

Министерство образования Российской Федерации
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАИК)

С.В. Марфенко

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Учебное пособие



Москва 2004

Министерство образования Российской Федерации
Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГ АиК)

Утверждено методической
комиссией геодезического
факультета МИИГ АиК

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Учебное пособие

Для специальности прикладная геодезия

Москва 2004

Марфенко С.В. Высокоточные геодезические работы при строительстве и эксплуатации прецизионных сооружений. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2004, с...., ил.

В соответствии с программой дисциплины Прикладная геодезия изложены вопросы теории и практики инженерно-геодезических работ, выполняемых при строительстве сооружений, требующих высокоточной установки в проектное положение технического оборудования. Рассмотрены особенности геодезических наблюдений за устойчивостью оснований при выборе площадки под строительство прецизионных сооружений. Даны принципиальные схемы решения задачи по высокоточной установке оборудования, включая создание специальных инженерно-геодезических сетей. Деятельно представлены особенности угловых и линейных измерений, применяемые методы и технические средства, обеспечивающие высокую точность.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Барков В. Н. (МГУЗ)
кандидат технических наук, профессор Михелев Д. Ш. (МИИГАиК)

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

1. ПРЕЦИЗИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ СТРОИТЕЛЬСТВА

Современное развитие ряда областей науки и народного хозяйства связано с созданием сооружений, нормальная работа которых возможна лишь при соблюдении высокой точности изготовления, монтажа и стабильности положения их отдельных частей и элементов. К таким сооружениям, условно называемым прецизионными, относятся линейные и кольцевые ускорители заряженных частиц в ядерной физике, специальные устройства радиотехнического и лазерного обеспечения, различного назначения направляющие пути большой протяженности, промышленные производственные линии тонкой технологии и др.

При строительстве и эксплуатации прецизионных сооружений для обеспечения определенного технологического или физического процесса выполняют высокоточные геодезические работы по установке крупногабаритного оборудования и наблюдению за стабильностью его положения. Точность этих работ характеризуется величинами допусков $0,1 \text{ --- } 0,3 \text{ мм}$ на взаимное положение оборудования, сопряженно монтируемого на расстоянии в несколько десятков, а иногда и сотең метров. Например, в ускорителях с жесткой фокусировкой заряженных частиц, таких как Серпуховский синхрофазотрон с радиусом приблизительно 236 м , блоки электромагнитов массой 200 м устанавливают во взаимное положение по радиусу и высоте с ошибкой не превышающей $0,2 \text{ мм}$. Недопустимые ошибки геодезической установки и деформации при эксплуатации могут приводить к отклонениям пучка частиц от проектной орбиты и даже его потере.

В современных радиотелескопах применяют антенны переменного профиля, в которых отражатель представлен большим числом отдельных, механически не связанных между собой отражающих элементов. Так поверхность кругового отражателя радиотелескопа "РАТАН – 600" формируется отдельными элементами (секциями) размером $(7,4 \times 2,0) \text{ м}^2$, расположенных по окружности со средним радиусом 288 м . Формирование отражающей поверхности осуществляется путем перемещения этих элементов по радиусу, поворота их по азимуту и наклона по зенитному расстоянию. При этом отклонение поверхности каждого элемента от расчетной не должно превышать $0,1 \text{ мм}$, а отклонение положения элемента вдоль радиуса — $0,3 \text{ мм}$, по высоте — $0,2 \text{ мм}$.

Достижение такой точности при значительных габаритах и протяженности сооружений требует применения наиболее точных современных геодезических инструментов и нередко связано с необходимостью разработки специальных методов и технических средств измерений.

Для прецизионных сооружений характерным является то, что геодезические работы выполняют с одинаково высокой точностью на различных стадиях их строительства и эксплуатации.

При изысканиях проводят исследования устойчивости оснований под проектируемое сооружение путем постановки геодезических наблюдений за

вертикальными и горизонтальными смещениями грунтов на различных горизонтах от поверхности земли. Точность этих наблюдений должна быть не ниже допусков на установку и стабильность элементов сооружения. Результаты исследований служат основой для заключения о пригодности выбранной площадки под строительство.

При проектировании прецизионных сооружений вырабатывают и технически обосновывают основные требования к точности установки в проектное положение элементов сооружения, назначая реально достижимую в данных строительно-монтажных и эксплуатационных условиях точность геодезических разбивочных работ и связанных с ними измерений. В соответствии с заданной точностью разрабатывают проект геодезических работ по высокоточной установке технологического оборудования, который включает в себя решение следующих задач, определяющих состав работ:

- 1) выбор общей схемы геодезической установки в проектное положение технологического оборудования;
- 2) закрепление исходных (технологических) осей, пунктов опорной разбивочной геодезической сети и точек на устанавливаемом оборудовании;
- 3) построение опорной разбивочной плановой и высотной геодезической сети;
- 4) выбор и обоснование способов разбивочных работ и технических средств геодезических измерений (линейных, угловых, высотных, створных и т.д.);
- 5) разработка метода определения фактического положения оборудования и наблюдений за его стабильностью в эксплуатационный период.

Все указанные вопросы разрабатываются в тесной увязке с компоновкой отдельных частей сооружения и элементов внутри каждой из них, их технологической взаимосвязью, а также условиями измерений.

Большой опыт геодезических работ при строительстве прецизионных сооружений накоплен в МИИГАиК и Государственном специализированном проектном институте, где разрабатывались и внедрялись в производство методики высокоточных геодезических измерений при монтаже оборудования таких сооружений как направляющие пути большой протяженности, первый отечественный ускоритель с жесткой фокусировкой (г. Москва), Ереванский и Большой Серпуховский ускорители, Ускорительный накопительный комплекс и др. Теоретические разработки основных вопросов этих методик, а также результаты их испытаний обобщены в монографиях и научно – технических журналах ([1], [2], [3], [4] и др.).

2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОСНОВАНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Высокая чувствительность прецизионных сооружений к различного рода деформациям основания вызывает необходимость изучения и оценки планово-высотных микросмещений грунтов на площадке под сооружение как до начала строительства, так и в период его эксплуатации. Это позволяет принимать

соответствующие инженерные решения по уменьшению деформаций, а также установить периодичность контрольных измерений и последующей коррекции положения технологического оборудования для обеспечения нормальной работы сооружения.

Геодезические наблюдения за микросмещениями должны проводиться в комплексе с исследованиями различных факторов, которые могут вызвать деформации грунтов (режим подземных вод, сейсмология, метеоданные и др.). Изучение микросмещений грунтов на площадке выполняются, как правило, на различных глубинах в пределах многометровой толщины основания.

Наблюдения состоят в периодическом определении геодезическими методами положения пунктов надежно закрепленных в исследуемых грунтах. Для определения плановых микросмещений применяют высокоточные линейные, угловые и створные измерения. Основным методом наблюдений за вертикальными микросмещениями является высокоточное геометрическое нивелирование.

Наблюдения за смещениями подразделяются на точечные, створно-линейные и площадные. Точечные наблюдения ведутся в одном отдельном пункте с использованием специальных устройств в виде глубинных знаков или геофизических методов и приборов. Створно-линейные наблюдения проводятся на ряде пунктов расположенных вдоль линий. Площадные наблюдения включают связанные между собой точечные наблюдения, проведенные на площадке сооружения.

Для более полного выявления деформаций грунтов на площадке создают специальные наблюдательные сети, пункты которых закрепляют планово-высотными знаками различной конструкции. Плотность пунктов должна быть достаточно густой. Местоположение пунктов и схем сети выбирается на основе результатов детальных инженерно-геологических изысканий на площадке.

На площадках с неизвестными или явно не выраженными деформационными свойствами грунтов наблюдательную сеть целесообразно создавать в виде равноудаленных друг от друга пунктов, расположенных как можно ближе к основным технологическим осям будущего сооружения. При благоприятных в целом инженерно-геологических условиях, с точки зрения возможных деформаций, ограничиваются наблюдениями только в деформационно-аномальных местах площадки. В этом случае наблюдательные сети создают из отдельных связанных между собой полигонов. В сложной инженерно-геологической обстановке, наоборот, сеть дополняется точечными пунктами наблюдения.

Пункты наблюдательных сетей закрепляются различными типами глубинных плановых и высотных знаков, используемых в опорных геодезических сетях, создаваемых для установки технологического оборудования и для наблюдений за деформациями фундаментов и основных несущих конструкций сооружений. Кроме них используются специальные марки для изучения верхней толщи грунтов и специальные реперные устройства для проведения наблюдений за послойными смещениями пород в отдельных местах изучаемой площадки.

Периодичность циклов наблюдений устанавливается в зависимости от скорости микросмещений. Наблюдения должны начинаться не менее чем за 1,5

года до начала строительства. Все измерения в каждом цикле наблюдения необходимо выполнять в возможно короткие сроки, с тем, чтобы смещения наблюдаемых пунктов были пренебрегаемо малы по сравнению с ошибками определения этих смещений.

В качестве характеристики деформаций оснований сооружений могут быть приняты средние квадратические смещения $\Delta\bar{x}, \Delta\bar{y}, \Delta\bar{z}$ от геометрических оформляющих (условных линий, окружностей, плоскостей), получаемых по координатам x, y и z (высота) геодезических знаков в каждом цикле наблюдений.

Для линейных сооружений деформационные характеристики вычисляют от оформляющей прямой. Для кольцевых сооружений при анализе вертикальных движений грунтов пользуются условной плоскостью, а при анализе плановых смещений условной окружностью. Параметры уравнений геометрических оформляющих находят по методу наименьших квадратов.

