

азимутальные ходы, в которых азимуты должны определяться точностью 0,5'.

В сетях трилатерации, построенных радиодальномерами, обеспеченными измерениями сторон с относительной ошибкой 1:200 000, точность положения пунктов в два раза ниже аналогичной сети триангуляции, в которой углы измерены со средней квадратической ошибкой 0,9", т. е. сети триангуляции 2-го класса [4]. Прокладывая по краям сети трилатерации азимутальные ходы, в которых азимуты измеряются с ошибкой 1,0", можно достигнуть в ней точности положения пунктов не ниже, чем в сети триангуляции 2-го класса, т. к. такой ход повышает точность положения пунктов в три раза.

Как указывалось выше, условные уравнения дирекционных углов смежных сторон представляют собой условия суммы углов между этими сторонами. Поэтому полученные результаты можно распространить также на сети, в которых имеются только исходных дирекционных углов, по одному с одной и другой стороны (например, стороны s_1 и s_{2n-2}) и $2n$ исходных углов (они показаны на рисунках).

Такой подход к проведенным исследованиям открывает еще один, более простой способ повышения точности сетей трилатерации, построенных радиодальномерами. Он заключается в определении на основании астрономических наблюдений дирекционных углов четырех сторон, находящихся в углах сети, и в измерении с точностью 1,0" углов между крайними сторонами. Следовательно, сеть трилатерации создается между двумя радиодальномерными полигонометрическими ходами, каждый из которых опирается на стороны с дирекционными углами, определенными астрономическим путем. Такая сеть по точности не будет уступать аналогичной сети триангуляции 2-го класса.

Данные таблиц, в которых сдвиги определены по средней квадратической ошибке измеренной стороны, равной 1 см, можно рассматривать также, как соотношения сдвигов и средних квадратических ошибок измеренных сторон. Это позволяет определять по таблицам сдвиги пунктов сетей при любой точности измерения сторон.

1. *Заводовский А. В.* Оценка точности линейных триангуляций // Науч. зап. Львов. политехн. ин-та. Сер. геодез. 1959. № 5. С. 3—33. 2. *Костюккая Я. М.* К вопросу оценки точности сплюснутых сетей трилатерации // Геодезия, картография и аэрофотоосъемка. 1967. Вып. 6. С. 25—41. 3. *Костюккая Я. М., Терещинков Ю. В.* О точности сетей трилатерации с исходными дирекционными углами // Геодезия, картография и аэрофотоосъемка. 1982. Вып. 35. С. 57—64. 4. *Судачков С. Г.* Дальнейшее развитие схем и программы построения государственной геодезической сети СССР // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоосъемка. 1960. Вып. 1. С. 17—27. 5. *Arnold K.* Zur Fehlertheorie der Streckenmessender Triangulation. Berlin, 1952.

Статья поступила в редакцию 30.12.85

УДК 528.0.88.2

В. В. МАГЕРА

УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ПЛАНОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ НА МОНТАЖНЫХ ГОРИЗОНТАХ РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Геодезическое обеспечение строительства реакторов атомных электростанций имеет ряд специфических особенностей:

различные требования к точности взаимного положения точек сети на различных стадиях строительства реакторов и монтажа технологического оборудования; совмещение, в большинстве случаев строительства и монтажных работ, что осложняет процессы создания и использования геодезической сети;

сравнительно небольшие расстояния (5...30 м) между точками плановой геодезической сети на монтажных горизонтах, что существенно усложняет выполнение угловых измерений с необходимой точностью.

Вопросы создания такой сети в настоящее время в должной мере не разработаны. Решаются они интуитивными методами на каждой АЭС без соответствующего обоснования. При строительстве любого инженерного многоярусного объекта геодезическая сеть в конечном итоге является пространственной. Однако в общем случае ее точки получают методом последовательного многократного вертикального проектирования без измерений между ними на последующих горизонтах и, как правило, без сохранения после строительства. На атомных электростанциях точки закрепляются на всех ярусах, между точками производятся измерения. Возникает необходимость определения взаимного положения точек, расположенных на нескольких монтажных горизонтах. Кроме того, требования к точности такого определения возрастают по мере перехода от строительства наружной оболочки к монтажу автоматизированного оборудования.

