешних условий на положение лазерного пучка и его форму, увеличивается его поперечное сечение.

Расстояние между излучателем и управляемым объектом, как правило, не превышает 500 м, а во многих случаях, где требуется большая точность, его сокращают до 100 м. Обычно считают, что максимальное рабочее расстояние лежит в пределах прямой видимости.

Точность управления с помощью лазера зависит от стабильности направления и точности регистрации положения лазерного пучка с помощью фотозлектрического устройства, а также от скорости регистрации гидравлического привода. Стабильность направления лазерного пучка, в свою очередь, зависит от следующих факторов: ухода пучка из-за изменения температуры корпуса лазера; короткопериодических колебаний пучка, вызываемых пульсациями показателя преломления воздуха; изгибания пучка, вызываемого рефракцией; смещения пучка, вызываемого смещением штатива из-за деформаций и осадок грунта, а также влияния ветровых нагрузок.

Величина ухода пучка из-за изменения температуры корпуса лазера зависит от его конструкции и для каждого типа лазера имеет свое значение. Например, уход пучка лазера типа ОКГ-11 из-за нагрева корпуса прибора может быть равен $30''$ в течение 6 мин. На рис. VI.17 показано изменение угла наклона α лазерного пучка в зависимости от времени t [9].

Такой значительный уход лазерного пучка из-за изменения температуры корпуса объясняется тем, что ОКГ-11 имеет специфическую конструкцию. Зеркала резонатора и газоразрядная трубка крепятся к металлическому основанию, выполненному в виде толстой пластины. При включении прибора основание нагревается, расширяется и деформируется, вследствие чего лазерный пучок отклоняется от первоначального положения. Изменение угла наклона лазерного пучка, выходящего из ОКГ-11, может быть описано эмпирическим уравнением

$$\alpha = 33,6'' e^{-t/2,6},$$

где t — время с момента включения прибора, мин.

На рис. VI.18 показаны графики углового смещения лазерного пучка, генерируемого лазерами типов ОКГ-12 и ОКГ-13 [9]. Как

видно из графиков, время установления окончательного теплового баланса для ОКГ-13 (кривая 2) может достигать одного часа и более (лазерный пучок за это время изменит направление на $40''$), для лазера типа ОКГ-12 (кривая 1) — около 40 мин, а пучок изменяет направление до $150''$.

Лазеры с холодными катодами обеспечивают более высокую стабильность направления пучка. Отклонение его от начального направления после включения лазера может достигать величины порядка $5-10''$. Таким образом, при работе с лазерными приборами необходимо начинать измерения после их предварительного разогрева,

обычно лазеры обеспечивают стабильность направления с ошибкой $0,2-200$ угл. $с/°С$. Лазеры, применяемые в геодезии, должны обеспечивать стабильность направления с ошибкой $0,2$ угл. $с/°С$ и лучше. Однако в паспорте не указывается величина нестабильности положения лазерного пучка, и поэтому ее необходимо определять самостоятельно.

Влияние короткопериодических колебаний, вызываемых пульсациями показателя преломления атмосферы, можно полностью исключить или значительно уменьшить, если осреднять результаты измерений. Значительно большее влияние на результаты измерений оказывает вертикальная рефракция лазерного пучка, которая для практических расчетов обычно принимается равной $2''$, т. е. 1 мм на 100 м. Ошибки, вызываемые влиянием рефракции, практически исключить нельзя. Для уменьшения влияния рефракции обычно рекомендуют, чтобы лазерный пучок проходил как можно выше над подстилающей поверхностью, и чтобы измерения производились в благоприятное для работы время, т. е. утром в течение двух часов после восхода солнца и вечером — часа за два

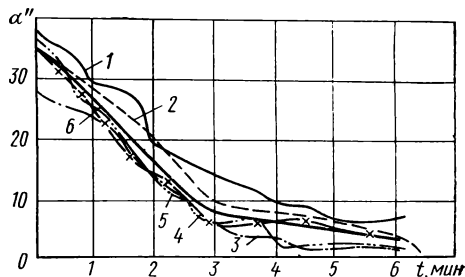


Рис. VI.17. Кривые изменения (1—5) и среднего изменения (6) угла наклона пучка лазерного излучения после включения лазера типа ОКГ-11

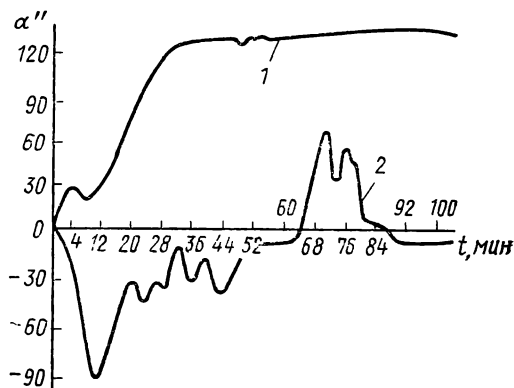


Рис. VI.18. Графики углового смещения пучка лазеров типа ОКГ-12 и ОКГ-13 в зависимости от времени

до захода солнца или в пасмурный день, когда рефракция значительно меньше.

Для уменьшения влияния на стабильность положения пучка сдвигов штатива, вызываемых деформациями грунта и ветровыми нагрузками, обычно в качестве излучателей используют приборы массой 16—20 кг, устанавливаемые на массивные металлические штативы. Кроме того, под ножки штатива забивают кольца, а работы выполняют при слабом и умеренном ветре.

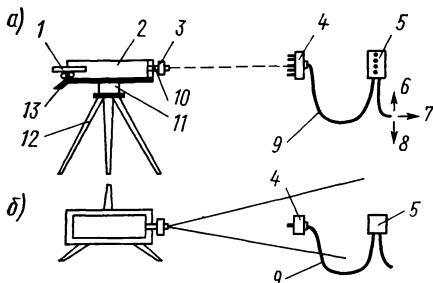


Рис. VI.19. Схема одномерного управления строительными механизмами с помощью лазерного прибора:

а — профиль; *б* — план; 1 — дальномерная труба; 2 — лазер; 3 — цилиндрическая линза; 4 — приемная головка; 5 — блок управления; 6, 7, 8 — соответственно сигналы управления *вверх, заданное положение, вниз*; 9 — соединительный кабель в бронированном шланге; 10 — телескоп; 11 — устройство для юстировки; 12 — штатив; 13 — наклоняющаяся плита

Точность регистрации положения лазерного пучка зависит от конкретного типа используемого фоторегистрирующего устройства, которое, как правило, состоит из набора фотоэлементов, расположенных перпендикулярно плоскости развертки пучка (рис. VI.19).

На рис. VI.20 показана структурная схема фотоэлектрического устройства, предназначенного для одномерного управления. Опорная вертикальная плоскость в сечении задается с помощью лазерного излучателя. Узкополосные фильтры 2, установленные перед фотоэлементами 3, подавляют световые помехи. Электрические блоки 4—9 усиливают и формируют сигнал, а также подают управляющие напряжения на рабочие органы машины, снабженные магнитными клапанами и гидравлическим приводом.

Наиболее простым фотоэлектрическим устройством, регистрирующим положение лазерного пучка, является фотоэлемент, закрепленный в каретке, которая перемещается вручную или с помощью электродвигателя вдоль рейки с делениями.

При выполнении работ, в зависимости от практических задач, рейку устанавливают вертикально или горизонтально. Отсчеты положения светового пятна, создаваемого лазером, берут с помощью нониуса по рейке по диаметрально противоположным краям пучка (для исключения влияния его ширины).

За окончательное значение принимают среднее из двух отсчетов. Для удобства выполнения работ момент взятия отсчета фиксируется звуковым или световым сигналом.

Точность работы такого устройства характеризуется величиной порядка 2—4 мм на 100 м и зависит как от конструктивных особенностей фотоприемника и передатчика, так и от внешних условий.

Значительно большая точность регистрации положения лазерного пучка может быть достигнута при использовании двух или четырех фотоприемников. При этом повышение точности измерений достигается путем разделения одного пучка на два или четыре и затем сравнения их интенсивностей фотоэлектрическими методами. При попадании лазерного пучка в центр промежутка между фотоэлементами (рис. VI.21) на выходе устройства сигнал не формируется. Смещение оси лазерного пучка из зоны чувствительно-

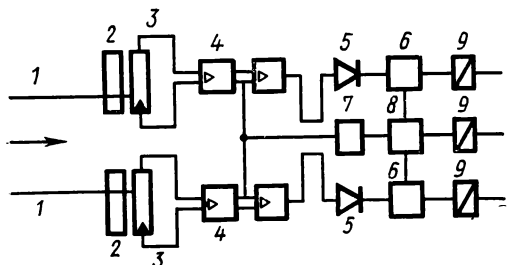


Рис. VI.20. Структурная схема фотоэлектрического воспринимающего устройства:

1 — пучок лазерного излучения в виде веера; 2 — фильтр для подавления интерференционных помех; 3 — фотоэлемент; 4 — усилитель; 5 — выпрямитель; 6 — дифференциальная ступень; 7 — регулирующий усилитель; 8 — суммирующий блок; 9 — реле с одним рабочим контактом

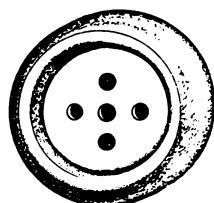


Рис. VI.21. Лазерное приемное устройство (квартантдетектор), состоящее из четырех фотоэлементов

сти вызывает разбалансировку электрической схемы, в результате чего вырабатывается сигнал соответствующей полярности. Рассмотренные регистрирующие фотоэлектрические устройства можно назвать *полярными*. Они позволяют в значительной степени исключить влияние колебаний лазерного пучка, вызываемых пульсациями показателя преломления атмосферы. Это достигается тем, что автоматически выполняется осреднение измерений за интервал времени порядка 5 с и более. В этом случае влияние короткопериодических колебаний пучка на результаты измерений практически исключается (составляет 0,1—0,3%).

Недостатком, существенно снижающим область применения полярных фотоэлектрических устройств, является малый диапазон измеряемых смещений оси пучка. Для увеличения диапазона измерений применяют следящие устройства, состоящие из двух или четырех фотоэлементов. На рис. VI.22 показано приемное устройство следящей системы, состоящей из объектива 1, корпуса 2, в котором установлены два фотоприемника, направляющих штанг 3 и сервопривода 4.

Во время работы лазерный пучок попадает в объектив и расщепляется на два пучка, каждый из которых засвечивает фотоприемники. После усиления и обработки сигналов с выхода фотоприемников в блоке электроники вырабатываются управляющие напряжения, которые подаются на сервопривод (асинхронный электродвигатель).

Чувствительная головка следящей системы смещается вдоль направляющих штанг до тех пор, пока сигналы на выходе фотоприемников не будут одинаковы. Такое устройство позволяет получить высокую точность измерений (1—2 мм на 100 м), но увеличивается время измерений и возможны сбои в работе.

Более широким диапазоном измерений, но меньшей точностью обладает линейная матрица фотоэлементов. Точность фиксации положения лазерного пучка с помощью такого устройства зависит от расстояния между фотоэлементами, размера фотоэлементов,

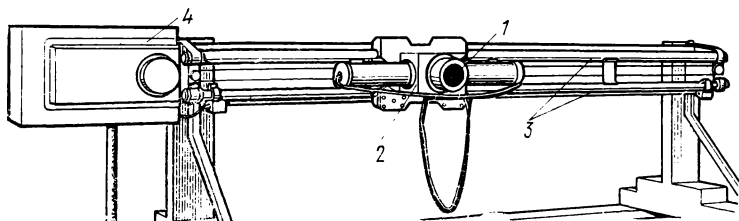


Рис. VI.22. Приемное устройство лазерной следящей системы

диаметра пучка и характеризуется величиной от единиц миллиметров до единиц сантиметров. Плоскостная матрица из фотоэлементов позволяет регистрировать положение пучка в двух ортогональных направлениях с такой же точностью, как и линейная матрица. Диапазон измерений с помощью таких устройств невелик и составляет единицы, а иногда и десятки сантиметров. Фотоэлектрические регистрирующие системы с большим диапазоном измерений, работающие на этом принципе, довольно сложны и поэтому разработка их, как правило, нецелесообразна.

При геодезическом контроле положения движущихся объектов может быть использована вращающаяся линейная матрица фотоэлементов. При вращении линейной матрицы фотоэлементов лазерный пучок засвечивает соответствующий фотоэлемент. В этот момент фиксируется угол поворота линейной матрицы фотоэлементов относительно исходного направления (оси координат), а также номер освещенного фотоэлемента, что соответствует полярным координатам лазерного пучка. К недостаткам такого фотоприемника относится громоздкость вращающейся части.

Для стационарных условий измерений используют более сложные оптико-электронные регистрирующие устройства (ОЭРУ), видиконы, автоколлимационные устройства, диссекторы, фиксирующие положение оси лазерного пучка до сотых долей миллиметра, но в малом диапазоне (до единиц сантиметров).

В СССР разработан ряд систем для автоматизации геодезического контроля машин и механизмов в плане и по высоте, а также для автоматизации управления. Одной из первых лазерных систем, созданных в СССР для автоматического контроля, можно назвать лазерную систему визирования горнопроходческого щита

(рис. VI.23), разработанную в 1965 г. Федоровым А. С. и Захаровой О. С. В качестве излучателя в этой системе использовался лазерный визир ЛВ-2 (см. рис. VI.8, а), с помощью которого задавалось проектное направление проходки туннеля.

Приемное устройство состоит из линейной матрицы фотосопротивлений, укрепленной на выходной оси вала электродвигателя (рис. VI.24). Оно размещено в металлическом кожухе цилиндрической формы, передняя стенка которого закрыта светофильтром, ослабляющим влияние фоновых засветок и улучшающим отношение сигнал/шум. Во время работы его укрепили на проходческом щите. При включении приемного устройства линейная матрица фотоэлементов, установленных в один ряд, начинает вращаться. Она представляет собой 21 фотосопротивление размером в

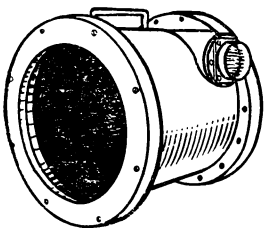


Рис. VI.24. Приемное устройство системы визирования горно-проходческого щита

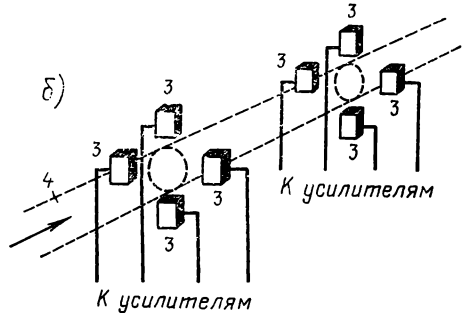
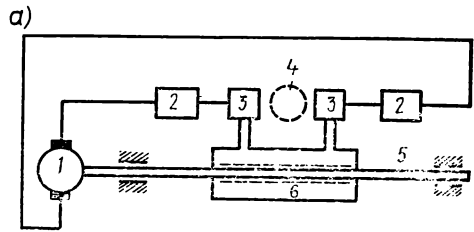


Рис. VI.23. Схема автоматического определения координат щита:

а — матрица с двумя фотоэлементами; б — матрица с четырьмя фотоэлементами; 1 — электродвигатель; 2 — усилители фототока; 3 — вал для перемещения каретки; 4 — пучок лазерного излучения; 5 — фотоэлементы; 6 — каретка

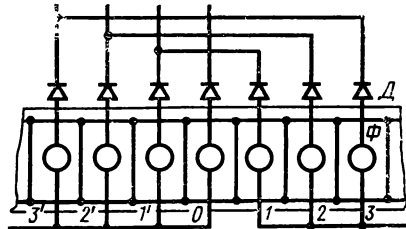


Рис. VI.25. Схематическое изображение линейной матрицы фотоэлементов:

Ф — фотосопротивления ФС-К1; Д — диод Д9Е; 0 — центральное фотосопротивление; 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3' — параллельно включенные группы фотосопротивлений

10 мм. Одна контактная группа шагового искателя связана с общим выводом двух параллельно включенных фотосопротивлений, причем начальное положение скользящего контакта шагового ис-

кателя связано с центральным «нулевым» фотосопротивлением. При повороте линейной матрицы на 180° специальный контакт, помещенный на ее оси, включает цепь питания шагового искателя, скользящий контакт которого переключается на соединение с первой группой фотосопротивлений 1 и $1''$ (рис. VI.25).