Оформляющая прямая общего вида выражается уравнением

$$y = ax + b. \quad (1)$$

Параметры a и b вычисляются по формулам

$$a = \frac{[x_i y_i] - y_{cp} [x_i]_1^n}{[x_i^2]_1^n - x_{cp} [x_i]_1^n}, \quad (2)$$

$$b = y_{cp} - ax_{cp},$$

где x_i, y_i — координаты наблюдаемых геодезических знаков с порядковым номером i ;

n — количество наблюдаемых знаков;

$$x_{cp} = \frac{[x_i]_1^n}{n}, y_{cp} = \frac{[y_i]_1^n}{n}. \quad (3)$$

Смещение точек от оформляющей прямой находят по формуле

$$\Delta y_i = y_i - ax_i - b. \quad (4)$$

Среднее квадратическое значение смещений точек

$$\Delta y = \sqrt{\frac{[\Delta y_i^2]_1^n}{n}}. \quad (5)$$

Сравнивая уравнения прямых, полученных в начальном и j -ом циклах наблюдений можно следить за общими деформациями створа, определяя следующие элементы этой деформации.

Общий сдвиг створа относительно начального цикла наблюдений

$$C = y_{cp}^H - y_{cp}^j. \quad (6)$$

Угол Φ , составленный двумя прямыми, лежащими в одной координатной плоскости

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_j - a_H}{1 + a_j a_H} \quad (7)$$

Средняя скорость среднего квадратического смещения точек за период времени между начальным и последующими циклами наблюдений

$$V_y = \frac{\Delta \bar{y}}{t}. \quad (8)$$

Для анализа результатов площадных наблюдений за вертикальными смещениями грунтов находят оформляющую плоскость, уравнение которой имеет вид

$$z = ax + by + c. \quad (9)$$

Параметры уравнения плоскости a , b и c по полученным в данном цикле наблюдений координатам x_i , y_i и z_i геодезических знаков находятся из решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} a[x_i^2]_1^n + b[x_i y_i]_1^n + c[x_i]_1^n - [x_i z_i]_1^n &= 0 \\ a[x_i y_i]_1^n + b[y_i^2]_1^n + c[y_i]_1^n - [y_i z_i]_1^n &= 0 \\ a[x_i]_1^n + b[y_i]_1^n + cn - [z_i]_1^n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Смещение точек по вертикали от оформляющей плоскости вычисляют по формуле

$$\Delta z_i = ax_i + by_i + c - z_i. \quad (10)$$

Среднее квадратическое значение смещений

$$\Delta \bar{z} = \sqrt{\frac{[\Delta z_i^2]_1^n}{n}} \quad (11)$$

и средняя скорость изменения $\Delta \bar{z}$ с течением времени t

$$V_z = \frac{\Delta \bar{z}}{t}. \quad (12)$$

Для кольцевых сооружений пункты наблюдений располагают по окружности. В этом случае, при условии совмещения начала прямоугольной системы координат на плоскости (x, y) с центром окружности, параметры уравнения оформляющей плоскости вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} a &= \frac{2[x_i y_i]}{R^2 n}, \\ b &= \frac{2[y_i z_i]}{R^2 n}, \\ c &= \frac{[z_i]}{n}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поведение исследуемой площадки в целом относительно принятой системы координат может быть проанализировано, вычислив длину P перпендикуляра, опущенного из начала координат на оформляющую плоскость и углы α, β и γ , которые он образует с осями координат x, y и z соответственно.

Формулы для вычислений имеют вид

$$\begin{aligned} P &= \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}; \quad \cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}; \\ \cos \beta &= \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}; \quad \cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученные из различных по времени циклов наблюдений величины деформационных показателей дают возможность выявить их изменения, определить максимальные величины и степень их влияния на работу сооружения.

3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ВЫСОКОТОЧНОЙ УСТАНОВКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Выбор общей схемы решения задачи по геодезической установке оборудования зависит от компоновки отдельных систем, частей и элементов сооружения, характера и точности их технологической взаимосвязи, а также от строительно-монтажных условий.

Геометрическая компоновка оборудования при проектировании сооружения производится относительно некоторых исходных (технологических) осей и точек и представляется в виде линейных и угловых размеров, а также допусков на эти размеры. Если размещение оборудования и строительно-монтажная обстановка позволяют вынести и надежно закрепить эти точки в натуре, то они могут служить основой и для геодезической установки оборудования в проектное положение. Чаще всего для прецизионных сооружений, отличающихся сложностью конструкции, это оказывается невозможным. В этом случае создают специальную опорную геодезическую сеть, пункты и стороны которой принимают на себя роль исходных точек. При этом должна быть известна или рассчитана привязка технологических осей к опорной геодезической сети.

Плановая установка оборудования относительно пунктов, закрепляющих исходные оси или опорную геодезическую сеть, осуществляется с использованием известных способов геодезической разбивки: полярных координат, прямой

угловой засечки, линейной и створной засечек. Высокая точность установки оборудования этими способами достигается применением высокоточных средств линейных и угловых измерений, а также специального оборудования, уменьшающего влияние различных источников ошибок измерений.

Основным способом высотной установки оборудования является высокоточное геометрическое нивелирование. Применяют также способы гидростатического нивелирования и микронивелирования.

При разработке общей схемы и выборе способа плановой геодезической разбивки принимают во внимание обеспечение установки оборудования с наименьшей ошибкой по определенному заданному в проекте направлению. С учетом этого при оценке возможности применения того или иного способа разбивки находят не только величину ошибки в положении разбиваемой точки, но и определяют направление, в котором ожидается максимальная и минимальная ошибки.

Для высокоточной установки технологического оборудования, на нем необходимо иметь обозначенные тем или иным способом точки и плоскости, т.е. геодезические знаки. Положение этих знаков должно быть задано в проектных чертежах и с достаточной точностью привязано к технологическим осям. В ряде случаев для привязки возникает необходимость в создании специального измерительного (калибровочного) стенда. На нем геодезическим способом или машиностроительными измерительными средствами определяют элементы привязки a , b , c и h (рис. 1). Знаки на оборудовании желательно располагать как можно ближе к технологическим осям.

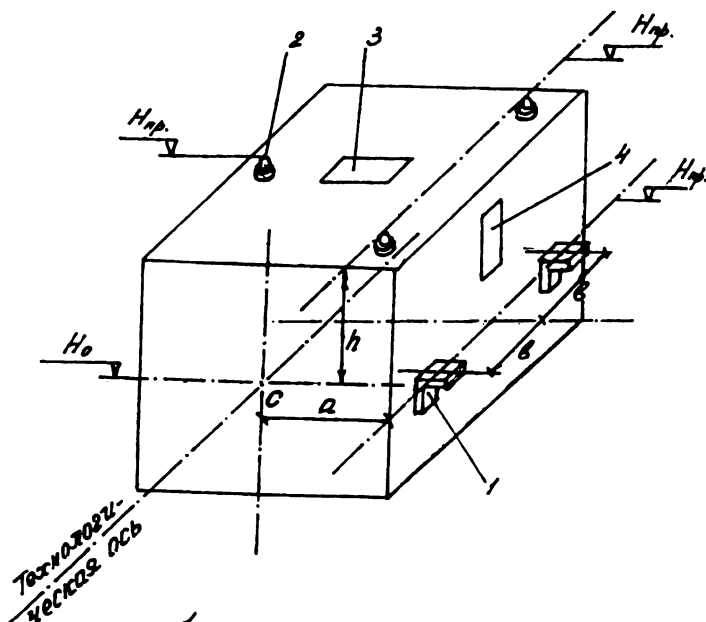


Рис. 1. Геодезические знаки на оборудовании

Для установки блока технологического оборудования на нем необходимо иметь не менее двух плановых 1 и трех высотных 2 геодезических знаков (рис. 1). Вместо трех высотных знаков можно иметь одну горизонтальную плоскость (3), имеющую проектную отметку. Устанавливая на плоскость монтажные уровни, устраняют наклоны оборудования. В практике находит применение планово-высотный уголкового геодезический знак. Центром знака служит перекрестие штрихов или ось втулки 2, впрессованной в горизонтальную часть уголка (рис. 2). Во втулку может вставляться визирная цель, снабженная цилиндрическим, для угловых измерений, или вкладышем с перекрестием для линейных измерений. Верхней плоскостью двух знаков задают проектные отметки, по которым блок устанавливают по высоте. Для устранения наклона в этом случае на блоке устраивают вертикальную плоскость 4 (см. рис. 1), которая вместе с блоком приводится в отвесное положение при помощи специального уголкового уровня. Для конструкции высотных знаков на оборудовании характерно наличие шарика или сферической головки, на которую ставится или подвешивается нивелирная рейка.

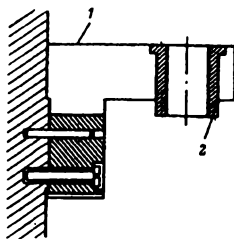


Рис. 2. Уголкового геодезического знака

Для сооружений прямолинейного вида общая схема решения задачи по высокоточной установке оборудования чаще всего включает вынос в натуру технологической оси, надежное закрепление ее опорными знаками и разбивку от этих знаков отдельных блоков оборудования с применением створно-линейного метода. Вдоль закрепленной технологической оси блоки устанавливают по их геодезическим знакам отложением от опорного знака расстояний и одним из высокоточных створных методов, например, струнно-оптическим.

На схеме, представленной на рис. 3, вынесенную и закрепленную опорными знаками технологическую ось фиксируют калиброванной струной диаметром 0,1 — 0,2 мм, которую подвешивают над оборудованием. Для точной установки струны над центрами опорных знаков и для размещения в створе струны блоков оборудования по их геодезическим знакам применяют микроскопы (рис. 3а) или оптические приборы вертикального проектирования (рис. 3б).