В данном случае используется метод трилатерации с выполнением равноточных измерений линий разной длины. Однако в трилатерации контроль линейных измерений слабый вследствие незначительности допущения измеренных данных. Поэтому возникает необходимость дополнения измерений сторон трилатерации угловыми измерениями, которые здесь будут сильно осложняться рядом специфических особенностей.

Проанализируем точность угловых измерений по коротким сторонам плановой сети. Эта точность в рассматриваемых условиях обуславливается следующими факторами: точностными возможностями прибора; ошибками его центрирования над точкой сети;

ошибками центрирования визирной цели; влиянием внешних условий, которое в рассматриваемых измерениях может быть существенным;

изменением в процессе измерений взаимного положения точек сети вследствие деформации железобетонных перекрытий, в которых они заложены; вибрациями опорных перекрытий вместе с закрепленными в них точками.

Точность построения геодезических разбивочных сетей внутри сооружений приведена в табл. 2 из [6]. Угловые измерения следует выполнять с ошибкой не более $\pm 10''$. Рассмотрим возможность обеспечения такой точности. Для этого проанализируем функциональность выражения отдельных вышеназванных факторов формирования угловых погрешностей и установим их значения. Наиболее существенно могут влиять неточности центрирования теодолита и визирных целей. Так как наведение производится непосредственно на центр знака (тонкую шпильку), то погрешность редукции незначительна. Влияние погрешности центрирования на значение измеряемого угла определяем по формуле [3]

$$m''_u = \rho \frac{m_e}{S_1 \cdot S_2 \cdot V^2} C', \quad (1)$$

где m_e — среднее квадратическое значение линейного элемента центрирования; S_1, S_2 — расстояния от вершины угла до точек визирования; C' — расстояние между концами сторон угла. Обычно значение m_e принимается равным 0,5 мм. В этом случае при $S = C' = 8$ м имеем

$$m''_u = 12,9''.$$

В действительности величина m_e переменная. Она определяется ошибкой визирования оптического центрира прибора m_1 и ошибкой установки оси вращения теодолита в отвесное положение m_2 . Если увеличение центрира $V = 2,5$, цена деления уровня $\tau = 20''$ и высота установки прибора $d = 1,5$ м, то

$$m_1 = d \operatorname{tg} \frac{R}{V} = 0,17 \text{ мм}, \quad (2)$$

где R — разрешающая способность глаза ($R = 60''$). Вертикальная ось оптического прибора может приводиться в отвесное положение с ошибкой в одно деление цилиндрического уровня. Поэтому

$$m_2 = d \operatorname{tg} \tau \approx \frac{\tau}{\rho} = 0,14 \text{ мм}. \quad (3)$$

Суммарное влияние (2) и (3) составляет

$$m_e = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \pm 0,23 \text{ мм}. \quad (4)$$

С учетом этого значения по (1) вычислены ошибки угла в зависимости от длин его сторон. По полученным значениям на рис. 1

построен график. Как видим, для расстояний короче 10 м влияние погрешности центрирования на измеряемый угол больше $7''$. Для его уменьшения при измерениях несколькими приемами выполняются, как правило, 3—4 перенатрирования над точкой. Ошибка визирования зрительной трубой зависит от увеличения расстояния от инструмента до визирной цели, освещенности и др. Мы определяли эту ошибку в условиях, соответствующих строительству реакторного отделения АЭС. Исследования закончились

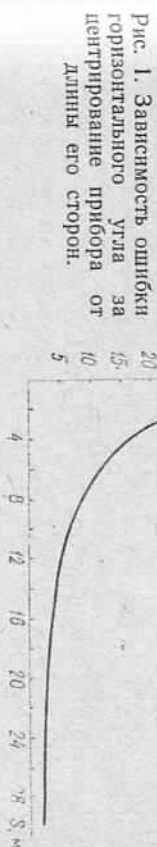


Рис. 1. Зависимость ошибки горизонтального угла за центрирование прибора от длины его сторон.