При повороте линейной матрицы на следующие 180° скользящий контакт переключается на соединение со второй группой фотосопротивлений $2-2'$ и т. д. Мотор вращается до тех пор, пока не будет включена следующая группа фотосопротивлений, на одно из которых падает пучок лазерного излучения. В момент встречи фотосопротивления с лучом фототок освещенного фотосопротивления поступает на усилительный элемент (поляризационное реле), замыкающий цепь питания электродвигателя и включающий цепь питания индикатора.

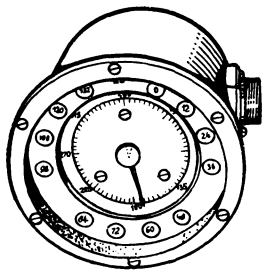


Рис. VI.26. Индикатор приемного устройства системы визирования горнопроходческого щита

Индикатор вместе с системой коммутации установлен в таком же кожухе, как и приемное устройство (рис. VI.26). На передней стенке индикатора имеется двенадцать лампочек и шкала со стрелкой, проградуированная в градусах. Каждая лампочка связана с определенным фотосопротивлением через контактную группу шагового искателя.

Положение пучка на приемном экране определяется в полярных координатах. Когда пучок попадает на фотосопротивление, на индикаторе загорается соответствующая лампочка, указывающая величину отклонения пучка по радиусу (в мм) и полярный угол радиуса-вектора (в град).

Испытания лазерной автоматической системы визирования горнопроходческого щита проводились на участке туннеля длиной 130 м. Для сравнения одновременно проверяли положение горнопроходческого щита обычными маркшейдерскими методами. При оценке точности контроля результаты маркшейдерской проверки принимались за истинные. Ошибка определения положения щита с помощью лазерной системы составила 4 мм.

Лазерные системы контроля положения горнопроходческого щита применяют также при проходке туннелей в США, Швеции, ФРГ [7, 16]. Лазерные автоматические системы применяют для передвижки ленточных конвейеров большой протяженности, которые широко используют для транспортировки породы при производстве вскрышных работ. Обычно применяют непрерывную передвижку ленточного конвейера, при которой нет необходимости разборки конвейера на секции, а следовательно, и монтажа. Быстрее и проще осуществляется рихтовка конвейерного става.

Для осуществления непрерывной передвижки каркасы ленточных конвейеров устанавливают на шпалах, поверх которых прокладывают одну или две нитки рельсов.

При непрерывном способе передвижки обычно используют трактор, снабженный навесным оборудованием в виде обоймы с четырьмя горизонтальными роликами (рис. VI.27). Обойма, управляемая при помощи ручного штурвала, опускается на рельс и зажимает его своими роликами. Затем трактор с установленными на нем гидромеханизмом или лебедкой поднимает обойму. Вместе с рельсом, захваченным обоймой, поднимается и та стона става, по которой проложен рельс. Приподняв обойму на

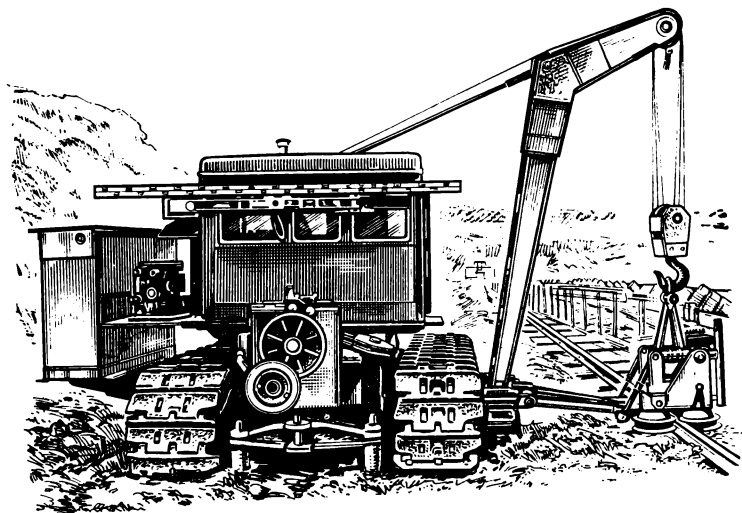


Рис. VI.27. Передвижка ленточного конвейера

высоту 15—20 см, трактор начинает двигаться вдоль конвейера параллельно его оси. При первом проходе производится только отрыв шпал от грунта, став конвейера не сдвигается. После отрыва става начинается передвижка. Секции става приподнимаются над почвой и оттягиваются в поперечном направлении на себя на сравнительно небольшой шаг передвижки (обычно 0,3—1,5 м). В процессе передвижки рельс изгибается одновременно как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях в виде волны, что часто приводит к деформациям (или разрушению) рельсошпальной решетки, секций и роlikоопор-конвейера. С каждым циклом передвижки искривления става конвейера становятся все больше и больше.

Чтобы устранить изгибы става после его передвижки, проводится рихтовка всего конвейера, что вызывает дополнительные затраты средств и времени. Однако и она не устраняет всех нарушений, возникающих в конвейере. Если при каждом цикле передвижки трактор будет двигаться строго параллельно оси кон-

вейера по заданному направлению, то большей части нарушений можно избежать.

Наиболее перспективным для ориентирования механизмов по заданному направлению является использование узконаправленного лазерного пучка.

Для автоматизации ориентирования передвигчика может быть использована лазерная система, состоящая из излучателя (лазерного визира) и приемного устройства, выполненного в виде следя-

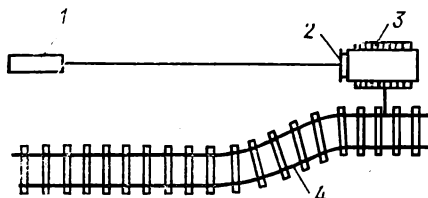


Рис. VI.28. Схема ориентирования передвигчика с помощью лазерного визира: 1 — лазерный визир; 2 — следящая система; 3 — передвигчик; 4 — колейер

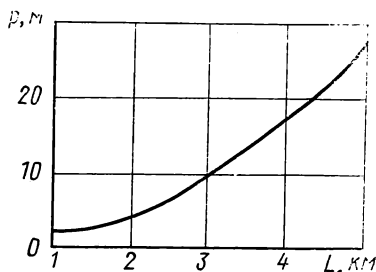


Рис. VI.29. Боковое отклонение земснаряда в зависимости от расстояния L

щей системы (см. рис. VI.22). Испытания такой системы были проведены при передвижке ленточного конвейера на Михайловском карьере Курской магнитной аномалии. Во время работы лазерный визир был установлен в начальной точке трассы и ориентировался таким образом, чтобы лазерный пучок проходил параллельно оси става конвейера (рис. VI.28). Для лучшего захвата приемника лазерный пучок развевывался в вертикальной плоскости с помощью цилиндрической линзы. Приемное устройство было размещено на задней части кабины передвигчика (см. рис. VI.27), блок питания и блок цифровой индикации — в самой кабине. Водитель управляет передвигчиком, пользуясь показаниями индикатора, которые фиксируют отклонения трактора влево или вправо от проектного направления с точностью до 1 см. Одновременно положение передвигчика контролируется теодолитом, с помощью которого берут отсчеты по горизонтально установленной рейке. Как показали испытания, отклонения передвигчика от проектного направления не превышают ± 5 см на участке длиной 200 м.

Как в СССР, так и за рубежом ведутся работы по использованию лазеров для ориентирования земснарядов при разработке подводных траншей. В настоящее время ориентирование земснаряда осуществляется визуально по створным знакам, расположенным по берегам водоема в соответствии с проектным направлением укладки трубопровода.

Точность ориентирования земснаряда по створным знакам при разработке подводных траншей зависит от расстояния, метеороло-

гических условий и параметров створа. На рис. VI.29 показана зависимость величины минимального бокового отклонения от створа при визуальном ориентировании земснаряда.

Ошибки в ориентировании земснаряда приводят к дополнительным разработкам подводного грунта, что не только затягивает сроки разработки траншеи и повышает затраты, но и затрудняет укладку трубопровода.

Для повышения точности контроля положения земснаряда в створе разрабатываемой подводной траншеи в 1973 г. в СССР создана лазерная система ориентирования. В качестве излучателя в этой системе используется лазерный визир ЛВ-4 с оптико-механическим сканирующим узлом (рис. VI.30).

Чтобы развернуть лазерный пучок в вертикальной

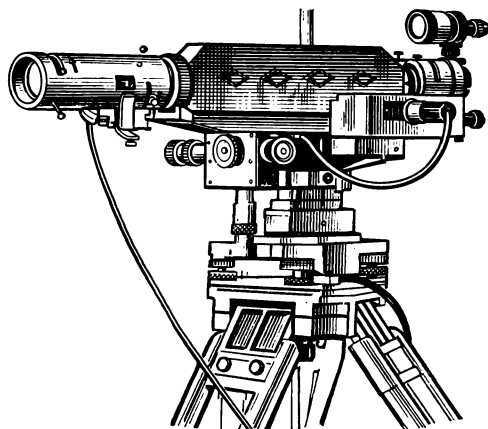


Рис. VI.30. Лазерный визир ЛВ-4

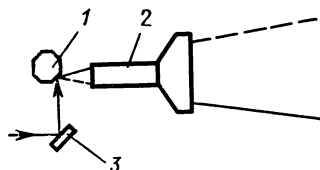


Рис. VI.31. Оптическая схема устройства развертки лазерного пучка, применяемого при ориентировании земснаряда:

1 — вращающийся зеркальный барабан;
2 — коллиматор; 3 — зеркало

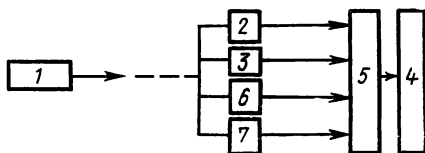


Рис. VI.32. Структурная схема лазерной системы ориентирования земснаряда

плоскости, используют восьмигранный зеркальный барабан, установленный по ходу лазерного пучка перед телескопической системой (рис. VI.31). Угол развертки пучка лазерного излучения после телескопа составляет $50'$, а угловая расходимость пучка в горизонтальной плоскости — примерно $0,4'$.

Приемное устройство состоит из четырех идентичных фотоприемников 2, 3, 6, 7, которые облучаются излучателем 1, блока электроники 5 и блока индикации 4 (рис. VI.32).

При ориентировании земснаряда по пучку лазерного излучения (рис. VI.33) на блок электроники поступают сигналы от фотоприемников, на которые попадает пучок лазерного излучения. В соот-

ветствии с поступающей информацией земснаряд возвращают в створ с помощью папильонажных лебедок.

Как показали испытания лазерной системы ориентирования, точность удержания земснаряда относительно пучка лазерного излучения, составляет в безветренную погоду ± 12 см, а при слабом ветре ± 20 см. Дальность действия системы не менее 6 км. Таким образом, применение системы ориентирования резко повышает качество разрабатываемой подводной траншеи, уменьшает объем земляных работ и позволяет обеспечивать круглосуточную работу земснаряда.

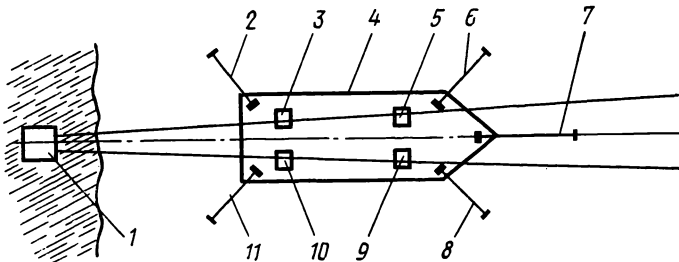


Рис. VI.33. Схема ориентирования земснаряда с помощью лазерного визира:

1 — лазерный визир; 2, 6, 7, 8, 11 — папильонажные лебедки; 3, 5, 9, 10 — фотоприемники; 4 — земснаряд

Довольно перспективным является использование лазеров для автоматизации процесса рихтовки железнодорожного пути. Повышение скорости движения железнодорожных составов обуславливает в настоящее время жесткие требования к состоянию путей, в частности к величинам прогиба рельсов. Для устранения прогиба рельсов применяются путерихтовочные машины, имеющие скорость передвижения 5 км/ч и более.

Современные средства геодезического контроля за положением исполнительного механизма путерихтовочной машины довольно трудоемки и не позволяют автоматизировать процесс рихтовки. Использование лазеров позволяет полностью устранить эти недостатки. Для управления рабочим органом путерихтовочной машины создана лазерная система автоматического управления ЛАРС-1. Система ЛАРС-1 состоит из передающего и приемного устройств, а передающее устройство — из датчика направления и блока управления. Датчик направления служит для создания опорной оптической плоскости или двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

Опорная оптическая плоскость в виде веера создается с помощью цилиндрической линзы, а две оптические плоскости — светоделительной призмой и двумя цилиндрическими линзами, расположенными под углом 90° друг к другу. Блок управления обеспечи-

вает включение лазера, наведение его на приемное устройство и подключение устройства радиоуправления.

Приемное устройство состоит из фотоприемника и релейного блока. Фотоприемник обеспечивает прием излучения, анализ положения приемника относительно пучка и выдачу соответствующих корректирующих сигналов рассогласования. Релейный блок преобразует сигналы рассогласования с фотоприемника в управляющие сигналы, подаваемые на гидропривод и контрольные устройства.

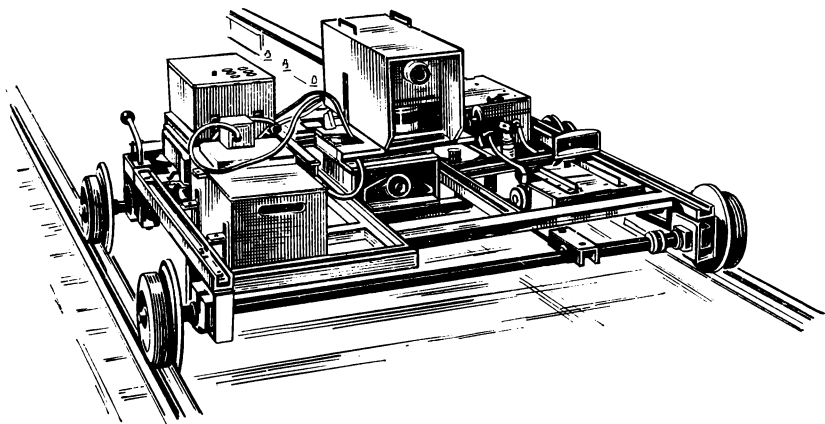


Рис. VI.34 Лазерный датчик направления путерихтовочной машины

На тележке (рис. VI.34), перемещающейся по железнодорожному полотну, устанавливают датчик направления, блок управления и аккумуляторную батарею. Во время работы тележка обычно находится на расстоянии 200—400 м от путерихтовочной машины. Фотоприемник устанавливают на передней тележке машины (рис. VI.35), а релейный блок — в кабине машины. Лазерный пучок датчика направления наводят на фотоприемное устройство.

При движении машины по железнодорожному полотну фотоприемник перемещается относительно пучка, так как рельсы не являются прямой линией, параллельной пучку. В результате перемещения на выходе приемника вырабатывается корректирующий сигнал, который подается на исполнительный механизм, возвращающий приемник в первоначальное относительно пучка положение.