Оптический проектирующий прибор ОПП – 2, разработанный в МИИГАиК, состоит (рис. 4) из наклонно расположенной зрительной трубы 1, которая своей конической осью 2 вставляется во втулку подставки 4 и может вращаться в ней. Для приведения оси вращения прибора в отвесное положение служат два взаимноперпендикулярных уровня 7 с ценой деления 10" и три подъемных винта.

Визирная ось зрительной трубы после преломления в пентапризме направляется вертикально вверх к струне. В конструкции прибора предусмотрено, что продолжение визирной оси совпадает с осью вращения и лежит в контактной плоскости 6. Для измерения отклонений от створа в пределах $\pm 2,5$ мм прибор снабжен плоскопараллельной пластинкой 8 с отсчетным барабаном (цена деления 0,1 мм). Для плотного прижатия контактной плоскости к устанавливаемой грани подставка прибора имеет пружинный упор 5, убирающийся при поднятии ручек 3. По результатам производственных измерений средняя квадратическая ошибка установки оборудования с помощью струны и прибора ОИП - 2 не превышает 0,1 мм при длине створа до 400 м.

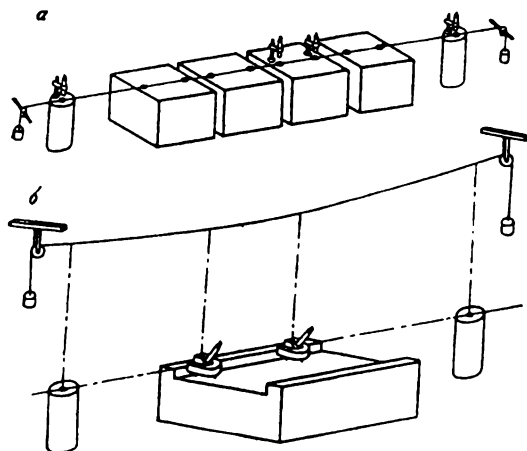


Рис. 3. Высокоточная установка оборудования струнно-оптическим методом

При установке направляющих путей струну удобнее подвешивать параллельно технологической оси, применяя в качестве проектирующего прибора прецизионный оптический ординатометр (рис. 5).

Одна из возможных схем плановой установки оборудования кольцевых сооружений относительно опорной геодезической сети показана на рис. 6. Отдельные блоки оборудования устанавливают полярным методом относительно опорных пунктов $P_1, P_2, P_5, \dots$ и временно закрепляемых в их створе вспомогательных точек ПЗл и ПЗп. Каждый блок устанавливается по разбивочным

элементам Δ_r, γ_r и δ_r соответствующих расположению линейного элемента δ_r в направлении (в данном случае радиальном), по которому требовалась наибольшая точность установки блока. При этом точность установки блока в радиальном направлении в основном зависит от точности отложения δ_r , что очень важно в условиях, когда линейные измерения выполняют точнее, чем угловые. Вспомогательные точки ПЗл и ПЗп временно закрепляются переносными геодезическими знаками, к верхней части которых прикрепляется координатный столик. Центр его представляет собой полую втулку или шарик, служащий для

принудительного центрирования визирных целей и теодолита.

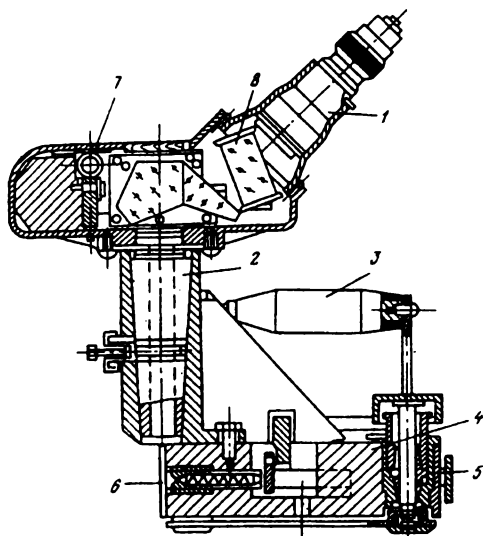


Рис. 4. Оптический проектирующий прибор ОПЦ-2

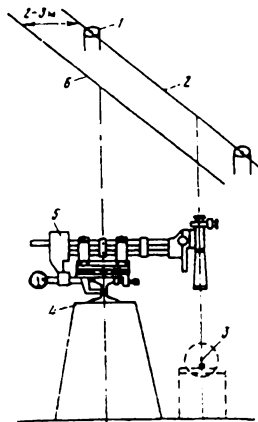


Рис. 5. Оптический ординатометр:

- 1 — опорный знак; 2 — струна;
- 3 — струна в трубе; 4 — направляющая;
- 5 — ординатометр; 6 — технологическая ось.

В створе смежных опорных пунктов центры вспомогательных пунктов могут быть установлены одним из высокоточных створных методов.

Отложение линейных разбивочных элементов Δ_r и δ_r можно произвести

инварными лентами с миллиметровыми делениями, используя для натяжения прецизионные блоки и для отсчитывания – микроскоп-микрометры. Отложение и последующий контроль длин до 4 м удобно производить нутромерами, применяемыми в машиностроительной измерительной технике, или специально изготовленными для этих целей мерными жезлами.

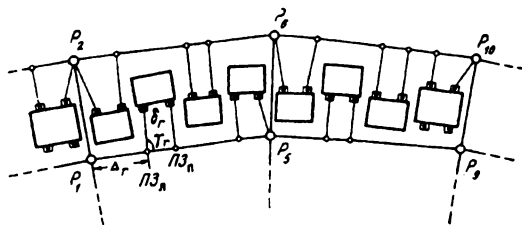


Рис. 6. Схема установки оборудования от пунктов опорной геодезической сети

Угловой элемент γ_r откладывают высокоточным теодолитом, установленным на опорном или вспомогательном знаке.

В рассмотренной выше схеме установки оборудования опорные пункты и геодезические знаки на оборудовании находятся на одном горизонте. В некоторых случаях их располагают на разных горизонтах (рис. 7). При этом непосредственно от опорных пунктов 1 устанавливают вспомогательные знаки 5, закрепляя их в положение, соответствующее проектному положению знаков 4 и 3 на оборудовании 2. Затем над этими вспомогательными знаками устанавливают оборудование при помощи высокоточных приборов вертикального проектирования.

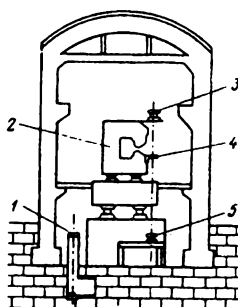


Рис. 7. Схема установки оборудования при размещении опорных пунктов и знаков на оборудовании на разных горизонтах

При сравнительно небольшом количестве блоков оборудования они могут быть установлены последовательно один относительно другого по заданному в проекте взаимному положению. Необходимые при этом измерения чаще всего выполняют с использованием средств машиностроительной измерительной

техники (контрольных линеек, штангенциркулей, нутрометров, катетометров, индикаторов часового типа, монтажных уровней и др.). В ряде случаев, применительно к данным условиям монтажа оборудования разрабатываются специальные шаблоны и контрольно-измерительные приборы. На схеме, представленной на рис. 8 часть блоков оборудования (А и Б) устанавливается от пунктов опорной геодезической сети. Разбивку остального оборудования (1, 2, 3...) производят относительно знаков, закрепляющих на установленном оборудовании вспомогательную ось.

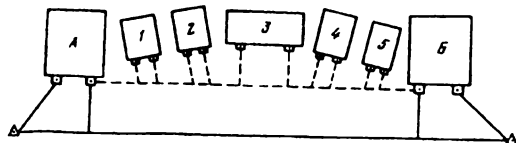


Рис. 8. Комбинированная схема установки оборудования

В практике высокоточных разбивочных работ, если это требуется и позволяют условия, уточняют положение выносимых в натуре точек путем более точного координирования и редуцирования в проектное положение. Применяют, например, известный прием уточнения однократно отложенных разбивочных элементов (углов и линий) в методах полярных координат и прямой угловой засечки. Процесс уточнения однократно отложенного угла состоит в том, что отложенный угол измеряют с требуемой точностью, а затем редуцируют путем введения линейной поправки. Указанный прием не всегда возможно осуществить. Так, при установке тяжелого и громоздкого оборудования его перемещение в соответствии с величиной и направлением элементов редукции является весьма сложным и трудоемким процессом. Поэтому при применении методов прямой угловой засечки и полярных координат нередко приходится ограничиваться однократным отложением угла, принимая меры по уменьшению влияния различных источников ошибок.

Технологическое оборудование для его точной установки в проектное положение должно быть снабжено регулируемыми устройствами (типа клиновых или винтовых домкратов), при помощи которых осуществляется его микрометрическое перемещение в плане и по высоте. Геодезическая установка каждого блока оборудования по его разбивочным элементам производится последовательными приближениями, чередованием процессов высотной и плановой установки.

Геодезические знаки, предназначенные для закрепления наблюдаемых точек при исследованиях микросмещений грунтов на площадке и закрепления опорных пунктов при высокоточной разбивке и выверке технологического оборудования прецизионных сооружений, должны обладать повышенной устойчивостью и обеспечивать высокую точность выполняемых на них измерительных операций. Это достигается конструкцией знака и соответствующим выбором условий заложения или закрепления знака.

Опорные знаки размещают вне зоны возможного влияния на них оползней, карста, подземных выработок, гидродинамических и гидротермических воздействий, а также вне зоны напряжений в грунтах от массы сооружений, динамических нагрузок от работающих механизмов и движущегося транспорта.

Наибольшей устойчивостью обладают глубинные знаки, закрепляемые в практически несжимаемых скальных грунтах, таких как граниты, сланцы, кремнистые и глинистые песчаники, известняки и др.

Широко распространены опорные знаки в виде металлических труб, железобетонных столбов и пилонов, устанавливаемых в котлованах и скважинах. Конструкция верхней части (головки) опорных и вспомогательных знаков должна соответствовать применяемым методам и техническим средствам измерений, обеспечивая необходимую точность центрирования теодолита, визирных марок и других измерительных приборов и оборудования.