в многократном наведении биссектора сетки нитей теодолита Theo 010 на цель в виде тонкой шпильки, удаленной от прибора на 8 м. Это расстояние является примерно средним между пунктами опорной сети монтажного горизонта. Наблюдения выполняли при различной освещенности цели путем снятия отсчетов по горизонтальному кругу теодолита. В результате получена суммарная средняя квадратическая погрешность наведения m''_u и отсчитывания m''_0 :

$$m''_0 = m''_u + m''_d. \quad (5)$$

Отсюда

$$m''_u = \sqrt{m''_0^2 - m''_d^2}. \quad (6)$$

С учетом того что погрешность отсчитывания (см. ниже) $m''_0 = \pm 0,5''$, по этой формуле получены следующие значения средней квадратической ошибки наведения: $m''_u = \pm 1,0''$ — при удвоительной освещенности (более 15 лк); $m''_u = \pm 2,0''$ — при плохой освещенности.

Это необходимо учитывать при производстве угловых измерений. Следует набегать недостаточного освещения и его значительного различия по разным направлениям, что отмечено в [4].

Почти все погрешности, вызываемые конструктивными недостатками прибора, попадают в процессе измерений углов при двух положениях зрительной трубы. Исключением является погрешность, вызываемая неперпендикулярностью оси уровня на алидаде горизонтального круга к оси вращения алидады. Ее наличие приводит к наклону оси вращения прибора во время работы и, следовательно, к искажению измеряемого угла, которое определяют формулой [1]

$$(i) = i(\sin A_2 \operatorname{tg} v_2 - \sin A_1 \operatorname{tg} v_1), \quad (7)$$

где i — угол отклонения оси вращения алидады от вертикали; v_1, v_2 — углы наклона визирных лучей, составляющих угол; $A_1,$

A_2 — углы между плоскостями, проходящими через ось вращения и наблюдаемые цели, и отвесной плоскостью, принятой за начальную в процессе измерений.

Если, например, $A_2 = 90^\circ$, $A_1 = 30^\circ$, угол наклона ν , ввиду коротких расстояний, будет не более 16° , $(l) = 0,144$. При цене деления уровня на алидаде горизонтального круга $20''$ (Theo 010) среднюю квадратическую погрешность установки пузырька на (l) составят $\pm 1,4''$. Влияние этой ошибки не компенсируется однократном центрировании прибора. Поэтому рекомендуется при повторении этого процесса между группами отдельных приемов измерения угла приводить к повторным привелениям основной оси теодолита в вертикальное положение, что в некоторой мере придает случайный характер ошибке.

Деления лимба характеризуются случайными и систематическими погрешностями. Систематические погрешности современных теодолитов составляют $0,10 \dots 0,15''$, случайные же могут достигать $1,5''$ [1].

Погрешности отсчитывания по кругу зависят от увеличения отсчетной системы, ее конструкции, качества изображения штрихов и являются суммой погрешности совмещения штрихов и погрешности оценки на глаз долей наименьшего деления шкалы. Из считывания в период измерений установлено, что погрешность от $\pm 0,5''$ для теодолита Theo 010.

Рен оптического микрометра проверяли по общепринятой методике: $r_0 = 0,00''$, $r_n = +0,13''$, поэтому поправки в отсчеты по шкале не вводились.

По исследованиям [2] ошибка, вызванная фокусированием трубы в пределах $5 \dots 30$ м, может достигать $2''$. При двух полуженных вертикального круга систематическая часть ошибки исключается.

Как известно [1], рефракционное поле с погрешностью $10 \dots 15\%$ отожествляется с температурным полем, которое характеризуется температурными градиентами. В условиях строительства АЭС могут возникнуть сильные локальные рефракционные поля со значительными температурными градиентами (прохождение визирных лучей вдоль стен, места сварочных работ). Это вызывает систематические ошибки, которые трудно поддаются учету. Для выяснения поправок в углы за боковую рефракцию использована формула [5]

$$\delta'' = - \frac{10,6 \cdot P \cdot L}{T^2} \nabla t, \quad (8)$$

где P — давление, мм рт. ст.; L — длина визирного луча; T — абсолютная температура, К; ∇t — постоянный (средний) градиент температуры.