Перемещение фотоприемника относительно машины используют для подачи команд на силовые установки машины, которые перемещают рельсы вместе со шпалами в ту или иную сторону до тех пор, пока корректирующий сигнал с выхода фотоприемника не станет равным нулю. Как показали испытания, ЛАРС-1 обеспечивает точность рихтовки $\pm 2,0$ мм.

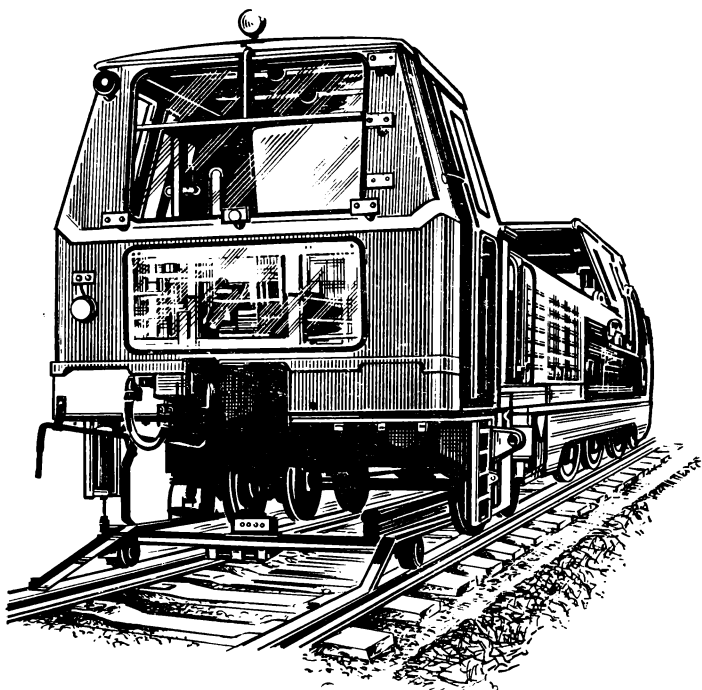


Рис. VI.35. Фотоприемное устройство, устанавливаемое на путерихтовочной машине

Таблица VI.2

Модель, страна	Назначение	Дальность действия, м	Диапазон измеряемых величин, мм	Точность измерения
LGE 9005/LGE 9006 (ФРГ)	Для управления грейдерами, дорожными комбайнами и машинами для рихтовки ж/д полотна	200	± 80	1 мм на расстоянии 200 м
LGE 9010/LGE 9001 (ФРГ)	Для управления дренажными машинами и бульдозерами	200	± 100	1 см на расстоянии 200 м
LGE 9010/LGE 9001 (ФРГ)	То же	3000	—	4 см на расстоянии 1 км
Geoplane 300 (Швеция)	Для нивелирования	150	Зависит от длины рейки	2 мм на расстоянии 100 м
Laserplane (США)	Для управления грейдерами, дорожными комбайнами, бульдозерами	600	± 100	6 мм на расстоянии 600 м

Помимо рихтовки эта система может быть использована и для нивелирования железнодорожного пути.

Лазерные устройства, предназначенные для автоматического одномерного управления строительными машинами, выпускаемые за рубежом (табл. VI.2), обеспечивают автоматическое управление положением рабочих органов машины, которые приводятся в то или иное положение гидравлической системой, а также точность от 1 до 10 мм на каждые 100 м.

§ VI.4. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАНИРОВКИ

При проведении земляных работ на объектах водохозяйственного, сельскохозяйственного и дорожного строительства во многих случаях требуется обеспечение плоской поверхности с заданной степенью точности. Например, согласно требованиям строительных норм и правил (СНиП), при планировке чехов рисовых систем отклонение спланированной поверхности от средней плоскости в каждой точке не должно превышать 5 см. Такую точность можно обеспечить только при условии систематического контроля.

Обычно высотный геодезический контроль осуществляют геометрическим нивелированием, причем несколько раз: до начала строительства, периодически в процессе строительства, и после окончания — исполнительное нивелирование.

Существующие в настоящее время методы контроля планировочных работ основаны на том, что качество планировки проверяют нивелированием по контрольным точкам. Причем, чем выше требования к качеству планировки, тем большее количество точек располагают на контролируемой поверхности. После нивелирования и обработки полученных данных составляют схему, на которой показывают, какие точки и насколько лежат выше или ниже проектной плоскости. При этом методе контроля строительные механизмы необходимо либо останавливать, либо перебрасывать на другой участок на время производства геодезических работ. При обнаружении отклонений от проектных отметок производится переделка сооружений и дополнительный геодезический контроль. Такая система контроля трудоемка и не позволяет постоянно и активно влиять на работу землеройной техники, не предотвращает возможности брака в работе и последующих переделок. Машинист землеройной машины (скрепера, грейдера, бульдозера) при проведении работы вынужден ориентироваться на различные временные геодезические знаки (колья, вехи и т. п.), которые в процессе работы могут быть уничтожены и требуют неоднократного восстановления. Для контроля за качеством работы машинисту постоянно приходится отрываться от управления машиной, что существенно снижает производительность труда. При проведении планировочных земельных работ машинист «на глазок» определяет вертикальное перемещение рабочего органа, что не обеспечивает точную оценку профиля местности и ведет к проведению повторных планировок

одного и того же участка с промежуточным геодезическим контролем. При таком методе контроля точность выполнения заданного профиля зависит от субъективных качеств и квалификации машиниста, что не позволяет полностью использовать технические возможности землеройной техники. В результате сроки и стоимость строительства увеличиваются. Трудность обеспечения необходимого качества земляных работ ограничивает возможность производства их в ночное время.

Для повышения эффективности высотного геодезического контроля и качества выполняемых работ нужен метод, дающий объективную оценку профиля обрабатываемой поверхности и обеспечивающий постоянную информацию о высотных отметках поверхности, т. е. метод автоматического контроля высотных отметок обрабатываемой поверхности.

Одним из наиболее перспективных и прогрессивных методов ориентирования строительных машин при планировании площадей является определение высотного положения машины или ее рабочего органа относительно опорной плоскости, заданной оптическим излучением [11, 15].

Таблица VI.3

Параметры	Вид землеройных машин					
	экскаваторы		авто- грейде- ры	бульд- зеры	скре- перы	планиров- щики
	траншей- ные	дренукла- дочные				
Дальность действия, м	1500	1500	500	500	500	500
Точность контроля, мм	±5	±3	±3	±20	±20	±10
Диапазон рабочих темпера- тур, °С	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Относительная влажность, %	+50	+50	+50	+50	+50	+50
Освещенность плоскости при- емного экрана, лк	98	98	98	98	98	98
Освещенность плоскости при- емного экрана, лк	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Источник питания, В	Аккумуляторная батарея					12 и 24 В
Потребляемая мощность, Вт	15	15	15	15	15	15
Масса переносимого оборудо- вания, кг	20	20	20	20	20	20
Время на перестановку аппара- туры (без учета времени на перевозки), мин	15	15	15	20	20	20

В табл. VI.3 приведены требования к системам автоматического контроля и управления мелиоративными дорожными и планировочными машинами при проведении земляных работ.

С учетом этих требований в Министерстве электронной промышленности разработана система автоматического контроля СКП-1. Датчик высотного положения создает стабилизированную в пространстве оптическую опорную плоскость, расположенную параллельно той поверхности, которая должна быть получена в результате проводимой планировки. На землеройной машине устанавливают

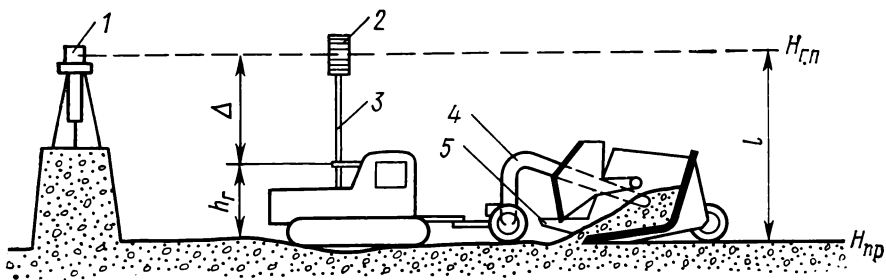


Рис. VI.36. Принцип действия системы контроля СКП-1:

1 — лазерный датчик опорной плоскости; 2 — фотоприемное устройство; 3 — штанга; 4 — планировочная машина; 5 — рабочий орган (нож)

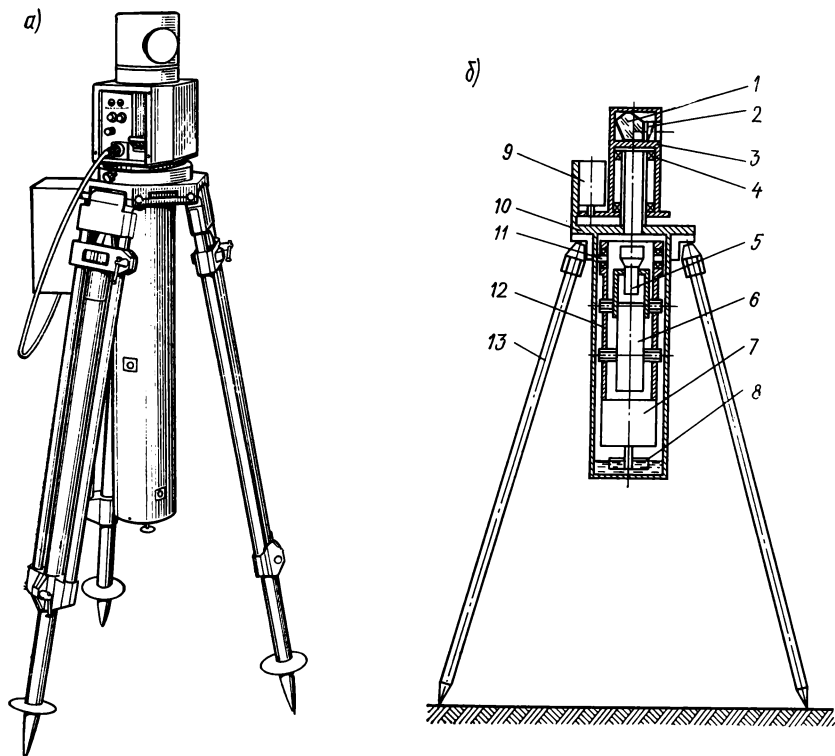


Рис. VI.37. Датчик опорной плоскости (а) и его разрез (б):

1 — пентапризма; 2 — клин; 3 — корпус пентапризмы; 4 — шарикоподшипник; 5 — коллиматор; 6 — лазер; 7 — блок питания; 8 — демпфер; 9 — электродвигатель; 10 — основание; 11 — карданный шарнир; 12 — узел; 13 — штатив

приемное устройство, дающее информацию о положении машины относительно опорной плоскости.

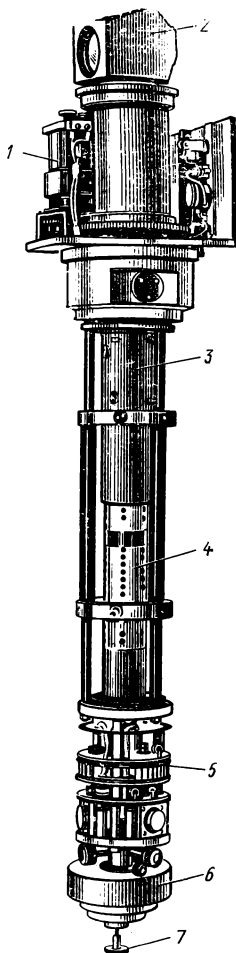


Рис. VI.38. Датчик опорной плоскости (без кожуха):

1 — электродвигатель; 2 — корпус пентапризмы; 3 — коллиматор; 4 — гелий-неоновый лазер ОКГ-13; 5 — блок питания; 6 — демпфер; 7 — арретир

СКП-1 (рис. VI.36) состоит из трех функционально связанных между собой блоков лазерного датчика, неподвижно установленного на опоре в точке с известной отметкой; фотоприемного устройства, закрепленного вертикально на землеройной машине, и индикатора положения (см. рис. VI.40), установленного в кабине машины.

Лазерный датчик (рис. VI.37 и 38) формирует оптическую опорную плоскость, относительно которой определяются высотные отметки точек поверхности. Фотоприемное устройство (рис. VI.39) регистрирует положение машины относительно этой плоскости. Индикатор (рис.

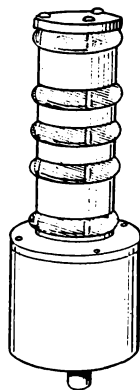


Рис. VI.39. Фотоприемное устройство

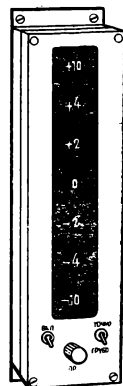


Рис. VI.40. Индикатор положения

VI.40) отображает вводимую в него информацию о высотном положении машины.

Для обеспечения стабильного положения в пространстве оптической плоскости узел 12 датчика опорной плоскости (рис. VI.37, б) подвешивается к основанию 10 на карданном шарнире 11. Осно-

вание 10 закреплено на штативе 13. В узле 12 установлен блок питания 7 лазера 6, коллиматор 5 и демпфер 8 для успокоения колебаний подвески. Для компенсации неточностей в изготовлении пентапризмы 1 ставится клин 2 с малой величиной клиновости. При вращении клина вокруг собственной оси он исправляет ход лучей после пентапризмы.

Внешний вид лазерного датчика опорной плоскости и его схема показаны на рис. VI.37, а и б, а датчик без кожуха на рис. VI.38.

Лазер 6 (см. VI.37, б), укрепленный вертикально, создает пучок, распространяющийся вверх. Пучок, выходя из лазера, проходит коллиматор 5, служащий для уменьшения расходимости и возможности фокусирования пучка. После коллиматора широкий пучок с малой расходимостью попадает на пентапризму 1, поворачивающую пучок на 90°. Корпус 3 пентапризмы, установленный в подшипниках 4, связан с электродвигателем 9, который приводит пентапризму во вращение, при этом пучок разворачивается в оптическую плоскость. Скорость вращения пентапризмы можно менять, изменяя напряжение, подводимое к электродвигателю.

Датчик опорной плоскости обеспечивает стабилизацию в пространстве оптической плоскости, которая достигается благодаря использованию карданной подвески. Эта подвеска на шарикоподшипниках обладает существенными преимуществами перед другими видами подвесок — проволочными, ленточными, пружинными: при достаточной чувствительности она весьма надежна, проста по конструкции, долговечна, обеспечивает жесткую ориентировку стабилизирующего элемента относительно прибора, имеет малые габариты и массу, нечувствительна к колебаниям температуры и ударам, сравнительно дешева и легко ремонтируется. При точной установке шарикоподшипников в опоре, обеспечивающей равномерный зажим колец подшипников, чувствительность такой подвески определяется только трением в подшипниках. Подобная конструкция обеспечивает высокую чувствительность, порядка нескольких секунд, лишь в сравнительно узком диапазоне углов наклона стабилизатора, не превышающем нескольких минут (чувствительность в «точке»). С увеличением углов наклона начинают сказываться неточности геометрической формы деталей подшипника, трение в сепараторе, неравномерная смазка, частицы пыли и другие факторы, снижающие чувствительность подвески и вызывающие смещение нулевого отсчета или исходной установки.

Для предварительной установки прибора на корпусе имеется круглый уровень с ценой деления 5'. Датчик устанавливают выдвиганием ног штатива с помощью винтов точного перемещения. При наклонах штатива подвижная часть под действием гравитационных сил будет совершать затухание колебания. Для успокоения свободных колебаний подвески применяют масляный демпфер 6 (см. рис. VI.38), представляющий собой ребристый цилиндр, помещенный в масляный кожух. Успокоение осуществляется вследствие вязкости, которая тормозит движение цилиндра.