На рис. 9 показан плановый опорный знак трубчатого консольного типа. Знак представляет собой трубу 3 с регулировочными винтами 1 для выведения головки знака 7 на требуемый горизонт при монтаже. Труба 3 закрепляется в нижних устойчивых породах при помощи бетонного якоря 2 и имеет защитный кожух в виде обсадной трубы 5. Для предохранения от загрязнения и попадания воды в нижней части межтрубного пространства закладывается мягкий сальник или битумный слой 4, в верхней части — матерчатая диафрагма 6. Конструкция головки знака предусматривает в данном случае принудительное центрирование на знаке теодолита и визирных марок. Центром знака является центрировочная втулка, ось которой при необходимости может быть зафиксирована вкладышем с перекрестием. При длине трубы (консоли) до 6 м знак обладает незначительной чувствительностью к боковым воздействиям, что позволяет устанавливать геодезические приборы непосредственно на головку знака.

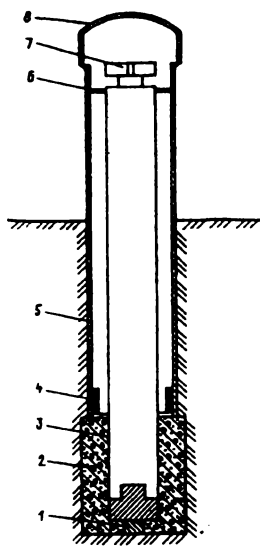


Рис. 9. Плановый знак с жёсткой консолью

При глубоком залегании устойчивых коренных пород находят применение геодезические знаки, основанные на принципе обратного отвеса. К ним относится геодезический знак в виде сухого обратного отвеса, разработанный М.С. Муравьевым (рис. 10): на дне скважины, забуренной на глубину коренных устойчивых пород и обсаженной трубой 1, при помощи якоря прикрепляют инварную проволоку 2, которая полым торообразным поплавком 3, свободно плавающим в кольцевом резервуаре 4, натягивается вертикально кверху, благодаря действующей на поплавок подъемной силе. Центром знака служит шток 5 с перекрестием. Под действием внешней возмущающей силы поплавок может быть выведен из состояния равновесия, но всегда возвращается в первоначальное положение. При помощи измерительного микроскопа можно производить наблюдения за взаимным перемещением центра и резервуара – и тем самым за перемещением верхних слоев грунта над глубинными.

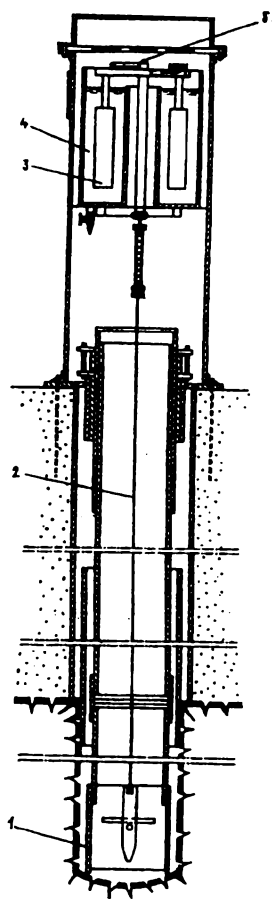


Рис. 10. Обратный отвес

Опорными высотными знаками, особенно при наблюдении за осадками сооружений, могут служить глубинные репера. Основная деталь такого высотного знака — реперная штанга. Чаще всего представляет собой металлическую трубу или стержень, закрепляемые в твердые коренные породы, и оборудованные наверху сферической головкой, несущей отметку.

Глубинный репер такого типа, но с двумя реперными штангами — стержнями для учета сезонных температурных изменений их длины, представлен на рис. 11. Наличие двух штанг 1 (основной) и 2 (вспомогательной) с большой разностью коэффициентов температурного расширения, например, стали и дюралюминия позволяет найти поправку в отметку репера по формуле:

$$\Delta_l = \frac{\Delta \alpha_{осн}}{\alpha_{осн} - \alpha_{всп}},$$

где Δ — разность температурных удлинений штанг, т.е. изменение расстояния между их головками, измеряемое при помощи индикатора часового типа;

$\alpha_{осн}, \alpha_{всп}$ — соответственно коэффициенты температурного расширения основной и вспомогательной штанги.

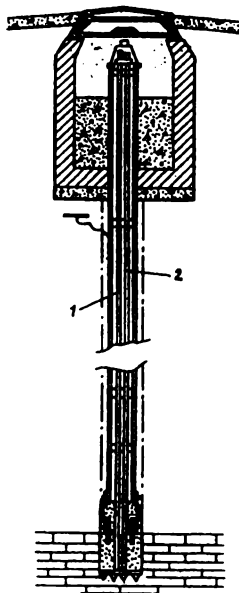


Рис. 11. Биметаллический репер П. И. Брайта

Реперы такой конструкции называют биметаллическими. Реперными штангами в них могут быть концентрически расположенные трубы разного металла и диаметра, а также струны. Устройство струнного биметаллического репера показано на рис. 12. Основная инварная 10 и вспомогательная стальная 3 проволоки крепятся к штоку 1, забетонированного в штангу с обсадной защитной трубой 11. Проволоки натянуты грузами 4 и 9 через равноплечные рычаги 5 и 7,

расположенные в корпусе 2. На инварной проволоке прикреплена шкаловая марка, ноль которой несет отметку репера. Разность удлинений проволок под влиянием температуры определяется индикатором часового типа 6.

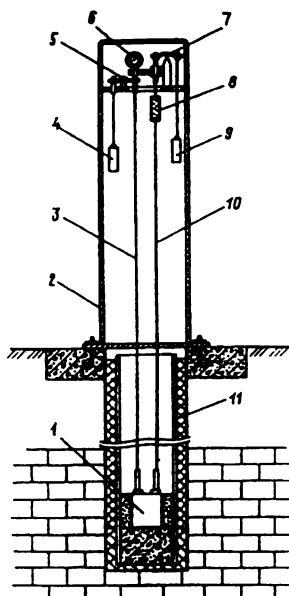


Рис. 12. Биструнный репер М. Е. Пискунова

Выбор метода и схемы построения специальной опорной геодезической сети определяется требуемой точностью установки технологического оборудования. При плановой установке оборудования высокая точность чаще всего требуется лишь по одному из направлений, обычно определяемому основным технологическим процессом. Следовательно, при определении положения пунктов опорной сети наибольшая точность должна быть обеспечена в этом направлении. Схема построения опорной сети для высокоточной установки технологического оборудования сооружений зависит от формы, размеров и размещения отдельных частей сооружения. Пункты сети стремятся располагать вблизи от устанавливаемого оборудования, поэтому общая форма сети обычно повторяет планировку сооружения в целом. Вместе с тем для обеспечения заданной точности установки оборудования в проектное положение схема построения сети должна отвечать требованиям точности определения отдельных ее элементов и взаимного положения пунктов.

Плановые опорные сети обычно создают правильной формы в виде системы одинаковых симметричных фигур — треугольников, четырехугольников, центральных систем. Такая сеть по точности определения взаимного положения пунктов является более однородной, что очень важно для технологического режима высокоточных сооружений. Эта форма сети (при необходимости производить измерения сторон одним уложением мерного прибора) выгодна в

организационном отношении, так как сокращает число различных по длине сторон сети, а следовательно, и число применяемых мерных приборов.

Особенностью построения опорных геодезических сетей для высокоточной установки оборудования является большая плотность пунктов. Расстояния между смежными пунктами зачастую не превышают 25 м. В этом случае при однородных внешних условиях добиться высокой точности линейных измерений легче, чем угловых. На этом основании наиболее точным методом построения плановых опорных геодезических сетей признан метод микротрилатерации.

Широкое распространение получили радиально-кольцевые, кольцевые и линейно-вытянутые сети микротрилатерации.

Радиально-кольцевые сети представляют собой центральные системы, состоящие из треугольников или четырехугольников. Создание их целесообразно для сооружений круговой формы, например, ускорителей сравнительно небольших размеров, когда все пункты сети, включая центральный и устанавливаемое оборудование находятся в одном здании.

Кольцевые сети микротрилатерации создаются при строительстве сооружений кольцевой формы, размещенных в тоннеле. Возможны различные схемы построения кольцевых сетей в зависимости от возможности размещения пунктов, обеспечивающего производство измерений. Наибольшей точностью отличаются сети, состоящие из цепочки сильно вытянутых треугольников с измеренными сторонами и высотой, опущенной на большую сторону (рис. 13). Измерение в треугольнике высоты приводит к увеличению точности вычисления углов и определения положения пунктов сети в радиальном направлении. Положение основания высоты в створе большой стороны определяется в натуре одним из точных створных методов, например, струнно-оптическим, и фиксируется переносным геодезическим знаком.

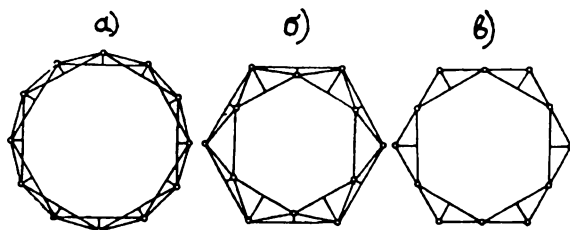


Рис. 13. Кольцевые сети трилатерации из вытянутых треугольников

Схема сети, изображенная на рис. 13а представляет собой цепочку перекрывающихся треугольников, одинаковых по форме и размерам. По компактности размещения пунктов сети вдоль окружности ее можно считать наиболее выгодной. На рис. 13б сеть состоит из примыкающих друг к другу треугольников. Недостатком этой схемы является то, что треугольники имеют разную форму. В схеме на рис. 13в связь между соседними треугольниками осуществляется путем совмещения в одном створе их сторон.