При производстве угловых измерений фиксировались следующие характеристики состояния воздуха: температура, влажность,

давление. По всем направлениям определены температурные градиенты. Так как экспериментальные наблюдения проводились в уже закрытом помещении (была возведена купольная часть реакторного отделения), то горизонтальные температурные градиенты не превышали $0,4^\circ/\text{м}$. Принимая $T = 295$ К, $P = 748$ мм рт. ст.; $L = 20$ м, $\nabla t = 0,4^\circ/\text{м}$, получаем

$$\delta'' = -0,7''.$$

На основе вышеизложенного и анализа результатов наших исследований средняя квадратическая погрешность измерения от деления угла без учета центрирования выразится в данных условиях формулой

$$m_{\text{угл}} = \sqrt{2m_n^2 + m_i^2 + m_{\text{вн.уч.}}^2} \quad (9)$$

Подставляя в нее ранее названные конкретные значения, получаем

$$m_{\text{угл}} = \pm 4,6''.$$

Для коротких расстояний порядка $6 \dots 10$ м погрешность центрирования достигает $12''$. Поэтому можно считать, что при трехразовом пересцирировании она составит

$$m_{\text{ц}} = \frac{12''}{\sqrt{3}} = \pm 6,9''.$$

Окончательно средняя квадратическая погрешность измерения углов

$$m = \sqrt{m_{\text{угл}}^2 + m_{\text{ц}}^2} = \pm 8,3''.$$

С целью проверки предыдущих расчетов проведены измерения горизонтальных углов при создании плановой сети на монтажном горизонте. Схема сети показана на рис. 2 с указанием длин линий в метрах. Сеть применяли для приведения осей реактора в проектное положение. Знаки представляют собой защищенные металлические головки с засверленными центрами и надежно забетонированы в перекрытии реакторного отделения.

Обозначение тригонометрических углов	Значение невязки	Обозначение точек	Значение невязки
1.2.3	+11,4"	1.5.6	+22,3"
1.2.4	+23	2.3.4	+8,6
1.2.6	+27,1	2.3.6	-9,1
1.3.4	0,0	2.4.6	+4,0
1.3.5	-32	3.4.5	+15,4
1.3.6	+5,9	3.4.6	+21,8
1.4.5	-2,5	3.5.6	+12,6
1.4.6	+28,4	4.5.6	+5,6

Углы измеряли теодолитом Theo 010 при трех его центрированиях на каждой станции. Трубу прибора наводили непосредственно на Шпильки, установленные на центрах знаков треугольников, которые привели к значениям углов вычислены невязки треугольников, которые приведены в таблице.

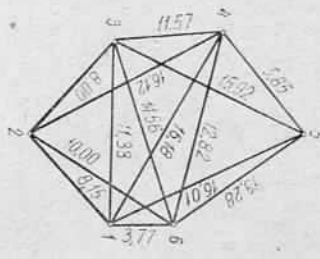


Рис. 2. Схема сети на монтажном горизонте АЭС.

Средняя квадратическая ошибка измеренных углов по формуле Ферреро составила $\pm 8,3''$. Этот результат хорошо согласуется с ранее вычисленным $\pm 8,3''$. Измерения углов выполнялись в условиях выворотных условиях. В период же построения геодезической сети на исходном монтажном горизонте влияние внешней факторов очень сильное.

Результаты работы дают основания полагать, что при угловых измерениях по коротким сторонам нужно учитывать рассмотренные выше факторы. Для уменьшения влияния источников погрешностей в данных условиях необходимо производить низкую установку штатива, производить трех-, четырехразовое переприорование прибора, геололит и визирные цели по возможности располагать примерно в одном горизонте. Следует также учитывать влияние боковой рефракции при горизонтальных температурных градиентах более $0,4^\circ/\text{м}$, использовать дополнительные освещенные визирных целей.