Для предохранения подвески прибора от ударов при переноске и транспортировке установлен арретир, который жестко фиксирует подвеску.

Число оборотов пентапризмы выбирают, исходя из максимальной скорости 5,5 км/ч (1,5 м/с) перемещения землеройных машин при планировке земельных участков. Эта же величина является основной для выбора диапазона регистрации высотных отметок фотоприемным устройством. Необходимо учитывать, что при максимальной вертикальной составляющей скорости, возникающей при движении машины по уклону, фотоприемник не должен выходить из зоны оптической плоскости за время между двумя оборотами развертывающего устройства. Наклон базы машины, при котором лазерный пучок уходит за пределы диапазона регистрации, составляет $\beta = 3^\circ$. Вертикальная составляющая скорости перемещения фотоприемника при движении машины по наклонной плоскости с углом наклона β равна

$$v_v = v_p \sin \beta = 1,5 \cdot 0,05 \approx 0,08 \text{ м/с.}$$

Чтобы фотоприемник не успел сойти с пучка, частота вращения пентапризмы должна составлять не менее $n' = v_v/B$, где $B = 0,1$ м — половина длины диапазона регистрации. Принята частота вращения пентапризмы $n' = 1 \text{ с}^{-1}$, превышающая минимально необходимую ($n'_{\min} = 0,8 \text{ с}^{-1}$).

Длительность светового импульса τ на расстоянии $L = 500$ м при диаметре лазерного пучка $D = 50$ мм, эффективном размере приемного элемента $b = 20$ мм и частоте развертки $f = 1$ Гц

$$\tau = (D + b)/(2\pi fL) \quad (\text{VI.10})$$

оказалась равной $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 22$ мкс. При такой длительности светового импульса наиболее целесообразно применение в качестве светочувствительного элемента фотодиодов, обладающих достаточным быстродействием, высокой чувствительностью, вибропрочностью и малыми габаритами. Следует иметь в виду, что при использовании лазерного пучка для создания опорной оптической плоскости точность геодезического контроля существенно зависит от расстояния между излучателем и фотоприемником. Наибольшее влияние на точность оказывает кривизна Земли.

Превышения точек, отсчитанные от уровенной поверхности для касательной к ней в текущей точке опорной плоскости, различаются на величину Δh .

Задавая различные значения L , получим следующие значения Δh :

$D, \text{ м}$	. . .	100	200	300	400	500	1000
$\Delta h, \text{ мм}$	. .	0,8	3,1	7,1	12,6	19,6	78,4

Если требуемая точность определения высотных отметок соизмерима с величиной Δh , то в определение превышений необходимо вводить поправки за кривизну Земли.

Влияние ошибки Δh за кривизну Земли можно значительно уменьшить, если световой плоскости задавать определенный уклон.

Требуемый угол α между касательной и секущей, т. е. между горизонтальной плоскостью и лазерным пучком в точке установки датчика можно найти, если поставить условие, что ошибка δ на всем протяжении L не должна превышать определенной величины.

Из рис. VI.41 следует, что ошибка в точке F

$$\delta_1 = BC - BF. \quad (VI.11)$$

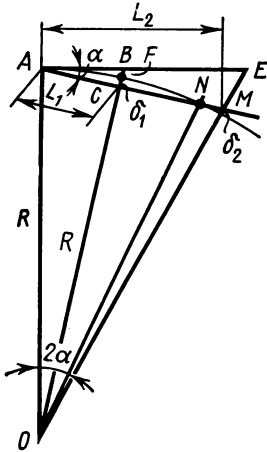


Рис. VI.41. Определение поправки за кривизну Земли:

AE — горизонтальная линия; AM — секущая; R — радиус Земли

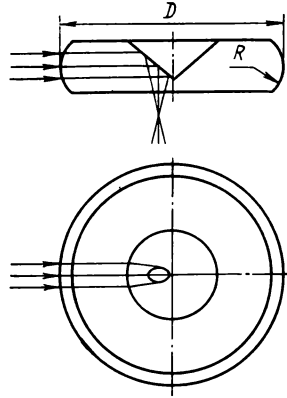


Рис. VI.42. Ход лучей в световодном диске

Поправку за кривизну Земли $BF = \Delta h$ вычисляют по формуле

$$\Delta h = L_1^2 / (2R). \quad (VI.12)$$

Так как угол α мал, то из $\triangle ABC$ получим

$$BC = AC\alpha = L_1\alpha, \quad (VI.13)$$

а из $\triangle OAC$

$$\alpha = L_1 / R. \quad (VI.14)$$

Подставляя (VI.14) в (VI.13), получим

$$BC = L_1^2 / R, \quad (VI.15)$$

следовательно,

$$\delta_1 = L_1^2 / R - L_1^2 / (2R) = L_1^2 / (2R). \quad (VI.16)$$

Для практических расчетов значение угла α определяют, зная допустимую величину δ_1 :

$$\alpha = \sqrt{2\delta_1 / R}. \quad (VI.17)$$

Определим расстояние L_2 , на котором значение ошибки δ равно δ_2 и не превышает допустимого значения δ_1 в точке F .

Из рис. VI.41 видно, что

$$\delta_2 = L_2^2 / (2R) - \alpha L_2. \quad (\text{VI.18})$$

Учитывая (VI.14) и принимая $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, получим

$$L_2 = L_1 \pm \sqrt{L_1^2 + 2\delta R},$$

откуда

$$L_2 = 3,42 \sqrt{\delta R}. \quad (\text{VI.19})$$

Таким образом, если допустимая ошибка определения высотных отметок не превышает $\pm \delta$, то направляя лазерный пучок по секущей, образующей с касательной угла $\alpha = \sqrt{2\delta/R\rho}$ на расстояниях до $L_2 = 3,42\sqrt{\delta R}$, влияние кривизны Земли можно не учитывать. Если $\delta = 5$ мм, то $\alpha = 8,1''$, при этом можно работать до расстояний в 620 м.

Исходя из специфики планировочных работ на больших площадях, взаимное положение строительной машины и датчика излучения во время работы меняется произвольным образом, следовательно, приемное устройство, установленное на машине, должно принимать излучение в угле $2\omega = 360^\circ$, т. е. иметь круговой обзор. Поэтому оптическая часть приемника представляет собой диск (рис. VI.42) — линзу из прозрачного материала в оптическом диапазоне излучения, способного принимать из различных точек плоскости излучение и фокусировать его на светочувствительном элементе.

Основное достоинство приемника кругового обзора — простота конструкции и изготовления оптических элементов приемника; основной недостаток — малый коэффициент усиления оптической системы приемника, что обусловлено рассеиванием части лазерного потока в горизонтальной плоскости при отражении от конической поверхности. Этот недостаток не может быть устранен путем улучшения конструкции данной оптической системы.

Фотоприемное устройство системы СКП-1 (рис. VI.39) состоит из набора дисков — линз, в которые вмонтированы светочувствительные элементы (фотодиоды), и электронного блока, в котором скомпонованы автономные фотоусилители и счетнорешающее устройство. Фотодиоды 1 (рис. VI.43) связаны с автономными фотоусилителями 2, установленными в электронном блоке, расположенном в нижней части фотоприемного устройства. Для регистрации высотного положения с заданной точностью достаточно трех центральных светочувствительных элементов. Верхний и нижний элементы служат как указатели направления, в котором перемещается к центру пучка средний фотоприемник при движении землеройной машины по поверхности со значительными перепадами по высоте. Запоминающее устройство приемника позволяет определить направление его смещения относительно заданной световой плоскости даже в том случае, если это смещение превосходит диапазон регистрации самого фотоприемника (приемник находится вне зоны действия оптической плоскости).

Фотоприемное устройство закрепляют на трубчатой штанге и устанавливают на кабине машины, что обеспечивает возможность одновременного контроля работы многих машин в радиусе действия системы. Фотоприемное устройство может быть установлено на различной высоте путем вертикального перемещения штанги, что обеспечивает возможность одновременной работы машин на чеках с различными проектными отметками.

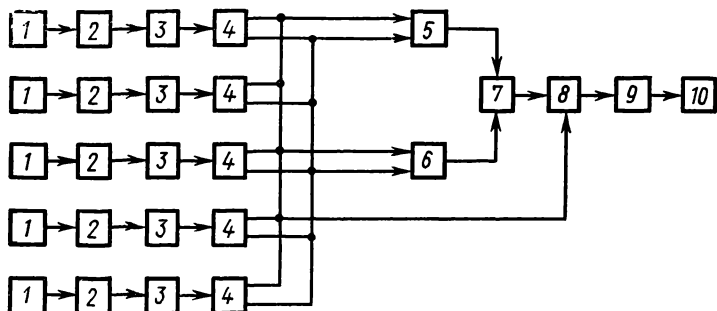


Рис. VI.43. Структурная схема фотоприемного устройства СКП-1:

1 — фотодиоды; 2 — фотоусилители; 3 — одновибраторы; 4 — дифференцирующие цепи; 5 — генератор импульсов; 6 — делитель; 7 — сумматор; 8 — счетчик; 9 — дешифратор; 10 — индикатор

Индикатор (см. рис. VI.40) представляет собой отдельный блок, в который входят семь транзисторных усилителей мощности. Нагрузками усилителей мощности являются лампочки накаливания. На лицевой панели индикатора расположены выключатель питания фотоприемного устройства, предохранитель и переключатель рода работ *грубо* — *точно*. В положении переключателя *грубо* отключаются промежуточные усилители мощности и работают лишь средняя, верхняя и нижняя лампы индикатора. Этот режим работы применяют при предварительной планировке площадей с большими перепадами высот. При точной (окончательной) планировке переключатель рода работ ставят в положение *точно*. Приемное устройство питается от тракторного аккумулятора напряжением 12 В, его потребляемая мощность составляет 3 Вт.

Планировочные работы с применением лазерной системы контроля выполняют в соответствии с составленным проектом. При этом в качестве опорных используют те же самые геодезические знаки, что и при обычных геодезических методах контроля планировочных работ. Некоторые особенности связаны с выбором места установки датчика опорной плоскости и определения границ участка, обслуживаемого одним датчиком. При производстве планировочных работ на мелиорируемых землях руководствуются проектом вертикальной планировки, разработанным по материалам инженерных изысканий.

Лазерная система может обслуживать одновременно четыре основных квадрата, при этом максимальное удаление приемника от излучателя составит $400 \cdot \sqrt{2} = 570$ м. Практически это расстояние редко превышает 500 м, так как со сторонами квадратов обычно совмещают оросительные или водосбросные каналы, валики или служебные дороги.

При работе с лазерной системой в качестве опорных используют плановые и высотные знаки, установленные в период изысканий. Однако за период между изысканиями и строительством некоторые знаки могут быть повреждены или уничтожены. Поэтому следует выделять два этапа: подготовку участка и обслуживание системы в процессе работы.

В ходе подготовки участка проводят осмотр существующих и восстановление поврежденных плановых и высотных знаков. В центре участка вблизи вершины, общей для четырех квадратов, выбирают место для установки датчика опорной плоскости. Грунт в этом месте срезается или подсыпается до отметки $H_{пр}$ (см. рис. VI.36).

Проектная отметка планируемого участка

$$H_{пр} = H_{г.п} - h_r - \Delta, \quad (VI.20)$$

$H_{г.п}$ — горизонт прибора (отметка центра развертки пучка лазерного излучения, мм; h_r — высота планировочного механизма от земли до верхней точки механизма, мм; Δ — запас для нормального функционирования фотоприемника (расстояние от нижнего края пятого до середины центрального элемента), мм.

Если место установки датчика опорной плоскости выбирают на удалении от опорных точек, вблизи от датчика необходимо установить временный репер для определения $H_{г.п}$ — горизонта прибора. Как показали экспериментальные работы, наиболее удобным является расположение репера на расстоянии 3—5 м от датчика.

Обслуживание лазерной системы в процессе работы заключается в следующем. Датчик устанавливают в выбранном месте; с помощью подъемных винтов штатива пузырек круглого уровня приводят на середину. Для обеспечения устойчивости прибора при установке его на сыпном грунте штатив следует ставить на металлические кольца, забитые в грунт.

На временном репере устанавливают рейку, по которой берут отсчеты по верхнему и нижнему краям пучка. Из этих отсчетов вычисляют средний отсчет a , соответствующий положению оси пучка, затем горизонт прибора $H_{г.п}$, т. е.

$$H_{г.п} = H_p + a, \quad (VI.21)$$

где H_p — отметка временного репера, мм.

Правильность определения горизонта прибора проверяют по четырем контрольным точкам, отметки которых получают геометрическим нивелированием. Точки располагают так, чтобы углы между направлениями на них были близки к 90° . Расстояния до контрольных точек следовало бы брать равными дальности дей-

ствия системы. Однако с увеличением расстояния точность нахождения положения центра лазерного пучка вследствие влияния флуктуаций показателя преломления воздуха на пути распространения луча уменьшается. Экспериментальные работы показывают, что оптимальным является расположение контрольных точек на расстоянии 100 м от датчика. При выполнении поверки на контрольных точках устанавливают нивелирные рейки и рассчитывают отсчеты a_i по ним, соответствующие горизонтальному положению опорной плоскости

$$a_i = H_{г.п} - H_i, \quad (VI.22)$$

где i и H_i — номер контрольной точки и ее отметка.

Вращая подъемные винты горизонтирующего устройства датчика, добиваются совпадения центра пучка с отсчетами, вычисленными по формуле (VI.22), причем для учета влияния кривизны Земли в отсчеты на контрольных точках необходимо вводить поправку.

Фотоприемники землеройных механизмов устанавливают на необходимую высоту

$$l = H_{г.п} - H_{пр}. \quad (VI.23)$$

При планировке участка сначала производится срезка и перемещение грунта в места, где необходима подсыпка (предварительная планировка). Затем, когда получают поверхность, отметки которой отличаются от проектной на 5—10 см, приступают к окончательной планировке. Предварительную планировку выполняют, пользуясь в основном показаниями крайних ламп панели индикатора. Окончательную планировку проводят по показаниям всех ламп и заканчивают, когда при движении механизма по участку на панели индикатора горит одна центральная лампа.

Так как карданная подвеска прибора обеспечивает стабильное в пространстве положение оптической плоскости, а по круглому уровню проверяется установка прибора, то необходимо периодически проверять положение пузырька круглого уровня, чтобы отклонение подвески прибора не превысило максимально допустимую амплитуду отклонения. В случае ухода пузырька круглого уровня необходимо вернуть его на середину с помощью подъемных винтов горизонтирующего устройства штатива датчика. С увеличением расстояния от излучателя ошибки планировки, вызываемые рефракцией, увеличиваются. Поэтому в летние месяцы работу механизмов следует организовать так, чтобы на расстояниях 250—500 м от датчика они работали в периоды с 8 до 11 час и с 16 до 19 час, когда влияние рефракции минимально.

Ошибка работы автоматизированной системы контроля

$$m_{\Sigma}^2 = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2,$$

где m_1 — ошибка задания опорной плоскости; m_2 — ошибка работы приемного устройства; m_3 — ошибка, допускаемая оператором зем-

леройной машины; m_4 — ошибка, вызванная влиянием внешних условий.

Ошибка задания опорной плоскости зависит от точности обработки карданной подвески прибора и не превышает $\pm 4''$. Ошибка работы фотоприемного устройства определяется конструкцией фотоприемника, размерами приемных оптических элементов, расстояниями между центрами оптических элементов и величиной расходимости лазерного пучка. Для данной системы эта ошибка не превышает ± 2 см.

Ошибка работы землеройной машины зависит от субъективных особенностей и квалификации оператора машины, а также от конструкции рабочего органа механизма.