Линейно-вытянутые сети микротрилатерации применяют при установке технологического оборудования, расположенного по прямолинейному

направлению. Такие сети могут быть представлены, например, в виде двух схем (рис. 14). Первая состоит из примыкающих друг к другу вытянутых треугольников. Во второй—сеть образуется прямоугольными треугольниками с измеренными гипотенузой и высотой и связанными между собой совмещением в одном створе гипотенузы предыдущего треугольника с большим катетом последующего треугольника.

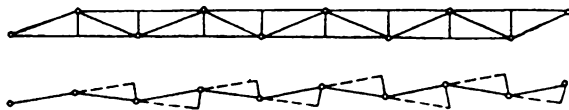


Рис. 14. Линейно-вытянутые сети трилатерации

В линейно-вытянутых сетях микротрилатерации из вытянутых треугольников взаимное положение близко расположенных пунктов определяется с высокой точностью, достигнуть которую угловыми измерениями трудно. Однако с увеличением числа треугольников в сети точность значительно снижается. Поэтому при необходимости, вызванной требованиями установки оборудования, для более точного определения взаимного поперечного положения удаленных пунктов сети целесообразно применить и угловые измерения.

В сетях микротрилатерации из вытянутых треугольников, отвечающих критерию вытянутости ($c/h_a \geq 5$), где c — малая сторона, h_a — высота, опущенная на большую сторону a , измеренные малые стороны и углы, вычисленные по этим сторонам и высотам, можно рассматривать как независимые величины. На этом основании оценка точности и уравнивание сети микротрилатерации могут быть заменены оценкой точности и уравниванием полигонометрического хода, составленного по малым сторонам и вычисленным углам между ними.

В задаче оценки точности специальных опорных геодезических сетей входит выявление точностных характеристик геодезических построений и соответствия этих характеристик определенному геометрическому условию или технологическому процессу. При дифференцировании допусков на установку оборудования по различным направлениям необходимо иметь возможность подсчитать ошибку пункта не только по осям координат, но и по любому другому направлению. Более полно указанная задача решается путем построения эллипса ошибок. Для сооружений с технологическим процессом, протекающим в гармоническом режиме, например, в ускорителях элементарных частиц, ошибки в положении пунктов подвергают гармоническому анализу. При этом точность определения положения пунктов выражают случайными ошибками, являющимися вполне конкретными как по модулю, так и по знаку. Для отыскания этих ошибок применяют метод математического моделирования, сущность которого состоит в следующем.

Задается модель сети, формы и размеры которой определяют проектом в зависимости от компоновки частей сооружения и условий производства геодезических работ. Все элементы модели сети (длины сторон, значения углов,

превышения) должны быть геометрически согласованы между собой. Принятые в модели проектные значения элементов сети, а также вычисленные по ним значения координат рассматриваются как истинные. Далее в эти истинные значения элементов сети вносятся искажения, имитирующие случайные ошибки измерений. Величины этих ошибок могут быть получены на ЭВМ, задаваясь величиной средней квадратической ошибки соответствующей принятой методике измерений. Полученными случайными ошибками искажают принятые истинные значения элементов сети. Рассматривая искаженные значения элементов в качестве измеренных, производят уравнивание сети. Разности между значениями координат пунктов, полученными из уравнивания, и истинными значениями этих координат являются сдвигами пунктов по осям координат, по которым легко получить ошибки положения пунктов по любому интересующему направлению, например, радиальному для кольцевых сетей.

Для получения более надежных результатов анализ сети выполняют при достаточно большом числе серий набора случайных ошибок измеряемых элементов сети.

Полученные из испытаний методом математического моделирования случайные ошибки в положении пунктов подвергаются гармоническому анализу. Определяются коэффициенты рядов Фурье и амплитуды гармоник, которые не должны превышать заданных в проекте пределов.

Для кольцевой геодезической сети, состоящей из n пунктов, коэффициенты A и B ряда Фурье определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{RK}; \\ A_S &= \frac{1}{n/2} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{RK} \cos(S \cdot \omega_K); \\ B_S &= \frac{1}{n/2} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{RK} \sin(S \cdot \omega_K), \end{aligned} \quad (15)$$

где ε_{RK} — сдвиг пунктов сети по направлению радиусов;

K — номер пункта;

S — номер гармоники ($S=1,2,3,\dots,30$);

$$\omega_K = \frac{360^\circ}{n} (k-1);$$

n — число пунктов;

Средние квадратические значения амплитуд гармоник вычисляются по формуле:

$$C_S = \sqrt{A_S^2 + B_S^2}. \quad (16)$$

В ускорителях обычно задают допустимые значения амплитуд гармоник, наиболее опасных для их нормальной работы.

Высокоточные высотные опорные сети создаются методом высокоточного геометрического нивелирования короткими визирными лучами,

гидростатического нивелирования и микро nivelирования.

4. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Высокая точность геодезических работ при строительстве прецизионных сооружений достигается применением высокоточных измерительных средств геодезии, метрологии и машиностроения, а также специального оборудования и методов, уменьшающих влияние различных источников ошибок измерений. Наряду с применением стандартных приборов для решения конкретных технических задач по установке технологического оборудования приходится разрабатывать нестандартизированные приборы и оборудование, отдельные устройства, дополняющие стандартные приборы, и целые системы для выполнения различного вида геодезических работ с заданной точностью.

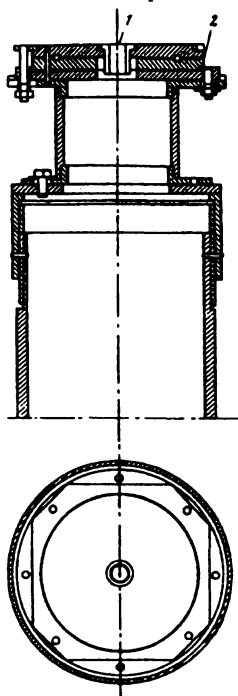


Рис. 15. Геодезический знак для принудительного центрирования

Для угловых измерений применяют высокоточные теодолиты типа Т1 и Т05 и их зарубежные аналоги, характеризующиеся инструментальной ошибкой измерения угла одним приемом $m_{\beta} \leq 1''$. Такая точность достижима при условии, если технические параметры теодолитов соответствуют установленным для них метрологическим характеристикам. С этой целью выполняют исследования всех

основных инструментальных ошибок. Для повышения точности применяют различные методы измерений, уменьшающих влияние инструментальных ошибок, при необходимости вводят поправки в результаты измерений.

Опорные разбивочные геодезические сети обычно представляют собой микросети, характеризуемые короткими сторонами, например, микротриангуляция. В этом случае большое влияние на точность угловых измерений оказывают ошибки центрирования теодолита и редукции визирных целей.

Наиболее высокая точность центрирования теодолита и визирной цели над геодезическим знаком достигается применением способа *принудительного центрирования*.

Один из таких способов предусматривает наличие цилиндрической поллой втулки 1 на головке геодезического знака (рис. 15), шарика на теодолите (рис. 16) и цилиндра на визирной марке (рис. 17). Центр знака определяется осью втулки и фиксируется перекрестием штрихов на цилиндрическом вкладыше. Центрирование осуществляется путем скользящей посадки шарика с инструментом во втулку геодезического знака. Указанное приспособление для центрирования должно удовлетворять следующим основным условиям:

- ось втулки на геодезическом знаке должна быть вертикальной;
- центр шарика должен совпадать с основной осью вращения теодолита;
- ось цилиндра на визирной марке должна совпадать с осью симметрии цели.

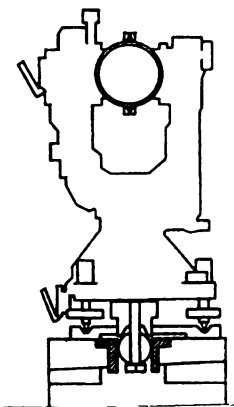


Рис. 16. Теодолит с центрирующим устройством

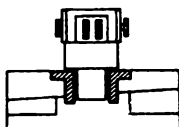


Рис. 17. Визирная марка с центрирующим цилиндром

Первое условие достигается в процессе монтажа геодезического знака уровнем с цилиндрическим вкладышем. Юстировка знака с целью приведения оси втулки в вертикальное положение осуществляется при помощи двух клиновидных дисков 2, вращением их в противоположные стороны (см. рис. 15).

Величина внецентренности теодолита из-за наклона ν_e втулки геодезического знака и ошибки приведения основной оси вращения теодолита в вертикальное положение выражается формулой

$$e = \frac{\nu_e \cdot r}{\rho''}, \quad (17)$$

где r — расстояние от центра шарика до перекрестия штрихов вкладыша, фиксирующего центр знака.

Для расчета внецентренности визирной марки величину r в этой формуле надо рассматривать как расстояние l по высоте от точки, фиксирующей на вкладыше центр знака, до точки визирования на марке (рис. 18). Приняв, например, $\nu_e = 30''$ и $r = 12,7$ мм, получим $e = 2$ мкм.

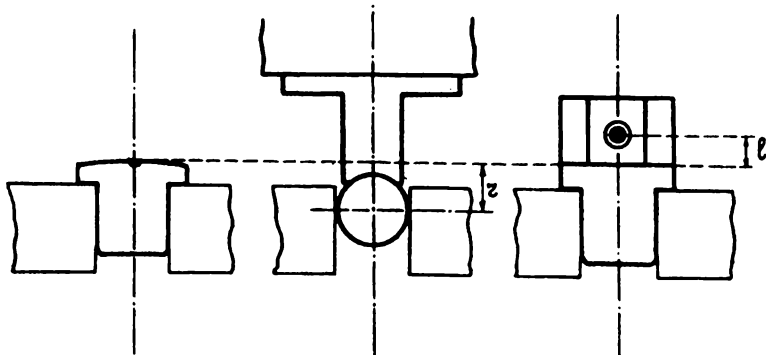


Рис. 18. Взаимное расположение центрирующих устройств

Точность принудительного центрирования описанным способом зависит также от точности технологической посадки шарика на продолжение основной оси вращения теодолита и соосности посадочного цилиндра и цели на визирной марке.