1. *Большаков В. Д., Горбенко О. Н., Капилов О. Д. и др.* Високоточные геодезические измерения для строительства и монтажа Большого серпуховского ускорителя. М., 1968. 2. *Калинов О. Д., Мухомов Ю. В.* О колебании визирной оси трубы теодолита при фокусировании // Тр. МИИГАиК. 1959. Вып. 36. С. 55—62. 3. Методика определения точности измерений при геодезическом контроле осей изолота строительного-монтажных работ. М., 1973. 4. *Полищук Ю. В., Зоболотский Ю. Н.* Об ошибках визирования при инженерно-геодезических работах // Геодезия и картография. 1985. № 1. С. 16—18. 5. *Рабинович Б. Н.* О действии боковой рефракции в триангуляции СССР // Тр. ЦНИИГАиК. 1949. Вып. 62. С. 76. 6. СНиП 3.01.03.84. Геодезические работы в строительстве. М., 1985.

Статья поступила в редакцию 10.02.86

УДК 528.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕФРАКЦИИ СВЕТА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Д. И. МАСЛИЦ

При определении положения объектов, недоступных для установки инструмента, решающее значение на точность измерения вертикальных и горизонтальных углов приобретает учет рефракционных методов. Инструментальный метод пока не вышел из стадии лабораторных разработок. Разработке теории и методов определения рефракции с использованием измеренных метеорологических факторов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [1—3, 5, 11]. Однако при этом должны быть известны среднентермальные значения градиентов метеороэлементов вдоль всей трассы, которые получить практически очень сложно. Принимая средние значения метеороэлементов позволяют установить лишь приближенное значение рефракции.

Предлагаем новый метод определения рефракции с учетом динамики атмосферы и уравнений Эйгера для световой кривой. Некоторые вопросы этого метода изложены в [6, 7, 10]. Состояние динамики атмосферы описано системой дифференциальных уравнений [4, 8]. Так как общее решение данных уравнений очень сложно, то для наших целей ограничим систему этих уравнений. Для однородной подстилающей поверхности в случае постоянного изменения теплопередачи система принимает вид

$$\frac{d}{dz} \left[a(z) \frac{dT}{dz} \right] = A, \rho g + \frac{dp}{dz} = 0, \quad (1)$$

где A — постоянная; a — коэффициент температуропроводности; T, p, ρ — температура, давление и плотность воздуха; g — составляющая ускорения силы тяжести по вертикали; z — высота над подстилающей поверхностью.

Будем считать, что коэффициент турбулентности изменяется по линейному закону [8], т. е.

$$a(z) = a_1 z + a_2, \quad (2)$$

где a_1, a_2 — некоторые коэффициенты, определяемые экспериментально. Решая систему уравнений (1), (2) при начальных условиях

$$T|_{z=0} = T_0, \quad \frac{dT}{dz}|_{z=0} = T_0', \quad P|_{z=0} = P_0, \quad (3)$$

где T_0' — вертикальный температурный градиент, и учитывая уравнение Менделеева-Клапейрона

$$\rho = p\mu/RT, \quad (4)$$

где μ — масса моля; R — газовая постоянная, получаем T и ρ в виде следующих зависимостей:

$$T = \frac{Az}{a_1} + \frac{a_2}{a_1} \left(T_0' - \frac{A}{a_1} \right) \ln \left| \frac{a_1 z + 1}{a_2} \right| + T_0; \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\mu P_0}{RT_0} e^{\frac{\mu g}{RT_0} z} \int \frac{dz}{T}. \quad (6)$$

Показатель преломления воздуха можно получить из формулы Дала-Гладстона

$$n = 1 + c\rho, \quad (7)$$

где c — постоянная, зависящая от длины волны распространяющегося излучения. Подставляя вместо ρ его значение (6), после преобразований получаем

$$n(z) = 1 - \frac{cAR}{a_1 \mu g} + \frac{ca_2}{a_1} (A - T_0' a_1) \nu(z) \int \frac{e^{\frac{\mu g}{RT_0} z}}{a_1 z + a_2} dz + c \left(\frac{P_0 \mu}{RT_0} + \frac{AR}{a_1 \mu g} \right) \nu(z), \quad (8)$$