СКП-1 имеет следующие технические характеристики:

Длина волны излучения, мкм	0,6328
Мощность излучения, мкВт	200
Угол развертки оптической плоскости, град	360
Диапазон действия, м	5—500
Ошибка:	
определения высотного положения контролируемого объекта, мм	± 30
задания опорной плоскости, с	± 8
Нестабильность положения оптической плоскости во времени, с/сут	8
Размер поперечного сечения пучка по вертикали, мм	25—80
Диапазон регистрации излучения по высоте, мм	200
Скорость вращения узла развертки, мин ⁻¹	72—108
Напряжение питания, В:	
датчика излучения	220 (50 Гц)
приемного устройства	или 12
приемного устройства	12
Потребляемая мощность, Вт:	
датчика излучения	30
приемного устройства	3
Виброустойчивость приемного устройства в диапазоне 10—70 Гц	4g
Повышенная влажность окружающего воздуха при $t=30^\circ\text{C}$, %	96
Интервал рабочих температур, $^\circ\text{C}$	-10— +40
Масса, кг:	
датчика (вместе со штативом, выпрямителем и блоком питания)	30
фотоприемника	3
индикатора	1
штанги	4,1
Габариты, мм:	
датчика (максимальные)	700×1800
фотоприемника	142×424
индикатора	65×70×285
штанги	1750

При строительстве рисовой оросительной системы в Астраханской области было применено фотоприемное устройство СКП. До начала работы было произведено техническое нивелирование участка по квадратам 20×20 м. Планировка считалась закончен-

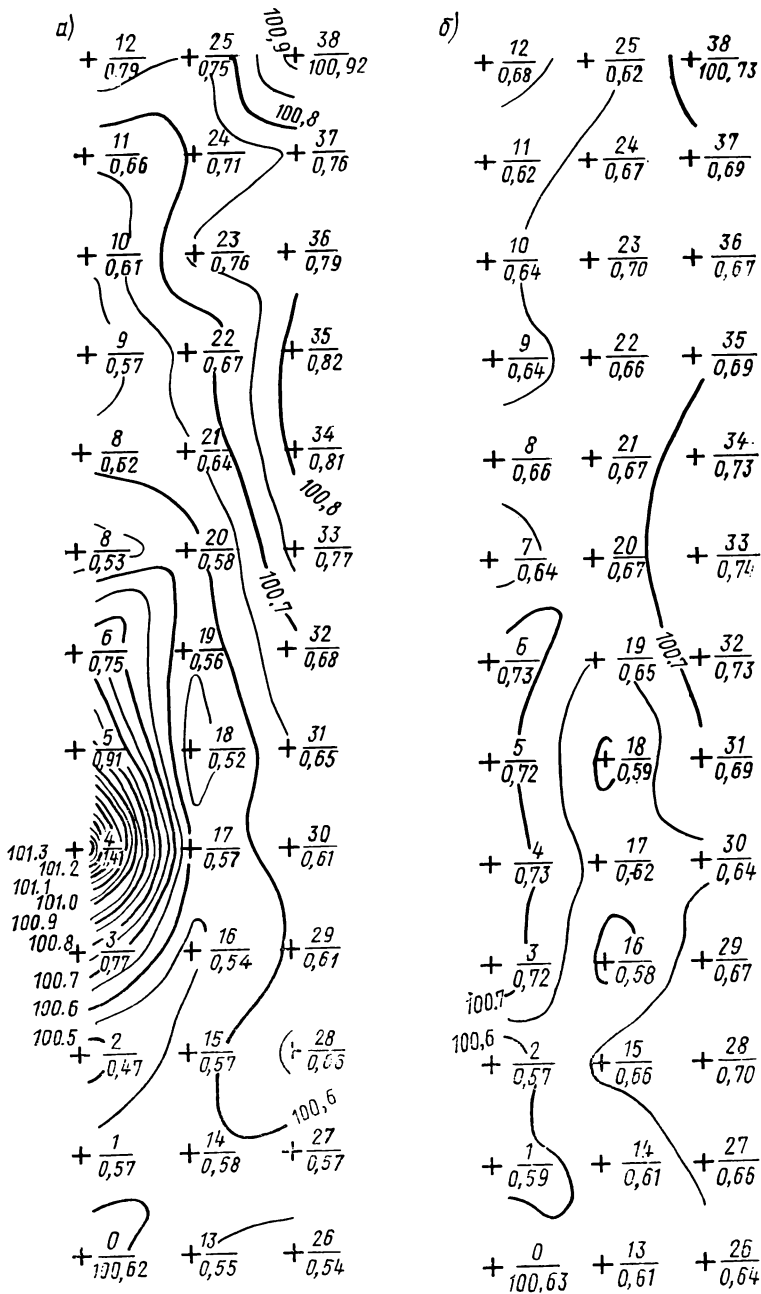


Рис. VI.44. Планы участка до начала работы (а) и по окончании работы системы (б)

ной, когда фиксируемые с помощью индикатора отклонения фотоприемника от опорной оптической плоскости при движении машины по планируемой поверхности не превышали ± 2 см. Из четырех машинистов, принимавших участие в планировке, двое не имели большого практического опыта. Однако это не сказалось на качестве выполняемых работ. Работа проводилась в различное время суток при различных метеорологических условиях и различной степени запыленности воздуха.

В ходе работы была достигнута точность создания оптической плоскости (проверенная по четырем взаимно перпендикулярным направлениям) ± 1 мм на расстоянии 100 м. Устойчивая регистрация лазерного пучка отмечалась на расстоянии до 650 м. Наибольшая точность контроля получена при удалении фотоприемника от датчика опорной плоскости на половину расчетного расстояния — 250 м.

На рис. VI.44 приведены планы одного чека до и после планировки, выполненной с помощью системы СКП-1. Основные результаты планировки трех чеков приведены в табл. VI.4.

Таблица VI.4

№ чеков	Площадь, га	Расстояние от датчика, м		Максимальное отклонение от отметки, см	
		минимальное	максимальное	проектной	средней фактический
60	1,41	320	490	+4, -3	+4, -3
61	1,43	250	395	+3, -4	+4, -3
59	1,90	120	305	+2, -4	+3, -3

Применение таких систем дает возможность достигнуть точности строительной и эксплуатационной планировки, равной ± 3 см; повысить производительность механизмов на 20—30%; организовать многосменную (круглосуточную) работу механизмов; привлечь к работе механизаторов низкой квалификации; значительно (до 80%) снизить трудозатраты на геодезическое обеспечение строительства; использовать от одного датчика опорной плоскости одновременно любое оптимальное количество землеройно-планировочных машин.

В настоящее время устройство СКП-1 выпускается серийно и находит широкое применение при выполнении планировочных работ.

В дальнейшем возможен переход от ручного управления землеройными машинами к автоматическому, тогда приемник лазерного излучения будет выдавать команды на гидравлический привод рабочего органа землеройной машины.

§ VI.5. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ И УСТАНОВКИ В СТОРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Изучение деформаций сооружений, вызываемых осадками и горизонтальными смещениями, обычно осуществляют геодезическими методами. Осадки сооружений (смещения в вертикальной плоскости), как правило, определяют с помощью повторного высокоточного нивелирования. Для наблюдений за сдвигами (горизонтальными смещениями) обычно применяют створный метод. Под *створными* понимают геодезические измерения, выполняемые с целью определения незначительных отклонений промежуточных точек от прямой, проходящей через два крайних (исходных) пункта, называемых опорными. Створные измерения применяют и для установки технологического оборудования в проектное положение. При этом относительно опорных точек в натуре разбивают и закрепляют монтажные оси, которые могут совпадать с рабочими осями устанавливаемого технологического оборудования или быть параллельными им.

Монтажная ось представляет собой прямолинейный отрезок или систему жестко связанных по азимуту прямолинейных отрезков, закрепленных в натуре опорными точками. При значительной длине монтажной оси путем створных наблюдений определяют ряд промежуточных точек, находящихся в одном створе с опорными. Точность осуществления монтажной оси зависит от назначения устанавливаемого технологического оборудования.

В некоторых случаях точность установки технологического оборудования на участке протяженностью 2—3 км составляет десятые доли миллиметра (линейные ускорители элементарных частиц), следовательно, разбивка монтажных осей в натуре должна осуществляться в два-три раза точнее. Уникальные по точности створные измерения выполняют при создании ускорителей элементарных частиц, направляющих путей большого протяжения, специальных передающих антенн, автоматических поточных производственных линий и т. п. В дальнейшем, в период эксплуатации подобных сооружений должен осуществляться геодезический контроль за положением технологического оборудования.

Наиболее распространенные традиционные способы створных измерений — оптический и струнно-оптический. Однако в отдельных случаях они не обеспечивают требуемую точность и не позволяют автоматизировать процессы измерений и контроля, что часто бывает необходимо по условиям радиационной обстановки на объекте и требованиям техники безопасности. Эти недостатки могут быть устранены путем использования новых средств измерений.

Одним из наиболее точных способов створных измерений является дифракционный, основанный на опыте Юнга (см. гл. I). На рис. VI.45—VI.47 показаны принципиальная схема устройства и приборы для створных наблюдений, применявшиеся при строительстве Серпуховского ускорителя.

перпендикулярно створу на величину Δ_1 (центр марки O сместится в точку O') изменяется разность хода световых лучей $A_2'C_1$ и $A_1'C_1$, вследствие чего смещаются на величину Δ_2 полосы интерференционной картины, наблюдаемые в окуляр. Например, если разность хода лучей равна длине волны источника света, то в точке C наблюдается вместо максимума минимум освещенности. Зависимость между величиной смещения Δ_1 двухщелевой марки относительно створа и величиной смещения Δ_2 центра интерференционной картины выражается формулой

$$\Delta_1 = [L_1 / (L_1 + L_2)] \Delta_2,$$

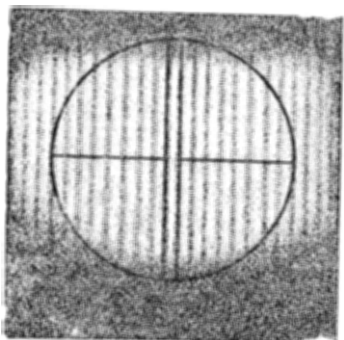


Рис. VI.48. Интерференционная картина, видимая в плоскости экрана

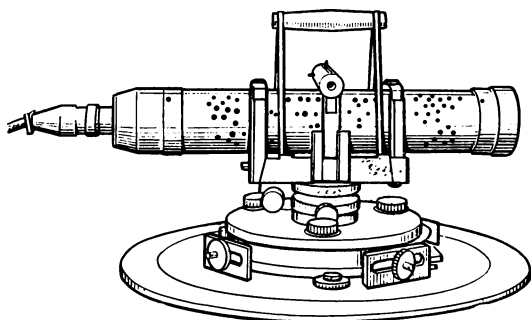


Рис. VI.49. Лазерный створоуказатель

где L_1 — расстояние от начала створа до двухщелевой марки, см; L_2 — расстояние от двухщелевой марки до сетки нитей, см.

Для определения смещения (нестворности) Δ_1 промежуточной точки измеряют величины L_1 , L_2 и величину смещения Δ_2 , перемещая сетку нитей до совмещения ее с центром интерференционной картины. Дифракционный способ створения с использованием лазера позволяет определять нестворность промежуточной точки на линии длиной до 400 м со среднеквадратической ошибкой около 0,06 мм [5].

Для определения нестворности точек в двух взаимно перпендикулярных плоскостях применяют *зонные пластины* (линзы Френеля), состоящие из чередующихся прозрачных и непрозрачных колец (или линий), а также *точечные диафрагмы*. В окуляре приемника света наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся ярких и темных колец. Для удобства наблюдения приемник имеет сетку нитей в виде концентрических окружностей.

В СССР разработан лазерный интерференционный створофиксатор ЛИСТ-1 с визуальной регистрацией, в котором применяют зонные пластины [25]. В комплекс ЛИСТ-1 входит лазерный створоуказатель (рис. VI.49), состоящий из газового лазера ЛГ-56, который установлен на подставке, снабженной накладным уровнем и центрирующим устройством. При выполнении работ с помощью

горизонтирующего устройства лазер устанавливают таким образом, чтобы ось лазерного пучка была точно направлена вдоль линии створа.

Зонные марки (рис. VI.50, а, б) служат для формирования интерференционной картины. Основной частью зонной марки является зонная пластина, которая закреплена в специальной раме, снабженной юстировочными винтами. С помощью юстировочных винтов ось симметрии зонной пластины может совмещаться с вер-

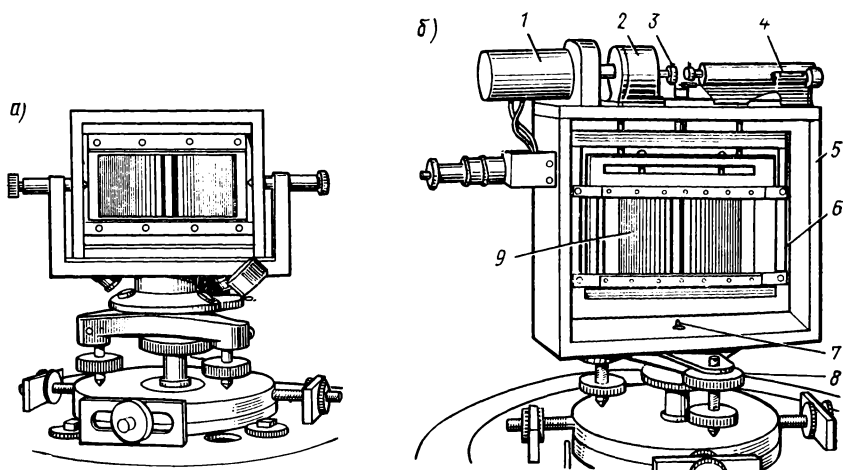


Рис. VI.50. Зонная марка (а) и зонная марка с электроприводом (б):

1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — конические шестерни; 4 — цилиндрический уровень; 5 — внешняя рамка; 6 — оправа; 7 — полосуи; 8 — подставка с подъемными винтами и центрировочным устройством; 9 — зонная пластина

тикальной осью вращения марки. Рамка с зонной пластиной установлена на подставке, которая имеет цилиндрический уровень и лимб, используемый для установки зонной пластины под расчетным углом к заданному створу.

Для дистанционных измерений используют другую зонную марку (рис. VI.50, б), у которой разворот зонной пластины относительно линии створа на заданный угол осуществляют с помощью электродвигателя 1, управление работой которого производится с пульта управления.

Определение положения центра интерференционной картины осуществляется с помощью полупрозрачного экрана-марки (рис. VI.51). Экран с сеткой нитей установлен на подставке с центрировочным вкладышем и может перемещаться с помощью микрометричного винта. Величина перемещения экрана определяется по индикатору часового типа с точностью до 0,01 мм.

К достоинствам использования лазеров в дифракционных створфиксаторах с визуальной индикацией относится возможность выполнения измерений при длине створа в несколько сотен метров с точностью до десятых долей мм. К недостаткам — быстрое утомле-

ние глаз, что вызвано значительной интенсивностью лазерного излучения, создающего интерференционную картину высокой степени яркости. Поэтому параллельно с созданием лазерных створофиксаторов с визуальной индикацией проводились работы по созданию створофиксаторов с фотоэлектрической индикацией. К последним относятся лазерные интерференционные створофиксаторы ЛИСТ-2 и ЛИСТ-3 [25]. В отличие от лазерного интерференционного створофиксатора ЛИСТ-1 они содержат вместо экрана-марки фотоэлектрические устройства: аналогового (ЛИСТ-2) и дискретного (ЛИСТ-3) типов (рис. VI.52, а, б).

Внедрение в аппаратуру фотоэлектрических регистрирующих устройств позволило создать лазерные интерференционные створофиксаторы с дистанционным съемом информации.