Так как внецентренность теодолита или визирной марки следует рассматривать относительно центра, фиксируемого вкладыша с перекрестием, то, кроме рассмотренных источников ошибок, на величину внецентренности влияют ошибки, связанные с изготовлением вкладыша и его посадки во втулку знака.

При тщательном изготовлении центрирующего устройства за среднюю величину внецентренности теодолита и визирной марки на геодезическом знаке можно принять $e = 15$ мкм.

Используя известные формулы влияния внецентренности теодолита и визирных марок на точность измерения угла, близкого к 180° , при $e = e_1 = 15$ мкм и

$S=25$ м, получим

$$m_u = \rho'' \frac{l}{S} \sqrt{2} = 0,17'',$$

$$m_p = \rho'' \frac{l_1}{S} = 0,12''.$$

В линейно-угловых геодезических построениях, например, при разбивке способом полярных координат, удобно применять устройство, позволяющее производить на опорном геодезическом пункте угловые и линейные измерения одновременно (рис. 19). Способом принудительного центрирования на знаке сначала устанавливается подставка с микроскоп-микрометром для линейных измерений, а затем над ней – теодолит.

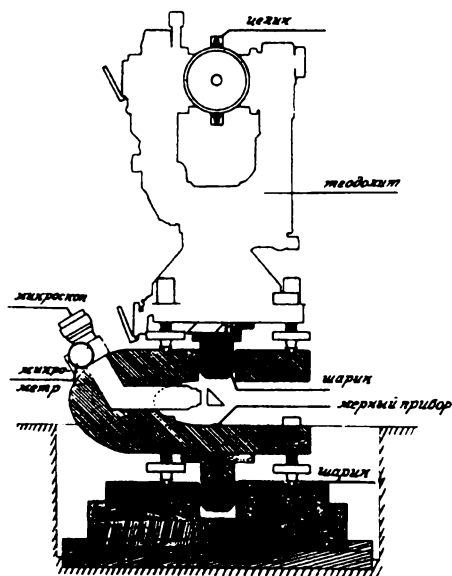


Рис. 19. Устройство для одновременного производства угловых и линейных измерений на опорном знаке

Другой способ принудительного центрирования предусматривает наличие шарика на геодезическом знаке, цилиндрической втулки на теодолите и визирной марке (рис. 20). Центр знака – перекрестие штрихов на верхней поверхности шарика.

Требования к этому устройству для принудительного центрирования следующие:

— ось, проходящая через перекрестие штрихов и геометрический центр шарика, должна устанавливаться вертикально;

— ось посадочной втулки должна совпадать с основной осью вращения теодолита, на визирной марке она должна совпадать с осью симметрии визирной цели;

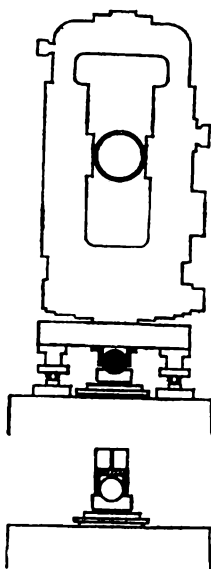


Рис. 20. Теодолит и визирная марка с центрирующей втулкой

Указанные требования могут выполнены таким же путем и приблизительно с такой же точностью, как и в первом способе принудительного центрирования.

Основными причинами изменения величины коллимационной ошибки, влияющей на точность измерения угла, являются перемена фокусировки трубы теодолита и колебания температуры.

Перефокусировка трубы может вызвать смещение фокусирующей линзы, что приводит к отклонению визирной оси от перпендикулярного к оси вращения трубы направления и изменяет величину коллимационной ошибки. Основной причиной смещения фокусирующей линзы при перемене фокусировки являются ошибки изготовления и износа фокусирующего устройства.

Из-за неправильного хода фокусирующей линзы коллимационная ошибка трубы не остается постоянной для различных расстояний до наблюдаемых целей.

Для некоторого расстояния S_i коллимационную ошибку можно рассматривать как состоящую из собственно коллимационной ошибки C , возникающей из-за неправильного положения сетки нитей и ошибки δ_{S_i} , вызванной смещением фокусирующей линзы, т.е.

$$\left. \begin{aligned} C_{S_1} &= C + \delta_{S_1} \\ C_{S_2} &= C + \delta_{S_2} \\ &\dots\dots\dots \\ C_{S_i} &= C + \delta_{S_i} \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Отсюда изменение величины коллимационной ошибки при перемене фокусировки трубы с расстояния S_1 на S_2 равно

$$\delta_{S_1-S_2} = \delta_{S_1} - \delta_{S_2} = C_{S_1} - C_{S_2}, \quad (19)$$

которая и является ошибкой из-за неправильного хода фокусирующей линзы.

Влияние этой ошибки на измеряемый угол можно выразить следующим образом:

$$\Delta C = \frac{C_{S_1}}{\cos v_1} - \frac{C_{S_2}}{\cos v_2}. \quad (20)$$

С учетом внецентренности трубы r в общем случае имеем:

$$\Delta C = C \left(\frac{1}{\cos v_1} - \frac{1}{\cos v_2} \right) + \left(\frac{\delta S_1}{\cos v_1} - \frac{\delta S_2}{\cos v_2} \right) + rp'' \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \right). \quad (21)$$

Для обеспечения постоянства коллимационной ошибки, а следовательно, и уменьшения ее на величину угла, отложенного при одном положении трубы, необходимо соблюдать равенство длин и наклонов сторон угла. Чтобы иметь $v_1 = v_2$, центры знаков, закрепляющих пункты опорной разбивочной геодезической сети, располагают на одной высоте с устанавливаемыми на оборудовании геодезическими знаками.

Причиной непостоянства коллимационной ошибки может быть деформация отдельных частей трубы теодолита под влиянием изменения температуры, поэтому сохранение постоянства температуры являются важнейшим условием повышения точности угловых измерений.

Для того чтобы судить о величине изменения коллимационной ошибки, вызываемой различными указанными выше факторами, выполняют специальные исследования теодолита, по результатам которых делают заключение о возможности использования теодолита в высокоточных угловых измерениях.

Наиболее существенным фактором внешних условий, влияющим на точность угловых измерений, является боковая рефракция, которая, как известно, происходит вследствие наличия температурных градиентов воздуха на пути визирных лучей. Приближенная величина ошибки за рефракцию в направлении может быть найдена по формуле

$$\delta_H'' = \frac{10,6 P_{cp} L}{(273 + t_{cp})^2} \nabla t, \quad (22)$$

где P_{cp} — среднее для направления давление воздуха в мм рт.ст.;

L — длина визирного луча;

t_{cp} — средняя для направления температура воздуха по Цельсию;

∇t — средний градиент температуры воздуха в направлении, перпендикулярном визирному лучу.

Пользуясь этой формулой, может быть решен вопрос, какие требования необходимо предъявлять к температурному режиму воздуха при измерении угла, то есть, в пределах каких величин должны находиться градиенты температуры, чтобы искажения измеряемых углов находились в допустимых пределах. Например, положив $\delta_H = 1,0$, $t_{cp} = 20^\circ$, $P_p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$, $L = 25 \text{ м}$, получим допустимый градиент $\nabla t = 0,4 \text{ град./м.}$

Учитывая, что при прохождении обоих направлений измеренного угла в одинаковых условиях ошибка δ_H'' удвоится, будем иметь

$$\nabla t = 0,2 \text{ град./м.}$$

В том случае, когда условия измерений, характеризуемые заданными температурными градиентами, создать невозможно, предусматривается определение величин поправок и введение их в результаты измерений.

Формула поправки в направление имеет вид

$$\delta_H'' = -\frac{\rho \mu L}{K} \left[\frac{K}{2} \left(\frac{dt}{dY} \right)_1 + \sum_{i=2}^K (K-i+1) \left(\frac{dt}{dY} \right)_i \right], \quad (23)$$

$$\text{где } \mu = 105,5 \cdot 10^{-6} \frac{P_p}{(273,2 + t_{cp})^2};$$

K — число равных частей, на которые длина визирного луча делится точками измерения температурных градиентов;

$\left(\frac{dt}{dY} \right)_i$ — горизонтальный градиент температуры воздуха в направлении, перпендикулярном направлению визирного луча;

$$i = 2, 3, 4, \dots, K.$$

Измерить температурные градиенты с точностью $0,03^\circ + 0,05^\circ$ можно с помощью специального градиентомера.

Высокоточный трехточечный термический градиентомер предназначен для определения температурных градиентов воздуха в процессе угловых измерений и при высокоточном геометрическом нивелировании.

Принцип действия прибора основан на измерении разности температур двух термодатчиков, включенных в мостовую схему. Каждый из пары термодатчиков, включенных в мостовую схему, изменяет свое внутреннее сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды. Таким образом, при расположении термодатчиков в слоях воздуха с разной температурой величина результирующего тока, протекающего через измерительную диагональ электрического моста, соответствует разности температур указанных слоев воздуха. Термодатчики предварительно тщательно отбираются с тем, чтобы при измерениях обеспечивалась линейная зависимость изменения внутреннего сопротивления от изменения температуры окружающей среды.

