

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

Геодезическое обеспечение строительства реакторов атомных электростанций имеет ряд специфических особенностей:

создание пространственной геодезической сети последовательным наращиванием точек сети по высоте;

различные требования к точности взаимного положения точек сети на различных стадиях строительства реакторов и монтажа технологического оборудования;

совмещение, в большинстве случаев строительных 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 инициативными 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 сети 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 небольшого числа избыточных 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 возможности 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]

$$m''_{\text{ц}} = \rho \frac{m_e}{S_1 \cdot S_2 \cdot \sqrt{2}} C', \quad (1)$$

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

$$m''_{\text{ц}} = 12,9''.$$

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

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

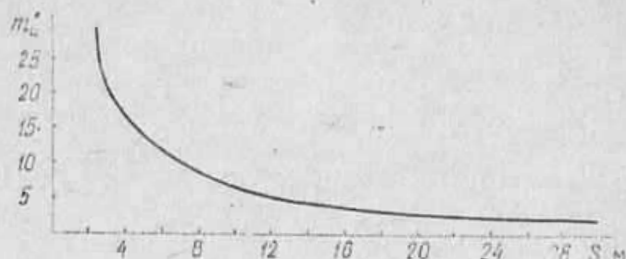
С учетом этого значения по (1) вычислены ошибки угла в зависимости от длин его сторон. По полученным значениям на рис. 1

построен график. Как видим, для расстояний короче 10 м влияющие погрешности центрирования на измеряемый угол больше 7". Для его уменьшения при измерениях несколькими приемами выполняют, как правило, 3—4 пересекания 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 заключались

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_n и отсчитывания m_o :

$$m_c^2 = m_n^2 + m_o^2. \quad (5)$$

Отсюда

$$m_n = \sqrt{m_c^2 - m_o^2}. \quad (6)$$

С учетом того что погрешность отсчитывания (см. ниже) $m_o = \pm 0,5''$, по этой формуле получены следующие значения средней квадратической ошибки наведения:

$m_n = \pm 1,0''$ — при удовлетворительной освещенности (более 15 лк);
 $m_n = \pm 2,0''$ — при плохой освещенности.

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

Почти все погрешности, вызываемые конструктивными недостатками прибора, погашаются 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 γ , ввиду коротких расстояний, будет не более 16° , $(i)=0,144i$. При цене деления уровня на алидаде горизонтального круга $20''$ (Theo 010) среднюю квадратическую погрешность установки пузырька на середину можно считать равной $\pm 10''$. В таком случае погрешность (i) составит $\pm 1,4''$. Влияние этой ошибки не компенсируется при однократном центрировании прибора. Поэтому рекомендуемые повторения этого процесса между группами отдельных приемов измерения угла приводят к повторным приведениям 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 многочисленных совмещений установлено, что погрешность отсчитывания в период измерений при естественном освещении равна $\pm 0,5''$ для теодолита Theo 010.

Рен оптического микрометра проверяли по общепринятой методике: $r_b=0,00''$, $r_n=+0,13''$, 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 положениях вертикального круга систематическая часть ошибки исключается.

Как известно [1], рефракционное поле с погрешностью $10 \dots 15\%$ отождествляется с температурным полем, которое характеризуется температурными градиентами. В условиях строительства АЭС могут возникать 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 вычисления 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 $T=295\text{ К}$, $P=748\text{ мм рт. ст.}$; $L=20\text{ м}$, $\nabla t=0,4^\circ/\text{м}$, получаем

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

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

$$m_{\text{угл}} = \sqrt{2} \sqrt{m_n^2 + m_0^2 + m_i^2 + m_{\text{ф}}^2 + m_{\text{вн. усл.}}^2} \quad (9)$$

Подставляя в нее ранее названные конкретные значения, получаем

$$m_{\text{угл}} = \pm 4,6''.$$

Для коротких расстояний порядка 6...10 м погрешность центрирования достигает $12''$. Поэтому можно считать, что при трехразовом перецентрировании 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.

Углы измеряли теодолитом. Theo 010 при трех его процентированиях на каждой станции. Трубу прибора наводили непосредственно на

шпильки, установленные на центрах знаков. По средним значениям углов вычислены невязки треугольников, которые приведены в таблице.

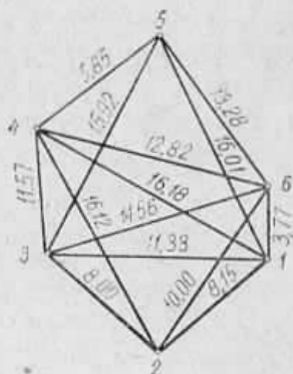


Рис. 2. Схема сети на монтажном горизонте АЭС.

Значения невязок
треугольников сети

Обозначение треугольников	Значение невязки	Обозначение треугольников	Значение невязки
1.2.3	+11,4''	1.5.6	+22,3''
1.2.4	+2,3	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	-3,2	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

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 удовлетворительных условиях. В период же построения геодезической сети на исходном монтажном горизонте влияние внешних 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 перецентрирование прибора, теодолит 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 дополнительное освещение визирных целей.

1. *Большаков В. Д., Горбенко О. И., Климов О. Д. и др.* Высокоточные геодезические измерения для строительства и монтажа Большого серпуховского ускорителя. М., 1968. 2. *Климов О. Д., Мохов 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 производства строительно-монтажных работ. М., 1973. 4. *Полищук Ю. В., Заболотный 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.