Устройства такого типа применяли при строительстве уникальных сооружений, например при создании экспериментальной базы Серпуховского ускорителя.

Лазерные интерференционные створофиксаторы ЛИСТ обеспечивают высокую точность и скорость измерений. Например, при створе длиной 864 м средняя квадратическая ошибка определения нестворности среднего пункта составила 0,18 мм, или в угловой мере — 0,08". Точность измерения можно еще более повысить, если исключить влияние внешних условий. Такое устройство используют в США для установки и контроля положения 273 блоков магнитов Стенфордского ускорителя [25]. Устройство (рис. VI.53) состоит из источника света — гелий-неонового лазера 1, зонных пластин 2 и фотодетектора 3. Створ, относительно которого определяются смещения оборудования ускорителя в плане и по высоте, проходит через центры зонных пластин, укрепленных на железобетонных столбах в начальной 6 и конечной 4 точках.

Для ослабления влияния внешних условий лазерный пучок проходит в трубе, в которой создан вакуум порядка 1 Па. Контроль за положением блоков магнитов осуществляется автоматически на участке протяженностью 3 км. На каждом блоке 5, положение которого контролируется, шарнирно прикреплен зонная пластина, имеющая возможность устанавливаться вертикально, перекрывая лазерный пучок, или автоматически выводиться из него.

Зонные пластины (см. рис. VI.50) изготовлены из листов меди и покрыты никелем. Пластины имеют систему прямоугольных отверстий, расположенных таким образом, чтобы при их освещении лучом лазера в центре создаваемого ими изображения источника света освещенность возрастала, т. е. в плоскости изображения, сов-

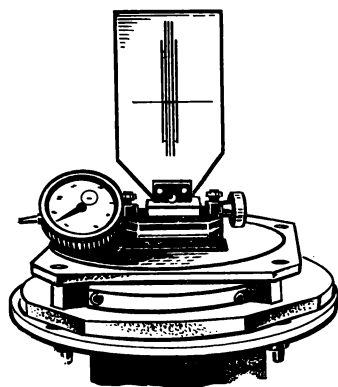


Рис. VI.51. Экран-марка

падающего с плоскостью фотодетектора, происходило сложение световых колебаний.

Чтобы изображение источника света находилось в плоскости детектора, фокусное расстояние каждой зонной пластины должно удовлетворять условию (обозначения см. на рис. VI.53)

$$1/f = 1/L_1 + 1/L_2,$$

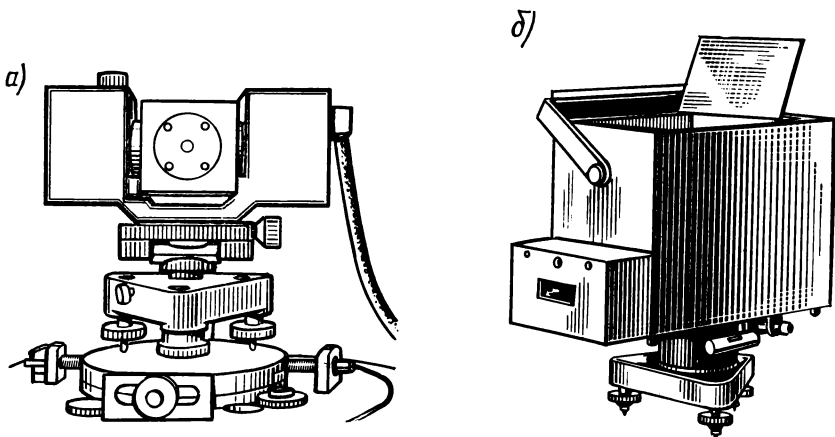


Рис. VI.52. Фотоэлектрические регистрирующие устройства аналогового (а) и дискретного типов (б)

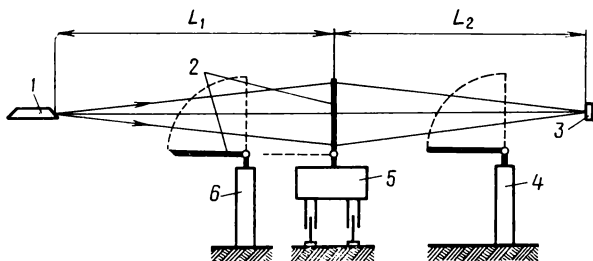


Рис. VI.53. Схема лазерного интерференционного створификсатора:

1 — лазер; 2 — зонные пластины; 3 — фотодетектор; 4 — конечная точка створа; 5 — проверяемый магнитный блок; 6 — начальная точка створа

где L_1 и L_2 — расстояния от зонной пластины до лазера и до фотодетектора, см.

Для удобства измерений смещений исследуемых точек в горизонтальном и вертикальном направлениях расположение щелей выбрано так, чтобы освещенность изображения возрастала по двум взаимно перпендикулярным направлениям и в плоскости фотодетектора наблюдался яркий крест, образованный двумя светящимися линиями.

Для осуществления геодезического контроля блоков магнитов в световой поток, создаваемый лазером, вводят поочередно дистанционно зонные пластины до тех пор, пока не получат информацию о положении всех 273 магнитов. При смещении исследуемой точки смещается изображение источника света (яркий крест). Величина смещения измеряется с помощью фотоприемника. Для повышения точности измерений изображение креста сканируется узкой щелью в горизонтальном и вертикальном направлениях. Координаты x и y центра изображения светящегося креста определяют по максимуму светового потока, попадающему на фотоэлемент через движущуюся щель.

Зная координаты x и y центров изображений от зонных пластин, установленных на конечных точках створа, и измерив координаты центра изображений от зонной пластины, установленной на промежуточной точке створа, определяют нестворность промежуточных точек как в плане, так и по высоте. Чувствительность фотодетектора позволяет фиксировать сдвиг размером 0,025 мм на любой из 273 поверяемых точек ускорителя. В случае нестворности поверяемого магнита на недопустимую величину, установка его в проектное положение осуществляется дистанционно с помощью прецизионных гидравлических домкратов. Подобная автоматизация измерений позволила исключить необходимость присутствия обслуживающего персонала, занимающегося проверкой положения оборудования, в помещении ускорителя.

Необходимо отметить, что при створных измерениях опорная линия может быть задана коллимированным световым пучком, а для регистрации положения энергетической оси пучка использованы фотоэлектрические датчики дифференциального типа. Оптическая схема такого датчика показана на рис. VI.54. Световой пучок 1, задающий опорную линию, попадает на светоделительную призму (оптический нож) 4 и разделяется на два пучка, каждый из которых проходит конденсоры 3 и 5 и попадает на фотодиоды 2 и 6. Сигналы с выхода фотодиодов после усиления и обработки в электронном блоке 7 поступают на регистрирующий прибор, по показаниям которого определяют величину смещения точки относительно створа, задаваемого световым пучком.

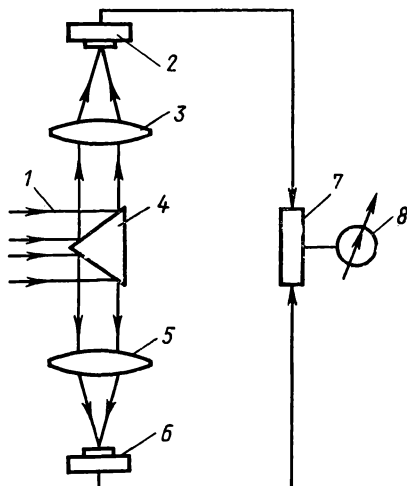


Рис. VI.54. Оптическая схема датчика дифференциального типа:

1 — световой пучок; 2, 6 — фотодиоды; 3, 5 — конденсоры; 4 — призма; 7 — блок электроники; 8 — регистрирующий прибор

Дифференциальный фотоэлектрический датчик позволяет выполнять измерения относительно энергетической оси светового пучка, генерируемого лазером или другим источником излучения, с точностью 12 мкм в диапазоне ± 5 мм.

Высокую точность створных измерений можно получить при использовании в качестве приемного устройства диссектора, установленного над выверяемой точкой створа. Экспериментальные иссле-

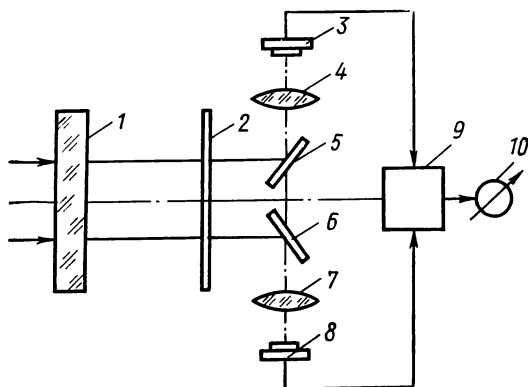


Рис. VI.55. Схема фотоэлектрического датчика с модулирующим диском:

1 — цилиндрическая линза; 2 — модулятор; 3, 8 — фото-детекторы; 4, 7 — конденсоры; 5, 6 — зеркала; 9 — электронный блок; 10 — регистрирующее устройство

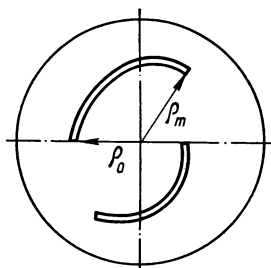


Рис. VI.56. Модулирующий диск

дования датчика такого типа показали, что ошибка в определении смещения объекта относительно линии створа (энергетической оси светового пучка) не превышает 38 мкм в диапазоне ± 5 мм [9].

Фотоэлектрическим датчиком с модулирующим диском (рис. VI.55) выполняют измерения с еще большей точностью (средняя квадратическая ошибка ± 5 мкм) в диапазоне линейных смещений ± 5 мм [9]. Он имеет объектив, выполненный в виде цилиндрической линзы, в фокальной плоскости которой помещен диск со щелями, изогнутыми в виде спиралей Архимеда и сдвинутых друг относительно друга на 180° (рис. VI.56). Значение параметров щели ρ_0 и ρ_m выбирают в соответствии с необходимым диапазоном линейных перемещений и диаметром светового пучка. Пучок проходит цилиндрическую линзу 1 (см. рис. VI.55) и фокусируется ею на модулирующем диске в виде линии.

При вращении диска происходит модуляция светового пучка и расщепление его на два. Один пучок отражается от зеркала 5 и собирается линзой на чувствительной поверхности фотодетектора 3. Другой пучок проходит аналогичный путь и фокусируется на чувствительной поверхности фотодетектора 8. Сигналы с выхода фотодетекторов обрабатываются в электронном блоке 9 и поступают на регистрирующее устройство 10.

В том случае когда ось вращения диска датчика совпадает с энергетической осью светового пучка, задающего опорную линию, на выходе фотодетекторов будут зарегистрированы сигналы одинаковой длительности, и сигнал на выходе электронной схемы равен нулю. При смещении датчика относительно линии створа в электронный блок 9 поступают сигналы различной длительности. Для определения длительности импульсов квантуют и подсчитывают число импульсов. Разность импульсов, пропорциональная величине смещения точки относительно линии створа, фиксируется с помощью регистрирующего устройства 10.

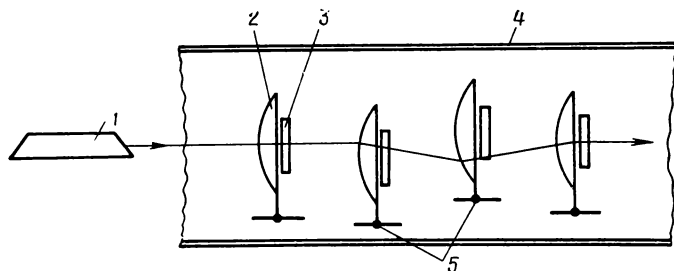


Рис. VI.57. Схема линзового лучевода:

1 — лазер; 2 — линзовый лучевод; 3 — фотоэлемент; 4 — труба; 5 — исследуемые точки

Рассмотренные методы измерений деформаций с помощью лазеров применимы в основном на объектах, имеющих линейную форму. В последнее время строят сооружения, очертания которых могут значительно отступать от линейных, например кольцевые ускорители, радиотелескопы, арочные плотины и т. д.

Для измерения деформации сооружений, имеющих нелинейную конфигурацию, может быть применена лазерная измерительная система на основе лучевода, позволяющая измерять смещения точек как в плане, так и по высоте. Эта система (рис. VI.57) состоит из лазера 1, линзового лучевода 2 и фотоэлементов 3. Линзовый лучевод представляет собой периодическую последовательность линз, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Линзы лучевода жестко скреплены с исследуемыми точками 5 объекта. Лазерный пучок последовательно фокусируется линзами лучевода и отклоняется в нужном направлении. Угол отклонения ϵ луча зависит от величины смещения h оси пучка относительно центра линзы и фокусного расстояния f линзы: $\epsilon = h/f$.

При смещении какой-либо линзы пучок, направляемый ею на последующую линзу, также смещается. Величины таких смещений фиксируются фотоприемниками, скрепленными с линзами. При анализе положения точек необходимо дифференцировать их смещения и смещения лазерного пучка, вызванные смещением предыдущих линз или лазера.

Помимо лазерных устройств, основанных на измерении смещений точек относительно светового луча, для измерений деформаций сооружений применяются устройства, основанные на иных принципах. В частности, для измерения деформаций сооружений применяют лазерные интерферометры, позволяющие измерять смещения с ошибкой порядка 10^{-7} — 10^{-8} . Особенно перспективным является применение лазерных интерферометров для прогнозирования момента землетрясения в зонах строительства с повышенной сейсмичностью. Установлено, что за некоторое время до начала землетря-

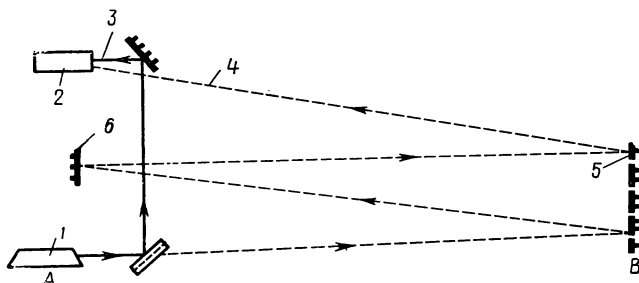


Рис. VI.58. Схема измерения деформаций на основе эффекта Доплера:

1 — лазер; 2 — фотодетектор; 3 — опорный сигнал от лазера; 4 — сигнал от лазера со сдвигом частоты; 5, 6 — отражатели

сения наблюдается более быстрая аккумуляция механических напряжений и деформаций вдоль линии сброса. Используя газовые лазеры с большой стабильностью частоты, можно определить скорость смещения объекта или смещение его части относительно другой на основе эффекта Доплера. При этом возможно определение очень малой скорости смещения, составляющей несколько миллиметров в год.

Для определения малой скорости смещения (рис. VI.58) необходимо лазер 1 расположить в неподвижной точке А, а зеркальный отражатель 5, на который направляется излучение, закрепить на исследуемом объекте В. При перемещении отражателя относительно лазера, в результате смещения частоты опорного светового сигнала с частотой отраженного на выходе фотоэлемента появится компонента сдвига частоты

$$\Delta f = N(v/\lambda),$$

где N — число проходов лазерного пучка между точками А и В; v — скорость движения отражателя; λ — длина волны излучения лазера.

При скорости движения 6 мм в год, длине волны излучения, равной 0,6328 мкм, сдвиг частоты за одно прохождение пучка туда и обратно ($N=2$) составит $\Delta f = 2(2/6328) = 1/1600$ Гц.

Для увеличения сдвига частоты необходимо увеличить число проходов. Это может быть достигнуто применением дополни-

тельных зеркал и лазера, обладающего большой временной когерентностью и значительной мощностью.

С помощью обычных геодезических приборов для геометрического нивелирования можно определять положение точки только в дискретные моменты времени. Преимущество лазерных приборов — возможность полной автоматизации процесса измерений с непрерывной регистрацией результатов.