Конструктивно градиентомер представляет собой совокупность двух

элементов — несущей штанги с термодатчиками и измерительного блока. В качестве термодатчиков могут быть использованы кремниевые диоды. При угловых измерениях штанга с термодатчиками устанавливается на штативе горизонтально и перпендикулярно визирному лучу, при нивелировании — вертикально.

При производстве высокоточных угловых, а также створных измерений визирование иногда производят через специально устанавливаемые трубы. Распределение температур внутри труб происходит с радиальной симметрией независимо от внешних температурных градиентов, и это исключает влияние боковой рефракции.

При использовании современных высокоточных кодовых теодолитов влияние других источников ошибок, таких как ошибка визирования, отсчетов, остаточные, инструментальные не является существенным. Тем не менее, для ответственных высокоточных инженерно-геодезических работ при разработке методики измерений рекомендуется определять величины этих ошибок. Как показал опыт, при использовании рассмотренных выше мер по уменьшению влияния основных источников ошибок, угловые измерения при коротких (до 25 м) расстояниях в условиях закрытого помещения можно выполнять со средней квадратической ошибкой не превышающей 0,5 — 0,7".

Высокая точность линейных измерений, требуемая при разбивке прецизионных сооружений, достигается в основном применением штриховых мерных приборов и принятием мер по уменьшению влияния различных источников ошибок, связанных с использованием этих приборов.

Для высокоточного измерения расстояний до 4 м в ряде случаев целесообразно применять штриховые мерные приборы в виде жезлов, эталонирование которых может быть произведено на настольных компараторах и измерительных машинах, выпускаемых для целей машиностроения. При измерениях больших длин применяют подвесные мерные приборы (провоки, ленты, рулетки). В любом случае, учитывая, что на точность измерения расстояния наибольшее влияние оказывает ошибка из-за неточного знания длины мерного прибора, для повышения точности измерения следует производить одним уложением мерного прибора. Для этого часто прибегают к изготовлению специальных мерных приборов для каждого измеряемого расстояния. Длины мерных приборов должны быть тщательно определены эталонированием на стационарном компараторе, например в МИИГАиК, или на рабочем компараторе непосредственно на объекте измерений.

Разрабатываемые и применяемые в настоящее время мерные жезлы подразделяются по своей конструкции на жезлы с жестким и гибким мерным стержнем, а по способу измерения — на штриховые, концевые и штрихоконцевые.

Штриховой жезл (рис. 21) обычно представляет собой инварный стержень 1 прямоугольного сечения с миллиметровыми стеклянными шкалами на концах. Стержень заключен в защитный кожух 2 и с одной стороны жестко с ним связан. Отсчеты по шкалам, располагаемым под центрами геодезических знаков, берутся при помощи микроскоп-микрометров 3.

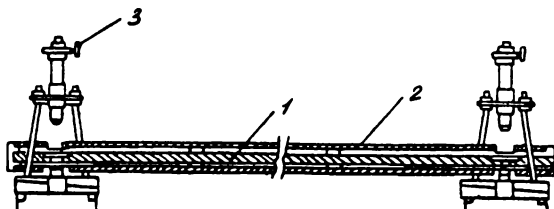


Рис. 21. Штриховой жезл

Концевой мерный жезл может быть, например, изготовлен в виде инварного стержня 1 со сферическими концами, помещенного в корпус 2 (рис. 22). Для отсчитывания служит специальная насадка, представляющая собой индикатор часового типа 3, жестко смонтированная на вкладыше 4. Вкладыш вставляется во втулку геодезического знака, а индикатор плоской ножкой упирается в сферический конец жезла.

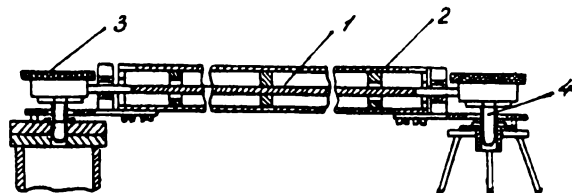


Рис. 22. Концевой мерный жезл

Штрихоконцевой мерный жезл так же снабжен инварным стержнем, на одном конце которого находится стеклянная шкала, а на другом насадка на геодезический знак. Конструкция насадки может быть аналогична изображенной на рис. 22 или представлять собой шарик, жестко связанный со стержнем и предназначенный для скользящей посадки во втулку знака.

В жезлах с гибкой мерной штангой вместо стержня применяют инварную проволоку или ленту. С одной стороны проволока (лента) жестко скреплена с кожухом, с другой — через пружину или другое устройство — для придания ей постоянного натяжения. Конструкция отсчетных устройств зависит от целей и условий использования жезлов и могут быть подобны рассмотренным выше.

Как показал опыт, ошибка измерения длин описанными жезлами длиной 1–4 м не превышает 20 мкм.

В МИИГАиК разработана методика, обеспечивающая измерение длин линий до 50 м подвесными мерными проволоками и лентами с ошибкой, не превышающей 40 мкм. Такая высокая точность достигнута применением специальных мер, уменьшающих влияние ошибок измерений.

Ошибка отсчетов по шкалам зависит от цены деления шкалы и способа отсчитывания. Ошибка отсчета на глаз по шкале с ценой деления τ приблизительно равна

$$m_0 = 0,1\tau.$$

Следовательно, повышение точности отсчитывания может быть достигнуто уменьшением цены деления шкалы. Например, изготавливают шкалы с ценой деления 0,2 мм. Для того чтобы иметь возможность отсчитывать на глаз по такой шкале используют бинокулярный микроскоп, дающий стереоскопическое изображение. При этом ошибка отсчета не превышает 20 мкм.

Независимо от цены деления шкалы точность отсчитывания можно повысить, если измерять интервал между штрихом шкалы и отсчетным индексом при помощи измерительного микроскопа. Для этой цели можно применить, например, отсчетный микроскоп типа МИР-2 и винтовой окулярный микрометр МОВ-1 с ценой деления 5 мкм. Отсчетный микроскоп должен быть снабжен дополнительными устройствами, позволяющими устанавливать его вертикально над центром знака.

При выборе того или иного способа отсчитывания следует иметь в виду, что отсчитывание по микроскоп-микрометру является более трудоемким процессом, чем отсчитывание на глаз. Когда фактор времени производства измерений имеет большое значение, наиболее целесообразным средством повышения точности отсчитывания является уменьшение цены деления шкал мерного прибора.

Уменьшение влияния ошибки делений шкал достигается либо изготовлением специальных высокоточных инварных или стеклянных шкал, либо определением поправок делений и введение их в результаты измерений.

Используемые для высокоточных измерений шкалы всегда должны быть подвергнуты эталонированию, по результатам которого решают, считать ли ошибки делений пренебрегаемо малым или принять их в качестве поправок в отсчеты. В высокоточных разбивочных работах для измерений, а особенно для отложения длин, удобнее пользоваться мерными приборами со шкалами, имеющими незначительные ошибки делений.

При отсчитывании по шкалам возможна ошибка из-за наклона шкал, являющаяся следствием параллакса при наличии зазора между плоскостью штрихов шкалы и отсчетным индексом (центром геодезического знака). Для уменьшения этой ошибки деления на шкалах любого вида должны быть нанесены так, чтобы зазор был возможно меньше. В этом отношении шкалы с делениями, нанесенными на обращенную к центру геодезического знака поверхность, имеют определенное преимущество.

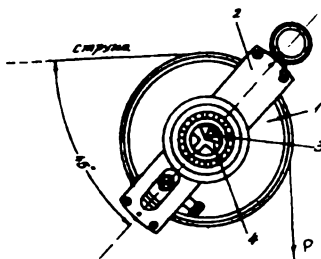


Рис. 23. Ножевой прецизионный блок

Одним из существенных факторов, вызывающих ошибку натяжения

мерного прибора гирями через блочные натяжные устройства, является трение в блоках. В стандартных блоках для натяжения мерных приборов величина трения под нагрузкой 10 кг доходит до 20 г, что может вызвать ошибку измерения проволокой длиной 24 м около 20 мкм.

Для обеспечения постоянства натяжения применяют блоки специальной конструкции. Блок прецизионный ножевой имеет устройство, основанное на принципе маятникового прибора (рис. 23). Шкив 1 блока связан с корпусом 2 посредством двух подшипников, ножа 3 и опоры 4. Один подшипник впрессован наружным кольцом в шкив. На оси вращения внутреннего кольца этого подшипника расположен нож. Другой подшипник впрессован в корпус блока, и на его внутреннем кольце вращается опора или нож. При этом центр тяжести шкива смещен вниз относительно центра вращения опоры примерно на 1 мм. Вследствие этого ось ножа в спокойном состоянии всегда удерживается на оси симметрии блока. Из-за смещения его центра тяжести относительно опоры ножа происходит колебания шкива, подобно маятнику с затухающей амплитудой. Чувствительность блока настолько велика, что при его применении необходимо осуществлять одностороннее натяжение прибора.

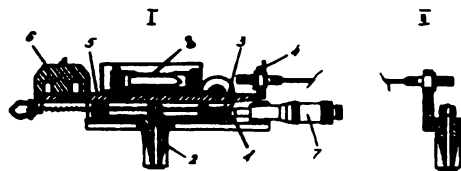


Рис. 24. Высокоточный уровненный динамометр

Натяжение мерного прибора с точностью 0,5 г обеспечивается также прибором ВУД — высокоточным уровненным динамометром, работающим по принципу кругового математического маятника, положение равновесия которого в вертикальной плоскости фиксируется жидкостным уровнем. ВУД состоит из измерительного блока 1, фиксатора 2 и подвешенной между ними инварной проволоки с рамками (рис. 24). Измерительный блок представляет собой направляющие 1, жестко связанные с разжимной цапгой 2, предназначенной для установки блока в цилиндрические втулки геодезических знаков. В направляющих перемещается ползун 3 со стойкой 4, связанной посредством подшипника и ножевой опоры с рычагом 5 и грузом 6. Величина перемещения ползуна в направляющих измеряется микрометренным винтом 7. Индикатором положения рычага в вертикальной плоскости является цилиндрический уровень 8 с ценой деления 30". Груз подбирается таким образом, чтобы проволока в рабочем положении имела натяжение, близкое к 10 кг.