Для этой цели используют комплект аппаратуры, в который входит лазерный нивелир с самоустанавливающейся линией визирования (лазерным пучком), нивелирная рейка с двумя электрическими фотоэлементами, подключенными к исполнительному механизму (электродвигателю), и самописец, на вход которого подаются сигналы с фотоэлементов, пропорциональные величине смещения относительно начального положения. Лазерный нивелир устанавливают на неподвижном основании, а на исследуемой точке — нивелирную рейку. При неравномерном освещении фотоэлементов вырабатывается управляющее напряжение, которое подается на электродвигатель. Электродвигатель перемещает фотоэлементы вдоль рейки до тех пор, пока управляющее напряжение не станет равным нулю, что соответствует одинаковой освещенности фотоэлементов. Таким образом, на ленте самописца непрерывно записываются вертикальные перемещения контролируемой точки. Исследование этого устройства показало, что стабильность горизонтального положения лазерного пучка составляет $0,3\text{--}0,5''$ при наклоне прибора до $15'$.

С помощью лазерных приборов, задающих вертикальное направление лазерного пучка, можно осуществлять дистанционный контроль за горизонтальными деформациями сооружений.

Задача, связанная с изучением горизонтальных деформаций, возникает, например, при наблюдении за смещением плотины в процессе заполнения водохранилища и эксплуатации ГЭС.

Традиционные методы контроля смещения плотины довольно трудоемки, не позволяют автоматизировать процесс измерений, а также не обеспечивают оперативность получения информации в текущий момент времени. Использование лазерной автоматической системы (ЛАС), разработанной для контроля смещения плотин, позволяет полностью устранить отмеченные недостатки. В настоящее время эту систему применяют для контроля смещений арочной плотины Чиркейской ГЭС.

Лазерная автоматическая система состоит из излучателя, в качестве которого используют лазерный центрир, снабженный жидкостным компенсатором. Он обеспечивает отвесное положение лазерного пучка, который является опорным. Пучок проходит все тело плотины в специальной трубе (рис. VI.59). На десяти горизонтах в плотине установлены кассеты со специальными фотоприемниками, позволяющими измерять смещения плотины относительно пучка. Информация с фотоприемников поступает в блок управления, обработки и записи информации. Измерение смещения плотины осуществляется относительно линии нулевого отсчета в на-

правлении потока (рис. VI.60):

$$X_i = X_i' + D_n/2,$$

где X_i — координаты центра пучка, мм; X_i' — величина перемещения фотоэлемента от точки нулевого отсчета до момента засветки

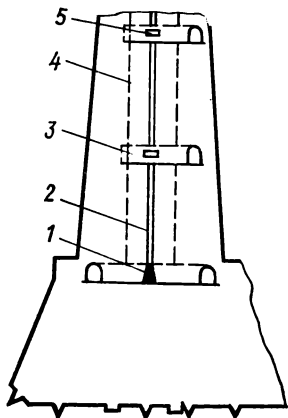


Рис. VI.59. Схема размещения излучателя и фотоприемников в теле арочной плотины Чиркейской ГЭС:

1 — лазерный зенит-прибор; 2 — лазерный луч; 3, 5 — фотоприемники; 4 — труба в теле плотины

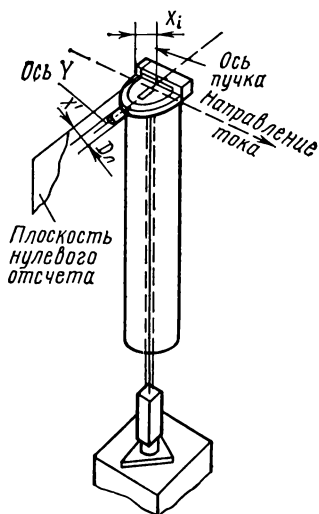


Рис. VI.60. Определение координат центра пучка

фотоэлемента лазерным пучком, мм; D_n — поперечное сечение пучка, измеренное от начала до конца засветки фотоэлемента, мм.

Для того чтобы определить величину смещения плотины в момент заполнения водохранилища, измеряют величину X_{0i} до заполнения водохранилища, тогда величина смещения плотины в данном сечении

$$\Delta X_i = X_i - X_{0i}.$$

Линейное смещение фотоэлемента осуществляется с помощью электродвигателя и винтовой пары, приводящей в движение каретку с фотоэлементом. Шаг винтовой пары составляет 8 мм; цена деления квантующего импульса 0,1 мм. Линейное смещение каретки преобразуется в соответствующее число импульсов. При движении каретки импульсы поступают в арифметическое устройство, работой которого управляют с помощью фотоэлемента. Арифметическое устройство выполняет операцию

$$X = A + B/2,$$

где X , A и B — число импульсов, соответствующих координате X_i , смещению каретки от точки нулевого отсчета до границы пучка и поперечному сечению пучка.

На рис. VI.61 показана структурная схема ЛАС. К выходу арифметического устройства подключен цифровой индикатор и цифрорпечатывающее устройство. Цифровой индикатор служит для визуального контроля результатов измерений, а цифрорпечатывающее устройство — для непрерывной фиксации результатов измерений, а также номера опрашиваемого фотоприемного устройства.

Включение ЛАС осуществляется с пульта управления. Программное устройство системы обеспечивает работу в непрерывном, циклическом и выборочном режимах. Время готовности системы к работе составляет 5 мин, время одного цикла измерений по всей высоте сооружения — 10 мин. Повторение каждого цикла измерений может осуществляться в пределах 0,5—4 ч. При непрерывном режиме работы производится последовательный опрос фотоприемных устройств с первого по десятый и затем снова с первого и т. д. При выборочном режиме работы ЛАС можно измерять смещения на любом горизонте в произвольной последовательности.

Для изучения деформаций небольших объектов, например моделей различных конструкций, строительных материалов и других, могут быть использованы методы лазерной голографии. Этот метод записи изображений предмета на фотографическую пластинку появился в 1947 г. Однако для создания голограмм требовался мощный монохроматический источник когерентного света, а таких источников в то время еще не было. Поэтому бурное развитие голография получила только в последние годы в связи с появлением лазеров.

Принцип голографии основан на свойствах интерференции света. На голограмме регистрируется не само изображение предмета, как это делается при фотографической съемке, а структура световой волны, отраженной предметом. Это достигается с помощью интерференционной картины, создающейся в плоскости фотопластины и фиксирующей одновременно как амплитуду рассеянного снимаемым объектом света, так и фазовые соотношения световой волны. Фазовые соотношения обуславливают взаимное расположение темных и светлых полос, амплитуда — контрастность светового узора на голограмме. При получении голограммы не требуются линзы и зеркала, как это имеет место при фотографической съемке.

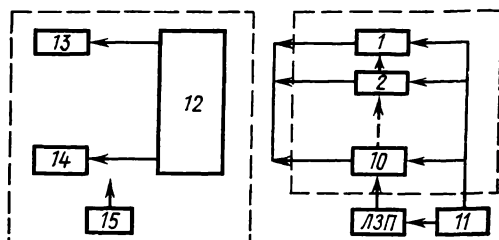


Рис. VI.61. Структурная схема ЛАС:

1—10 — фотоприемные устройства; 11 — блок питания; 12 — блок обработки информации и управления; 13 — цифровой индикатор; 14 — цифрорпечатывающее устройство; 15 — блок питания

Метод голографии позволяет измерять очень небольшие, соизмеримые с длиной волны света, деформации модели, происходящие вследствие нагрева, вибраций, нагрузки и т. д., а сама модель может иметь довольно сложную форму. При исследовании моделей с помощью лазерной голографии на одной и той же фотопленке записываются в разные моменты времени две голограммы одной и той же модели. При восстановлении световые волны, прошедшие эти голограммы, накладываются друг на друга, в результате чего наблюдается интерференция. Если модель претерпела какие-либо изменения за время, прошедшее между двумя голографическими съемками, на восстановленном изображении появляется система интерференционных полос (горизонталей).

Измерение голографической модели выполняют путем ортогонального проектирования горизонталей на плоскость экрана.

§ VI.6. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОСТИ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЦЕНТРИРОВ

При строительстве зданий низкой этажности для передачи разбивочных осей с одного монтажного горизонта на другой применяют в основном теодолиты. Однако эти приборы не удовлетворяют требованиям точности при возведении высотных зданий и сооружений, так как метод передачи осей наклонным лучом обладает рядом недостатков и суммарная ошибка в положении оси на 16—20 этажах может достигать 10 мм. Для вертикального проектирования при строительстве высотных зданий и сооружений применяют специальные высокоточные оптические центриры, разработанные на основе нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования (см. гл. V).

Для передачи разбивочных осей с помощью центриров на верхние монтажные горизонты на перекрытии первого этажа или в подвале разбивают вспомогательную опорную плановую сеть, состоящую из ряда базовых точек. Взаимное плановое положение этих точек определяют путем соответствующих угловых и линейных измерений. Для передачи плановых координат с нижнего монтажного горизонта на верхние вертикальным проектированием в перекрытиях зданий оставляют небольшие сквозные отверстия.

Для определения планового положения проекции визирной оси на горизонтальную плоскость, т. е. для передачи координат x и y базовой точки на соответствующие монтажные горизонты, в этих отверстиях укрепляют прозрачные палетки, на которых нанесена сетка прямоугольных координат. Визируя в оптический центрир, установленный на базовой точке, наблюдатель по полевому телефону сообщает помощнику, находящемуся около палетки, о положении проекции визирной оси на плоскости палетки. Помощник отмечает эту точку карандашом или наколами иглой. Для уменьшения влияния ошибок, вызванных несовпадением визирной оси и оси вращения прибора, проекцию визирной оси отмечают при четырех положениях вращающейся части центрира, отличающихся на 90° , а

затем находят среднее из четырех положений визирной оси. Эта точка является опорной для данного монтажного горизонта, и относительно нее разбивают монтажные оси.

В СССР созданы оптические центрировочные приборы — ОЦП-2; «Зенит ОЦП» (рис. VI.62) на базе нивелира НСМ-2 с самоустанавливающейся линией визирования. Перед объективом прибора установлена пентапризма 1 таким образом, чтобы линия визирования после преломления под прямым углом совпадала с осью вращения прибора. Для центрирования над точкой имеется суппорт с микрометричными винтами 5. Индикаторы часового типа 4 служат для определения смещения линий визирования.

В ГДР фирмой Цейсс выпускается центрир PZL (рис. VI.63), в котором линия визирования самоустанавливается в отвесное положение, благодаря применению оптико-механического компенсатора от нивелира Ni-007. В верхней части прибор имеет защитное плоскопараллельное стекло 1, закрывающее объектив, окуляр 2 находится в нижней части. Фокусирование изображения производится кремальерой 7. Центрир имеет горизонтальный круг с точностью отсчета 1'. Отсчет по кругу производится по индексу микроскопа 3, расположенного ниже окуляра зрительной трубы. Для подсветки штрихов горизонтального круга служит зеркало 6. Прибор снабжен круглым и цилиндрическим уровнями. Установка центрира над точкой производится с помощью оптического отвеса 5.

Основное условие, которому должен удовлетворять оптический центрир — *вертикальная ось вращения прибора и вертикальная часть визирного луча должны совпадать*. Проверку выполняют проектированием линии визирования на высоко расположенную горизонтальную плоскость при четырех, отличающихся на 90°, положениях вращающейся части центрира. Исправление положения линии визирования производится перемещением сетки нитей. В хорошо проверенном центрире ошибка выноса вертикали на высоту до 100 м не превышает 1 мм.

При работе в башенных сооружениях основным источником ошибки выноса вертикали является боковая рефракция, особенно если вблизи прохождения визирного луча на различных горизонтах производятся сварочные работы, что приводит к резкой слоистости температуры воздушной среды, и как следствие — резкому изменению коэффициента преломления.

Помимо оптических приборов вертикального проектирования применяют лазерные центриры (рис. VI.64), у которых вертикальная линия визирования задается лазерным пучком. Лазерный центрир ЛЗЦ-1 применялся в порядке эксперимента при строительстве Останкинской телебашни в Москве. Для уменьшения угловой расходимости светового пучка перед лазером 2 установлена телескопическая труба 1. Лазер и телескопическая труба укреплены в подставке 4, помещенной на штативе. Подставка прибора снабжена цилиндрическим уровнем 3 с ценой деления 8".

Во время работы лазерный центрир устанавливается над базовой точкой и приводится в рабочее положение. Вертикальность

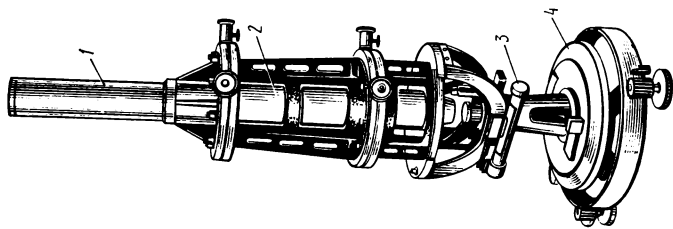


Рис. VI.64. Лазерный центрир ЛЗЦ-1

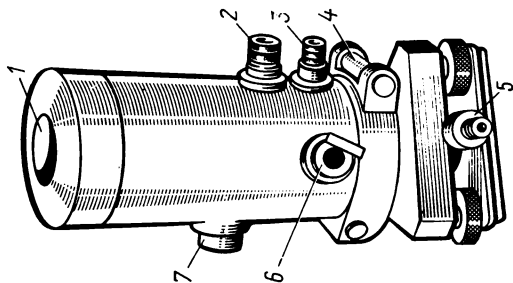


Рис. VI.63. Зенит-прибор PZL:

1 — защитное стекло; 2 — окуляр трубы; 3 — окуляр микроскопа; 4 — уровень; 5 — оптический отвес; 6 — зеркало; 7 — кремальера

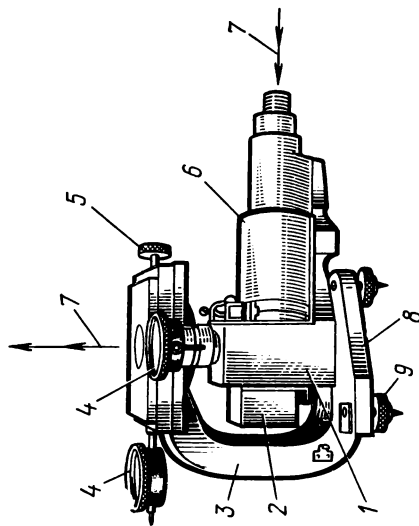


Рис. VI.62. Оптический центрировочный прибор:

1 — кожух с пентапризмами; 2 — противовес; 3 — рамка; 4 — индикатор смещений; 5 — микрометрический винт; 6 — зрительная труба; 7 — линия визирования; 8 — подставка; 9 — подъемный винт горизонтирующего устройства

пучка достигается путем установки прибора по цилиндрическому уровню. Проверка вертикальности лазерного пучка производится так же, как и в оптических центрирах; исправление производится изменением положения лазера в держателях.

Недостатками лазерного зенит-центрира являются: невысокая точность задания вертикальности лазерному пучку (ошибка передачи плановых координат на высоту 30 м составляет 2—3 мм); трудность контроля фо-

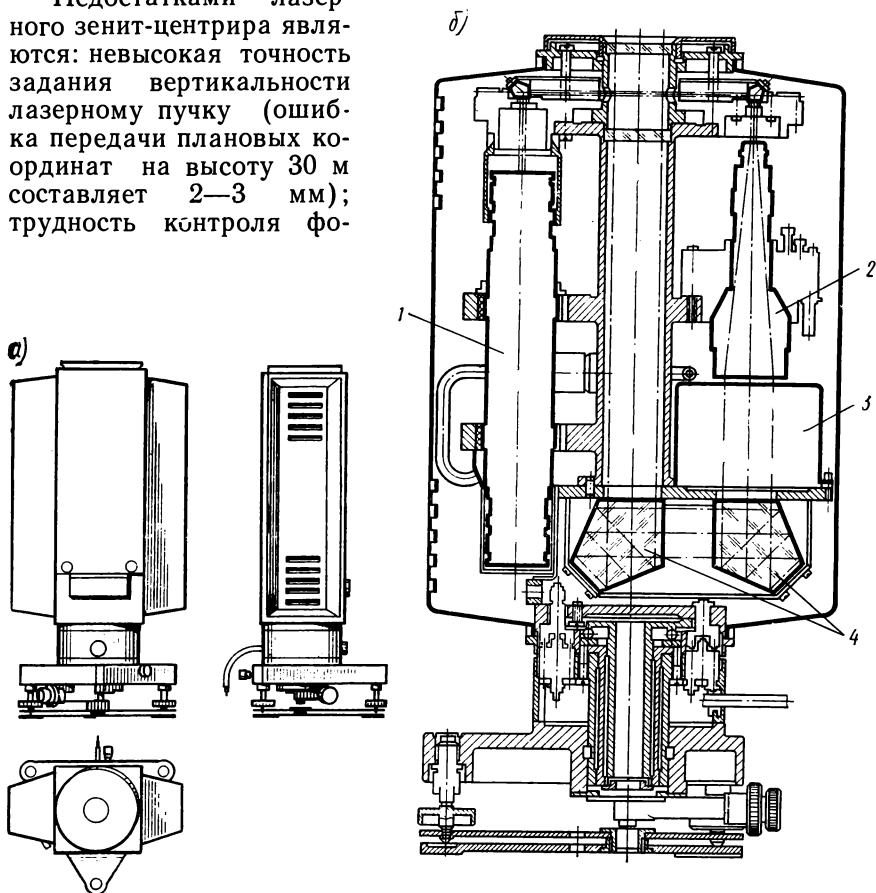


Рис. VI.65. Лазерный центрир (а) и его конструкция (б):
1 — лазер; 2 — телескопическая система; 3, 4 — пентапризмы

кусировки лазерного пучка при значительном удалении палетки или экрана от прибора.

При работе в затемненных и запыленных помещениях лазерный пучок хорошо виден в воздухе, что удобно для контроля вертикальности стен сооружения. Точность отсчета по световому пятну

$$m = 0,5 \cdot 10^{-5} h,$$

где m — ошибка отсчета; h — расстояние от вертикали до зенит-прибора (при $h = 100$ м ошибка $m = 5$ мм).

Лазерному центриру ЛЗЦ-1 в значительной степени соответствует по своим техническим характеристикам и устройству лазерный центрир LL-132, выпускаемый фирмами «Спектра физикс» и «Гео-Фейн-механик» (г. Кейтвиг, ФРГ). Прибор LL-132 имеет два цилиндрических уровня с ценой деления $20''$, устанавливаемых на подставке под углом 90° друг к другу. На этой же подставке в

корпусе прибора вертикально установлен вместе с телескопической системой лазер. Для приведения прибора в рабочее положение служат три подъемных винта горизонтирующего устройства, которыми снабжена подставка. Чтобы LL-132 мог быть использован не только для контроля вертикальности, но и нивелирования, на объектив прибора надевают приставку в виде пентапризмы, позволяющую изменить направление лазерного пучка на 90° .

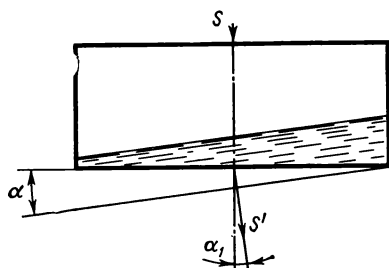


Рис. VI.66. Принцип действия жидкостного компенсатора

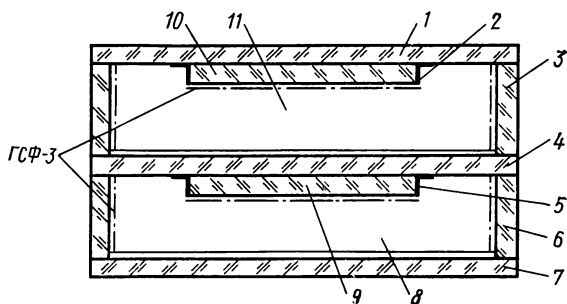


Рис. VI.67. Устройство жидкостного компенсатора:
1, 4, 7 — плоскопараллельные пластины; 2, 5 — диафрагмы;
3, 6 — кольца; 8, 11 — смесь жидкостей диметилфталата и
дибутилфталата; 9, 10 — плоскопараллельные пластины

Из приборов с самоустанавливающейся линией визирования применяют лазерные центриры, созданные на базе прибора PZL и гелий-неонового лазера, а также лазерные центриры, в которых использованы жидкостные компенсаторы.

В СССР разработан лазерный самоустанавливающийся центрир ЛЗП (рис. VI.65), используемый для дистанционного контроля за горизонтальными сдвигами арочной плотины Чиркейской ГЭС (см. § VI.5).

ЛЗП создан на базе гелий-неонового лазера ОКГ-13, установленного вертикально в корпусе прибора. Пучок из лазера проходит систему из призм и попадает в телескопическую систему, имеющую увеличение $25\times$. Коллимированный лазерный пучок проходит жидкостный компенсатор, задающий пучку отвесное направление.

Для изменения направления лазерного пучка на противоположное служат две пентапризмы, установленные после жидкостного компенсатора по ходу лазерного пучка. Жидкостный компенсатор представляет собой сосуд, в который налита жидкость, имеющая коэффициент преломления n .

Принцип действия компенсатора (рис. VI.66) основан на свойстве жидкостей принимать в состоянии покоя горизонтальное положение. При наклоне прибора на угол α наклоняется и компенсатор, в результате чего жидкость образует оптический клин с углом преломления α . При прохождении через клин пучок лазерного излучения отклоняется к основанию клина на угол $\alpha' = \alpha(n-1)$.

Полная компенсация угла наклона прибора наблюдается в том случае, когда $\alpha' = \alpha$, т. е. при соблюдении условия $n=2$.

В ЛЗП жидкостный компенсатор устанавливают так, чтобы лазерный пучок, входящий в него сверху, был перпендикулярен плоскопараллельным пластинам (рис. VI.67). Во время работы ЛЗП устанавливают в рабочее положение по круглому уровню, а для центрирования над точкой служит оптический центрир.

Сравнение данных, полученных при работе с ЛЗП и зенит-прибором PZL, показало, что при строительстве высотных зданий, максимальные значения отклонений составляют 2—3 мм. Однако в отличие от обычных геодезических центриров, ЛЗП позволяет иметь данные о положении разбивочных осей на любом монтажном горизонте и в любой момент времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура для частотных и временных измерений/Под ред. Горшкова А. П. — М.: Советское радио, 1971. — 376 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 855 с.
3. Васютинский И. Ю. Гидростатическое нивелирование. — М.: Недра, 1976. — 216 с.
4. Автоматическое нивелирование с помощью лазера/Величко В. А., Дементьев В. Е., Коротков С. А. и др. — Автомобильные дороги, 1970, № 7, с. 37—39.
5. Горбенко О. И. Исследование дифракционного способа створных наблюдений с применением лазера. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1976, № 5, с. 32—35.
6. Дементьев В. Е. О применении лазеров для автоматизации угловых и линейных измерений. — Геодезия и картография, 1974, № 1, с. 20—22.
7. Дементьев В. Е. Применение лазерной техники в строительстве (обзор). Зарубежный опыт строительства. — М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1976. — 53 с.
8. Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. — М.: Недра, 1973. — 391 с.
9. Зацаринный А. В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. — М.: Недра, 1976. — 248 с.
10. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код/Зверев А. Е., Максимов В. П., Мясников В. А. — Л.: Энергия, 1974. — 182 с.
11. Геодезия в дорожном строительстве/Кардаев М. А., Величко В. А., Мепуришвили Г. Е. — М.: Недра, 1972. — 144 с.
12. Катус Г. П. Автоматическое сканирование. — М.: Машиностроение, — 516 с.
13. Климов Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. — М.: Советское радио, 1978. — 263 с.
14. Козелкин В. В., Усолцев И. Ф. Основы инфракрасной техники. — М.: Машиностроение, 1974. — 335 с.
15. Лазерная система контроля высотного положения землеройных машин/Корнев О. В., Федоров А. С., Чудесникова А. М. — Электронная промышленность, 1973, № 8, с. 42—45.
16. Лаврова И. А. Приборы для геодезических измерений в строительстве (обзор). Зарубежный опыт строительства. — М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1974. — 78 с.
17. Лазерные геодезические приборы в строительстве/Под ред. Коушия В. А. — М.: Недра, 1977. — 165 с.
18. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве/Под ред. Большакова В. Д. — М.: Недра, 1976. — 335 с.
19. Мовчан С. Ф., Соколовский Я. А. Геодезические работы при монтаже строительных конструкций. — М.: Высшая школа, 1973. — 128 с.
20. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. — М.: Недра, 1972. — 169 с.
21. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве. — М.: Советское радио, 1977. — 336 с.
22. Рытов А. В., Спиридонов А. И. Геодезические приборы для крупномасштабных топографических съемок. — М.: Недра, 1977. — 175 с.
23. Торочков В. Ю. Гиротеодолиты. — М.: Недра, 1970. — 351 с.
24. Фотоэлектрические преобразователи информации/Под ред. Преснухина Л. Н. — М.: Машиностроение, 1974. — 335 с.
25. Ямбаев Х. К. Высокоточные створные измерения. — М.: Недра, 1978. — 226 с.
26. Якушенков Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. — М.: Советское радио, 1978. — 336 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аксикон** 15
- Баропрофилограф** 191
- Визир лазерный** 219
Время когерентности 28
- Генератор** 68
Гироскоп
— маятниковый 117
— свободный 115
- Дальномер**
— импульсный 54
— оптический 45
— фазовый 58
— электромагнитный 52
Датчик давления струнный 194
Длиномер 40
Дифракция света 10
Дихроизм 13
Домер фазового цикла 58
- Интерферометр** 78
Источник излучения 60
- Клин** 17
Компенсатор
— жидкостный 123
— оптический 123
Коэффициент компенсации 124
Кружок Эри 216
- Лазер** 22
Лимб кодовый 94
Линза цилиндрическая 14
- Матрица фотоэлементов линейная** 234
Место нуля гидростатического нивелира 146
Модулятор дифракционный 67
Модуляция 62
Монохроматичность 27
- Насадка дальномерная** 46
Нивелир
— гидромеханический 172
— гидростатический 143
— лазерный 198
— шланговый 152, 154, 158
- Отражатель** 75
Ориентирование
— гироскопическое 119
— земснаряда 238
— передвижчика 236
- Планка постоянная** 5
Пластина
— зонная 18
— плоскопараллельная 17
Плоскость поляризации 11
Поверки
— нивелира 137
— теодолита 92
Поправка за кривизну Земли 249
Прецессия 117
Призма 15
Приемник света 69
Профилограф многолинзовый 204
- Распределение интенсивности** 214
Резонатор оптический 25
Рефракция пучка лазерного излучения 231
Рихтовка пути 240
Рулетка 37
- Света**
— интерференция 8
— поляризация 11
Светопровод 17
Светофильтр 18
Сигнала запаздывание 105
Система
— визирования гидропроходческого щита 234

- гидродинамическая 168
- гидростатическая с дистанционным съемом информации 162, 164
- контроля вертикальной планировки 243
- лазерная контрольно-измерительная 114
- следящая 233
- стационарная гидростатическая 159, 164
- Скорость света 6, 53
- Стабильность направления пучка лазерного излучения 230
- Створоуказатель 259
- Створофиксатор интерференционный 259, 261

Тахеометр

- авторедукционный внутрибазный 50
- электронный 101
- Теодолит
- кодовый 94
- лазерный 212
- — сканирующий 106
- оптический 87
- Трипельпризма 16
- Трубокабелеискатель 208

Угол

- Брюстера 11
- параллактический 45
- Указатель направления лазерный 221
- Умножитель фотоэлектронный 71

**Характеристики технические даль-
номеров 50**

Центрир

- лазерный 271
- оптический 271

Частота квантовых импульсов 97

Эталон Фабри — Перо 85

Эталонирование частоты 72

Ячейка

- Керра 65
- Погкельса 65

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Глава I. Некоторые сведения из оптики и светотехники	5
§ I.1. Природа и скорость света	5
§ I.2. Основные законы распространения света	7
§ I.3. Интерференция и дифракция света	8
§ I.4. Поляризация света	11
§ I.5. Оптические детали и системы, применяемые в геодезических приборах	14
§ I.6. Глаз как оптическая система	20
§ I.7. Лазерные источники оптического излучения	22
Глава II. Приборы для линейных измерений	37
§ II.1. Механические мерные приборы	37
§ II.2. Оптические дальномеры	45
§ II.3. Электромагнитные способы измерения расстояний	52
§ II.4. Использование модулированных колебаний для фазовых дальномеров	58
§ II.5. Общая характеристика основных узлов светодальномеров и применение светодальномеров	60
§ II.6. Интерферометры	78
Глава III. Угломерные приборы	87
§ III.1. Оптические теодолиты	87
§ III.2. Кодовые теодолиты	94
§ III.3. Применение лазеров для угловых измерений	103
Глава IV. Гирскопическое ориентирование	115
§ IV.1. Элементарная теория гироскопа	115
§ IV.2. Принципиальная схема гироскопического теодолита и геодезическая сущность гироскопического азимута	119
Глава V. Приборы для нивелирования	122
§ V.1. Общие сведения	122
§ V.2. Способы автоматической компенсации угла наклона оси вращения нивелира	123
§ V.3. Типовые схемы механических компенсаторов самоустанавливающихся нивелиров	125
§ V.4. Точные и технические нивелиры отечественного производства	127
§ V.5. Поверки и юстировки нивелиров	137
§ V.6. Нивелиры гидростатические	143
§ V.7. Системы гидродинамического нивелирования	168
§ V.8. Нивелиры гидромеханические	172
§ V.9. Баропрофилограф и его применение для съемок рельефа при скоростных изысканиях	191
§ V.10. Лазерные нивелиры	198
	279

Глава VI. Новая геодезическая техника, применяемая при решении типовых инженерно-геодезических задач	208
§ VI.1. Съёмка инженерных подземных коммуникаций с помощью индукционных приборов	208
§ VI.2. Применение лазерных приборов с визуальной индикацией при разбивочных работах, плано-высотном контроле и задании направления	211
§ VI.3. Лазерные автоматические приборы для плано-высотного контроля положения строительных машин и механизмов	227
§ VI.4. Система контроля вертикальной планировки	243
§ VI.5. Применение лазеров для измерения деформаций сооружений и установки в створ технологического оборудования	257
§ VI.6. Геодезический контроль вертикальности сооружений с помощью геодезических центров	270
Литература	276
Предметный указатель	277

**В. А. Величко, С. Ф. Мовчан, В. Е. Дементьев,
Е. В. Ангелова, А. С. Федоров**

НОВАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Зав. редакцией Н. И. Хрусталева
Редактор И. Е. Якушина
Младший редактор С. Ф. Шабарина
Переплет художника В. П. Бабикова
Художественный редактор В. И. Мешалкин
Технический редактор З. В. Нуждина
Корректор М. М. Малиновская

ИБ № 3986

Изд. № Стд—364 Сдано в набор 05.08.82. Подп. в печать 29.10.82. Т—20321
Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Объем 17,5 усл. печ. л. Усл. кр.-отт. 17,5. Уч.-изд. л. 18,88. Тираж 7000 экз.
Зак. № 623. Цена 1 руб.

Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.

1976

HOBBAH FEOJHAKA TFXHMKATFCA