Инварная проволока или лента крепится одним концом к рычагу измерительного блока, другим концом связана с фиксатором, который снабжен разжимной цапгой.

Процесс измерения состоит в следующем. На геодезических знаках, расстояние между которыми измеряется, устанавливают и ориентируют измерительный блок и фиксатор. После подвешивания мерной проволоки микрометренный винт вращают до тех пор, пока пузырек цилиндрического уровня

не установится в нуль-пункте.

Длина горизонтальной линии вычисляется по формуле

$$L = L_0(a - a_0) + \Delta t \quad (24)$$

где L_0 — расстояние между осями разжимных баков при эталонировании прибора;

a — отсчет по микрометричному винту во время измерений;

a_0 — отсчет по микрометричному винту во время эталонирования прибора;

Δt — поправка за температуру.

Аналогичный прибор — «Дистинвар» разработан фирмой «Керн» (Швейцария). В его автоматическом варианте балансирующий рычаг фиксируется в положении равновесия электрическими контактами, а величина перемещения ползуна определяется с помощью потенциометрического датчика перемещений. Измерение прибором может осуществляться дистанционно.

При наблюдениях за деформациями сооружений достаточно сравнивать изменения расстояний между закрепленными на сооружении геодезическими знаками, а поэтому необходимость в эталонировании прибора в этом случае отпадает.

Одним из важных условий обеспечения высокоточных линейных измерений является определение термических коэффициентов индивидуально для каждого мерного прибора, участвующего в измерениях.

Ошибка из-за неточного знания термических коэффициентов тем меньше, чем ближе между собой температуры при эталонировании и при измерении. Поэтому при необходимости создают специальные температурные условия.

Ошибка из-за неточного знания длины мерного прибора зависит от точности эталонирования мерных проволок и изменения длины проволок в процессе измерения. При сохранении прибором своей длины величина ошибки зависит только от точности эталонирования.

Среднюю квадратическую ошибку эталонирования проволок на оптико-механическом компараторе МИИГАиК можно принять равной 12 мкм.

Ошибка из-за неточного знания длины мерного прибора, включающая в себя ошибку эталонирования, являясь сама по себе случайной, влияет на результат измерения как постоянная ошибка. Именно по этой причине точность измерений значительно понижается, если линию измеряют не одним уложением мерного прибора.

Инварным проволокам свойственно изменять свою длину в достаточно больших пределах как постепенно в течение большого промежутка времени, так и скачкообразно. Чтобы надежно следить за сохранением длин мерных приборов, на месте измерений оборудуют рабочий компаратор. В качестве эталона в рабочем компараторе применяют проволоки-эталоны, длины которых определяют на стационарном компараторе. Рабочий компаратор представляет собой фундаментальные столбы с укрепленными на них при помощи юстировочных кронштейнов микроскоп-микрометрами, расстояние между которыми соответствует длинам эталонируемых рабочих проволок и проволок-эталонов. Из опыта установлено, что ошибка эталонирования мерных проволок на рабочих компараторах такого типа, состоящего из двух пролетов, и с определением длин

проволок-эталонов на оптико-механическом компараторе МИИГАиК, не превышает 30мкм. Наибольшая часть этой ошибки — систематическая ошибка из-за неточного знания длины проволок-эталонов.

Из числа современных оптико-электронных геодезических приборов для высокоточных измерений длин линий более 50м возможно применение светодальномера ДК-001, точность измерения которым одним приемом характеризуется ошибкой $(0,8 + 1,5 \cdot 10^{-6} D)$ мм при использовании устройства для принудительного центрирования. Его зарубежным аналогом является Mekomet ME 3000 («Керн», Швейцария).

Для высокоточных измерений коротких расстояний возможно применение интерферометрического метода измерений, но он не получил широкого распространения из-за сложности настройки аппаратуры.

При строительстве прецизионных сооружений для решения задач по наблюдению за осадками и установки технологического оборудования по высоте наиболее широкое распространение получил метод высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами, разработанный в МИИГАиК. Метод позволяет определить взаимное положение по высоте двух точек, расположенных на расстоянии до 10–15м, со средней квадратической ошибкой 0,02–0,05мм. Превышения между точками, удаленными на несколько сот метров, определяются с ошибкой порядка 0,1–0,2мм.

Особенностью метода является ограничение длины визирного луча, что в значительной степени уменьшает ошибки из-за влияния вертикальной рефракции, а также принятие мер ослабления инструментальных ошибок и ошибок, связанных с применением реек.

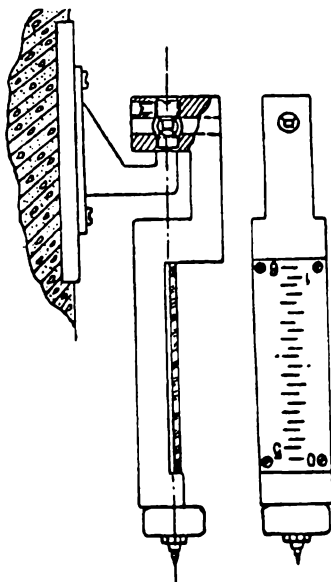


Рис. 25. Малогабаритная рейка М. Е. Пискунова

Основные положения методики высокоточного геометрического нивелирования состоят в следующем:

1. Применение высокоточных уровенных и электронных нивелиров, рекомендуемых для нивелирования I и II классов, и их тщательное исследование и юстировка.

2. Производство нивелирования строго из середины, чтобы исключить влияния ошибки из-за несоблюдения главного условия нивелира и обеспечить четкое изображение задней и передней рейки без перемены фокусировки.

3. Конструкция нивелирных реек должна обеспечивать при нивелировании совпадение оси шкалы и точки установки рейки, что уменьшает ошибку из-за наклона рейки. В малогабаритных рейках конструкции М.Е. Пискунова (см. рис. 25) ось шкалы конструктивно совпадает с точкой установки рейки. В инварных рейках применяется специальный подпятник, центр оградительного кольца которого совпадает с осью делений инварной полосы.

4. Определение поправок штрихов шкал реек путем эталонирования на компараторе и при необходимости введение их в результаты измерений.

5. Взятие отсчетов по барабану плоскопараллельной пластинки нивелира до десятых долей деления. Тщательное определение цены деления барабана на различных его участках с использованием специальной эталонной шкалы или индикатора часового типа, на подвижном штоке которого прикрепляется марка с визирным штрихом.

Для повышения производительности труда и точности геометрического нивелирования при двух горизонтах инструмента применяют прецизионную нивелирную подставку, которая прикрепляется к головке штатива. С ее помощью легко изменять горизонт инструмента и устанавливать ось на горизонт заранее обусловленного штриха рейки. Последнее обычно делают при наблюдениях за осадками сооружений в качестве меры ослабления влияния ошибок штрихов реек на результаты нивелирования. Вместо определения и введения поправок штрихов шкал реек производят визирование на каждой станции в любом цикле наблюдений на заранее обусловленные штрихи реек.

Для высокоточных створных измерений применяют известные способы выверки прямолинейности. В условиях закрытых помещений, как показал опыт, наиболее точным является струнно-оптический способ, схема которого показана на рис. 3а. При незначительных колебаниях калиброванной струны под влиянием движения воздушных масс ошибка установки точки в створе длиной 50 м не превышает 15 мкм.

При строительстве прецизионных сооружений в период пуска налаженных работ, а особенно при эксплуатации, большое значение приобретает автоматизация высокоточных инженерно-геодезических работ. Это связано прежде всего с трудоемкостью, а иногда и невозможностью выполнять геодезические измерения в специфических условиях сооружения. К таким условиям относятся, например, отсутствие в помещении достаточного свободного места для размещения измерительной аппаратуры и непосредственной работы с ней, а также высокая температура, повышенная радиация и зараженность окружающей среды, опасные для здоровья человека. Геодезические способы измерений с использованием средств автоматики и электроники позволяют

производить измерения с дистанционным и непрерывным объемом информации. При этом значительно повышается оперативность, производительность и объективность измерений.

Создан ряд автоматических приборов и измерительных систем, предназначенных для различных геодезических измерений при высокоточной установке технологического оборудования и наблюдениях за стабильностью его положения [3], [5].

Список литературы

1. «Высокоточные геодезические измерения для строительства и монтажа Большого серпуховского ускорителя». Под ред. Н.Н.Лебедева. М., "Недра". 1968. 304с. Авт. В.Д.Большаков, О.И.Горбенко, О.Д.Климов и др.
2. «Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве». Под ред. В.Д.Большакова, М., "Недра", 1976, 335с., Авт. В.Д.Большаков, И.Ю.Васютинский, Е.Б.Клюшин и др.
3. Васютинский И.Ю., Рязанцев Г.Е., Ямбаев Х.К. «Геодезические приборы при строительномонтажных работах». М., "Недра", 1982, 272с.
4. «Геодезические методы исследования деформаций сооружений». М., "Недра", 1991, 272с. Авт. А.К.Зайцев, С.В.Марфенко, Д.Ш.Михелев и др.
5. Загаринный А.В «Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений». М., "Недра", 1976, 247с.

Оглавление

Высокоточные геодезические работы при строительстве и эксплуатации прецизионных сооружений.

1. Прецизионные сооружения и геодезическое обеспечение их строительства.
2. Геодезические наблюдения за устойчивостью оснований прецизионных сооружений.
3. Особенности геодезических работ при высокоточной установке технологического оборудования.
4. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений.