

УДК 528.23:528.02/.08

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-78-97

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММ СТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТНЫМ СПОСОБОМ

Георгий Афанасьевич Уставич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: kaf.igmd@ssga.ru

Валерий Геннадьевич Сальников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)932-62-20, e-mail: salnikov@ssga.ru

Виктор Александрович Скрипников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: kaf.igmd@ssga.ru

Надежда Михайловна Рябова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: ryabovanadezhda@mail.ru

Екатерина Леонидовна Соболева

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 630099, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, декан факультета дизайна и искусств, тел. (913)740-13-22, e-mail: e.l.soboleva@mail.ru

Статья посвящена совершенствованию производства створных измерений координатным способом с применением тахеометров. В зависимости от типа инженерного сооружения реализация координатного способа может осуществляться с применением разных программ наблюдений. В статье рассматриваются разные программы и схемы определения нестворностей деформационных марок, установленных на строительных конструкциях сооружений. В результате выполненных исследований установлено, что с применением высокоточных тахеометров средняя квадратическая ошибка определения нестворностей равна 0,5–2,0 мм в зависимости от количества приемов измерений, длины створа и влияния внешних условий. Кроме того, применение координатного способа позволяет контролировать полученные результаты непосредственно в процессе выполнения измерений на объекте. Сделан вывод о том, что координатный способ более производителен, чем способ подвижной марки или способ малых углов.

Ключевые слова: тахеометр, способы створных измерений, программа общего створа, частей створа, последовательных створов, схемы измерений, створные пункты, средняя квадратическая ошибка измерений.

Введение

Для обеспечения строительства инженерных сооружений и монтажа применяемого технологического оборудования, а также обеспечения их деформационного мониторинга применяются соответствующие виды геодезических измерений. К ним относятся различные методы, способы и программы выполнения створных измерений [1–6].

Основными методами створных измерений являются оптические и струнные методы, которые реализуются разными способами и программами наблюдений. Из двух методов наиболее широкое применение получил оптический метод измерений, который реализуется следующими основными способами: прямого оптического визирования, малых углов и подвижной марки. Для реализации каждого способа разработаны соответствующие программы измерений, которые выполняются высокоточными теодолитами [7–10].

С началом применения в геодезическом производстве высокоточных тахеометров, позволяющих измерять расстояния до 1 км со средней квадратической ошибкой (СКО) $m_s = 2,0–3,0$ мм и угла $m_\beta = 1,0''$, появилась возможность разрабатывать и применять новые программы наблюдений, а также совершенствовать уже существующие [11–19].

Рассмотрим способ прямого оптического визирования, реализация которого ранее осуществлялась высокоточными теодолитами (алиниометрами) по основным программам наблюдений, представленным в [1]. В настоящее время способ прямого оптического визирования может быть реализован высокоточными тахеометрами:

- программа общего створа;
- программа частей створа;
- программа последовательных створов;
- программа с дополнительными опорными пунктами.

А. Программа общего створа. При реализации программы общего створа величины нестворностей пунктов $1, 2, 3, \dots, n$ могут определяться высокоточными теодолитами или тахеометрами, а также алиниометрами относительно створа AB (рис. 1).

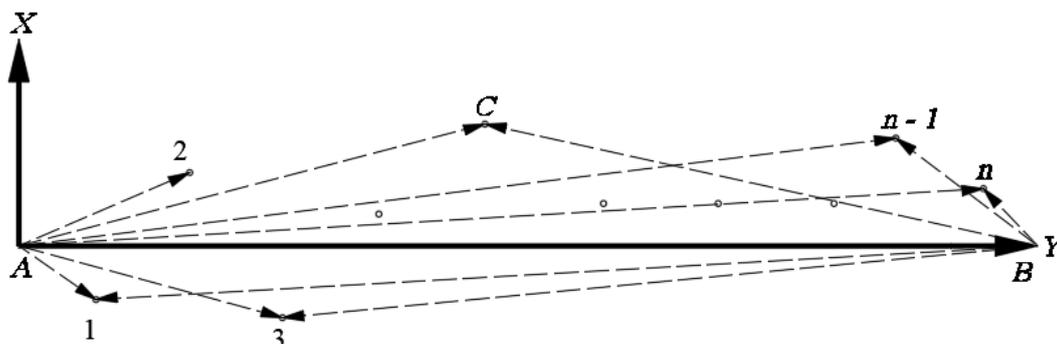


Рис. 1. Определение нестворностей по программе общего створа

В этом случае (см. рис. 1) можно реализовывать две схемы выполнения измерений:

– нестворности точек 1, 2, 3, ..., n створа (створные марки) определяются сквозным визированием с установкой теодолита, тахеометра или алиниометра на пункт A или B ;

– нестворности точек 1, 2, 3, ..., n створа определяются поочередно с пунктов A и B до середины створа, до точки C .

Рассмотрим схемы реализации вышерассмотренных программ общего створа с помощью высокоточных тахеометров координатным способом.

Первая схема. При реализации первой схемы над начальным пунктом A створа устанавливается (или принудительно центрируется) высокоточный тахеометр и при круге лево (КЛ) визируется на конечный пункт B створа. После этого в тахеометре устанавливаются координаты пункта A равными $x_A = 0$ и $y_A = 0$, а в точках 1, 2, 3, ..., n поочередно устанавливается мини-отражатель или закрепляется отражательная пленка. Сквозным визированием на всю длину створа способом координат определяются координаты x_i (нестворность) точек 1, 2, 3, ..., n . Затем эти координаты определяются и при круге право (КП). Эти действия составляют один прием. Для повышения точности измерения рекомендуется выполнить еще раз одним приемом при КЛ и КП.

В основе реализации способа координат лежит способ полярных координат. Тогда величина средней квадратической ошибки (СКО) определения координат x_i точек 1, 2, 3, ..., n створа будет равна

$$m_i^2 = m_S^2 + \frac{m_\beta^2 S^2}{\rho^2} + m_{\text{ц}}^2 + m_{\text{ф}}^2 + m_{\text{вн}}^2, \quad (1)$$

где $m_{\text{ц}}$, $m_{\text{ф}}$ – величины ошибок за центрирование (фиксацию), соответственно, тахеометра и мини-отражателя;

m_S , m_β – величины ошибок измерения, соответственно, расстояния и горизонтального угла;

$m_{\text{вн}}$ – величина ошибки за влияние внешних условий.

Применительно к выполнению створных измерений требуется определение приращений координат (нестворностей) точек 1, 2, 3, ..., n только по оси X , которое определяется ошибкой измерения угла m_β . Поэтому в формуле (1) первое слагаемое m_S не будет оказывать влияния на величину ошибки m_x . Тогда формула (1) примет вид

$$m_i^2 = \frac{m_\beta^2 S^2}{\rho^2} + m_{\text{ц}}^2 + m_{\text{ф}}^2 + m_{\text{вн}}^2. \quad (2)$$

При длине створа, равной, например, 80–100 м, величине ошибок измерения угла $m_{\beta} = 1,0''$, ошибок за центрирование тахеометра и мини-отражателя по 0,5 мм, за влияние внешних условий $m_{\text{вн}} = 0,5$ мм получим для конечной точки n величину ошибки, равную $m_x = 1,4$ мм.

При реализации данной схемы измерений ошибка m_x определения нестворностей будет возрастать по мере удаления точек от тахеометра, и максимальное ее значение будет для точки n конца створа AB .

Для уменьшения ошибок m_x измерения нестворности всех точек створа измерения необходимо выполнить полным приемом еще и в обратном направлении, т. е. выполнить ход обратно.

Данная схема створных измерений может применяться при длине створа 80–100 м. В этом случае ошибка m_x определения нестворности конечной точки створа не будет превышать указанную выше величину.

Вторая схема. Для уменьшения ошибок $m_x = m_n$ конечных точек $n - 2$, $n - 1$ и n створа измерения необходимо выполнить еще из конечного пункта B створа AB (см. рис. 1). Для этого тахеометр устанавливается на пункте B створа и ориентируется на пункт A . После этого в тахеометре устанавливаются координаты пункта B равными $x_B = 0$ и $y_B = S_{AB}$, а в точках 1, 2, 3, ..., n также поочередно устанавливается мини-отражатель или закрепляется отражательная пленка. Сквозным визированием на всю длину створа определяются координаты x_i (нестворность) точек 1, 2, 3, ..., n (мини-отражатель перемещается на себя, начиная с точки 1). Затем эти координаты определяются при КП. Эти действия составляют один прием. Также для повышения точности измерения выполняются вторым приемом.

При выполнении измерений из конечного пункта B ошибки определения координат x_i точек 1, 2, 3, ..., n будут уменьшаться по мере приближения от точки 1 к точке n . За окончательный результат определения координат (нестворностей) точек 1, 2, 3, ..., n створа AB необходимо брать среднее из двух измерений: из начального пункта A и конечного пункта B . В этом случае ошибки m_x определения координат (нестворностей) точек 1, 2, 3, ..., n будут примерно одинаковы.

Третья схема. С целью увеличения длины створа до 150–200 м с сохранением указанной выше точности определение нестворностей всех точек створа необходимо производить с применением третьей схемы измерений. При ее реализации над начальным пунктом A (см. рис. 1) створа AB также устанавливается (или принудительно центрируется) высокоточный тахеометр, при КЛ визируется на конечный пункт B створа. После этого в тахеометре устанавливаются координаты пункта A , равные $x_A = 0$ и $y_A = 0$, а в точках 1, 2, 3, ..., C поочередно устанавливается мини-отражатель. Сквозным визированием на половину AC длины общего створа AB , до точки C , определяются координаты точек 1, 2, 3, ..., C . Затем эти координаты определяются и при КП. Тогда величина СКО определения

нестворностей точек 1, 2, 3, ..., C створа будет такой же, как и при реализации первой схемы измерений. Для получения нестворностей остальных точек створа (второй его половины) тахеометр устанавливается в пункте B створа, ориентируется на пункт A и измерения при КЛ и КП выполняются до точки C .

Самым слабым местом в данной схеме измерений является точка C створа. Однако, в связи с тем, что определение величины x ее нестворности производится с двух пунктов створа двумя приемами, то СКО измерений не будет превосходить величину $m_x = 1,6-1,8$ мм.

В. Программа частей створа. С целью увеличения длины створа AB до 250–300 м с незначительной потерей указанной выше точности определения нестворностей всех точек 1, 2, 3, ..., n весь створ AB разбивается на несколько частей. Несмотря на то, что измерения будут выполняться с разных пунктов створа, определение нестворностей будет производиться в единой системе координат без промежуточных вычислений частных координат точек 1, 2, 3, ..., n отдельных частей AC и CB створа.

Первая схема. При ее реализации общий створ AB разбивается на несколько частей, например, на две части (рис. 2, а) путем выполнения измерений дополнительно с точки C створа, расположенной в средней его части. Для этого по методике, изложенной при реализации третьей схемы в предыдущей программе общего створа, двумя приемами определяются координаты x_c, y_c точки C , которая принимается за третий, дополнительный пункт створа AB . Далее из начального A и конечного B пунктов створа определяются нестворности x_i ближайших к ним точек, например, 1, 2, 3 для пункта A и $n, n-1, n-2$ для пункта B . Тахеометр устанавливается в пункте C , производится ориентирование на начальный пункт A створа (или на B), вводятся координаты x_c, y_c пункта C и полным приемом поочередно (веером) определяются нестворности x_i остальных точек, расположенных в средней части общего створа AB .

Средняя квадратическая ошибка определения координат x_i точек средней части общего створа AB будет включать в себя СКО определения координат x_c, y_c пункта C плюс собственные ошибки определения координат точек средней части створа, вычисленных по формуле (1). Принимая СКО определения координат x_c, y_c пункта C равной $m_c = 1,6-1,8$ мм и ошибку определения координат каждой точки средней части створа равной в среднем 1,5 мм (ближние к C точки створа будут определяться с меньшей ошибкой), получим СКО каждой точки створа не хуже $m_i = 2,2$ мм. Для увеличения точности определения величин x_i нестворностей измерения необходимо выполнить вторым приемом.

Данную схему можно применить и в тех случаях, когда из конечных пунктов A и B створа нет видимости на некоторые определяемые точки его средней части, например, на точки 4, 5, 6, ..., $n-i$ и выполнить измерения можно только из пункта C . В этом случае СКО определения нестворностей x_i точек 4, 5, 6, ..., $n-i$ также будет находиться в пределах 2,2–2,5 мм.

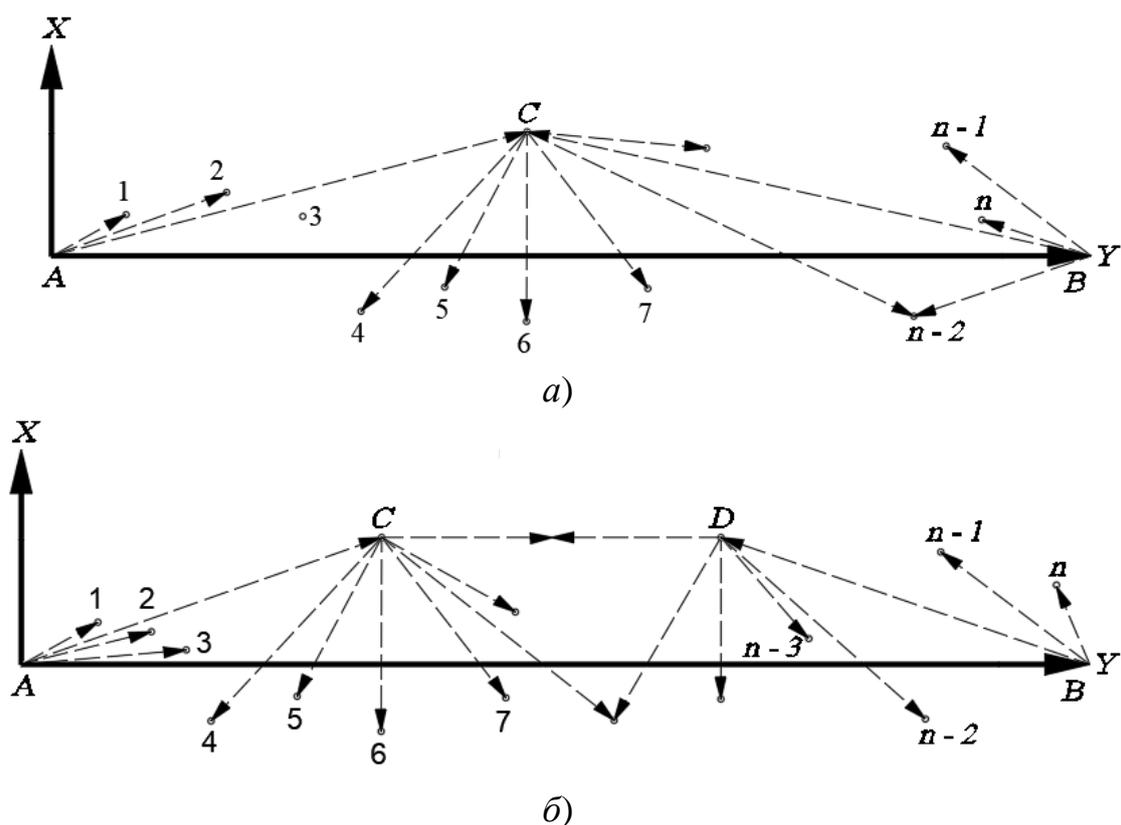


Рис. 2. Определение нестворностей по программе частей створа:
 а) схема створных измерений с одной промежуточной точкой створа;
 б) схема створных измерений с двумя промежуточными точками створа

Таким образом, если длина общего створа AB будет равна, например, 280–300 м, то определения нестворностей x_i точек будет выполняться при длине визирного луча до 70–80 м.

Если длина створа увеличивается до 400–500 м, то створ AB можно разбить на три части (рис. 2, б). В этом случае с пунктов A и B общего створа AB двумя приемами определяются координаты ближайших дополнительных пунктов, соответственно, C и D : x_c, y_c с начального пункта A и x_D, y_D с конечного пункта B . Для контроля определения координат x_c, y_c и x_D, y_D производится взаимное повторное их определение: с пункта C определяется пункт D , а с пункта D пункт C . Разность координат из двух определений не должна превышать 1,5–2,0 мм. В результате этого общий створ AB разбивается на следующие части створа: AC , CD и DB . Затем по рассмотренной выше методике, поочередно с пунктов A , C , D и B определяются нестворности x_i всех 1, 2, 3, ..., n точек створа. При определении нестворностей x_i с дополнительного пункта C ориентирование зрительной трубы производится на начальный пункт A , а с пункта D на пункт B общего створа AB .

Следовательно, если длина общего створа AB будет равна, например, 450–500 м, то определение нестворностей x_i точек 1, 2, 3, ..., n будет выполняться при длине визирного луча до 85–90 м.

Вторая схема. Реализация данной схемы определения нестворностей производится с дополнительным применением обратной линейно-угловой засечки (рис. 3). Сначала из начального A и конечного B пунктов общего створа AB определяются координаты, соответственно, точек 1, 2, 3 и $n-2$, $n-1$ и n . После этого производится определение координат точек средней части створа, например, 4, 5, 6, ..., $n-i$. Для этого из конечных пунктов A и B способом координат определяются координаты x_K и y_K дополнительной точки K , которая не является одной из определяемых точек створа AB и находится вне его. С целью повышения точности определения координат точки K производится решение обратной линейно-угловой засечки не менее чем тремя приемами. При этом за исходные пункты берутся пункты A и B створа (координаты пункта A будут равны $x_A = 0$ и $y_A = 0$, а пункта B – $x_B = 0$ и $y_B = S_{AB}$). После этого из точки K способом координат определяются нестворности точек 4, 5, 6, ..., $n-2$ створа AB .

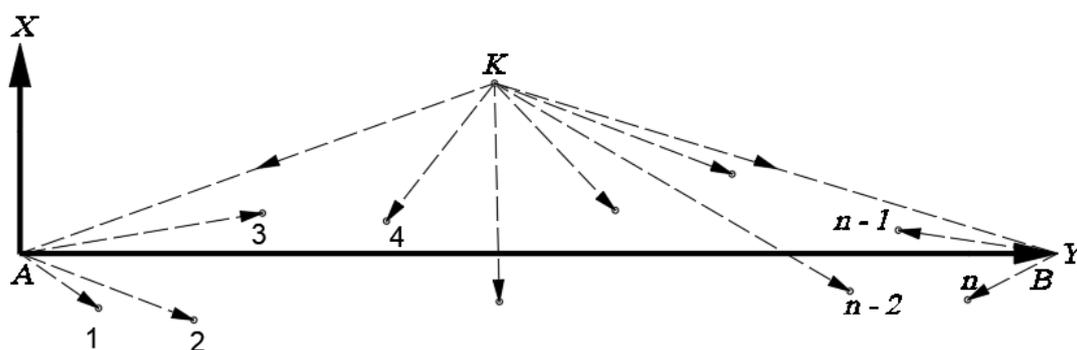


Рис. 3. Определение нестворностей комбинированной схемой измерений

Данная схема определения нестворностей x_i также может применяться в тех случаях, когда из конечных пунктов A и B створа нет видимости на некоторые определяемые точки средней части створа, и выполнить измерения можно только из точки K .

Таким образом, данная схема определения нестворностей x_i является комбинированной: применяется координатный способ и обратная линейно-угловая засечка. Тогда СКО определения нестворностей x_i точек 4, 5, 6, ..., $n-i$ (см. рис. 3) створа AB будет включать в себя СКО определения координат точки K плюс собственные ошибки определения нестворностей точек $n-i$ створа. СКО определения положения точки K координатным способом и обратной линейно-угловой засечкой при длине общего створа AB до 200 м будет равна в среднем 1,8–2,0 мм, а точек 4, 5, 6, ..., $n-i$ относительно точки C – 1,5–1,8 мм. Тогда

суммарная величина СКО определения нестворностей x_i точек 4, 5, 6, ..., $n - i$ будет равна 2,2–2,5 мм.

С. Программа последовательных створов.

Измерения по программе последовательных створов могут выполняться по двум схемам.

Первая схема. При реализации первой схемы измерения выполняются в следующей последовательности. На начальном пункте A общего створа AB (рис. 4, a) устанавливается высокоточный тахеометр, зрительная труба которого ориентируется на конечный пункт B , а в память вводятся координаты $x_A = 0$ и $y_A = 0$. После этого двумя приемами определяются координаты x_1 и y_1 точки 1 створа. Затем тахеометр устанавливается в точке 1, зрительная труба ориентируется на конечный пункт B , в память вводятся координаты x_1 и y_1 и также двумя приемами определяются координаты x_2 и y_2 точки 2. Таким же образом определяются координаты x_i и y_i и остальных точек створа.

Определение координат точки n выполняется с помощью тахеометра с установкой его в точке $n - 1$ и ориентированием зрительной трубы на пункт B . Для контроля определений координат точек по всему створу AB необходимо выполнить измерения еще и из точки n . В этом случае тахеометр устанавливается в точке n , зрительная труба ориентируется на точку $n - 1$, в память вводятся координаты x_n и y_n , после чего наведением трубы на пункт B определяются его координаты, которые должны быть равны (с учетом ошибок измерений) $x_B = 0$ и $y_B = S_{AB}$.

Величина СКО M_i определения координат i точки створа будет равна

$$M_i^2 = m_{i-1}^2 + m_i^2, \quad (3)$$

где m_{i-1} – СКО определения координат предыдущей точки створа (ошибка исходных данных);

m_i – СКО определения координат i точки створа из результатов собственных измерений.

Например, СКО определения координат точки 1 будет складываться из ошибки определения координат начального пункта A створа (здесь будет влиять ошибка центрирования тахеометра на пункте A , т. е. ошибка исходных данных) и ошибки собственно определения ее координат полярной засечкой. При величине ошибки принудительного центрирования, равной 0,2 мм, и ошибки определения координат станции тахеометра, равной $S_{A1} = 20$ м, $m_\beta = 1,0''$ (ошибка за влияние внешних условий равна 0,2 мм), получим $M = 0,30$ мм.

Для точки 2 створа СКО определения координат будет складываться из ошибки определения координат точки 1 створа (ошибка исходных данных) и ошибки определения ее координат способом полярной засечки.

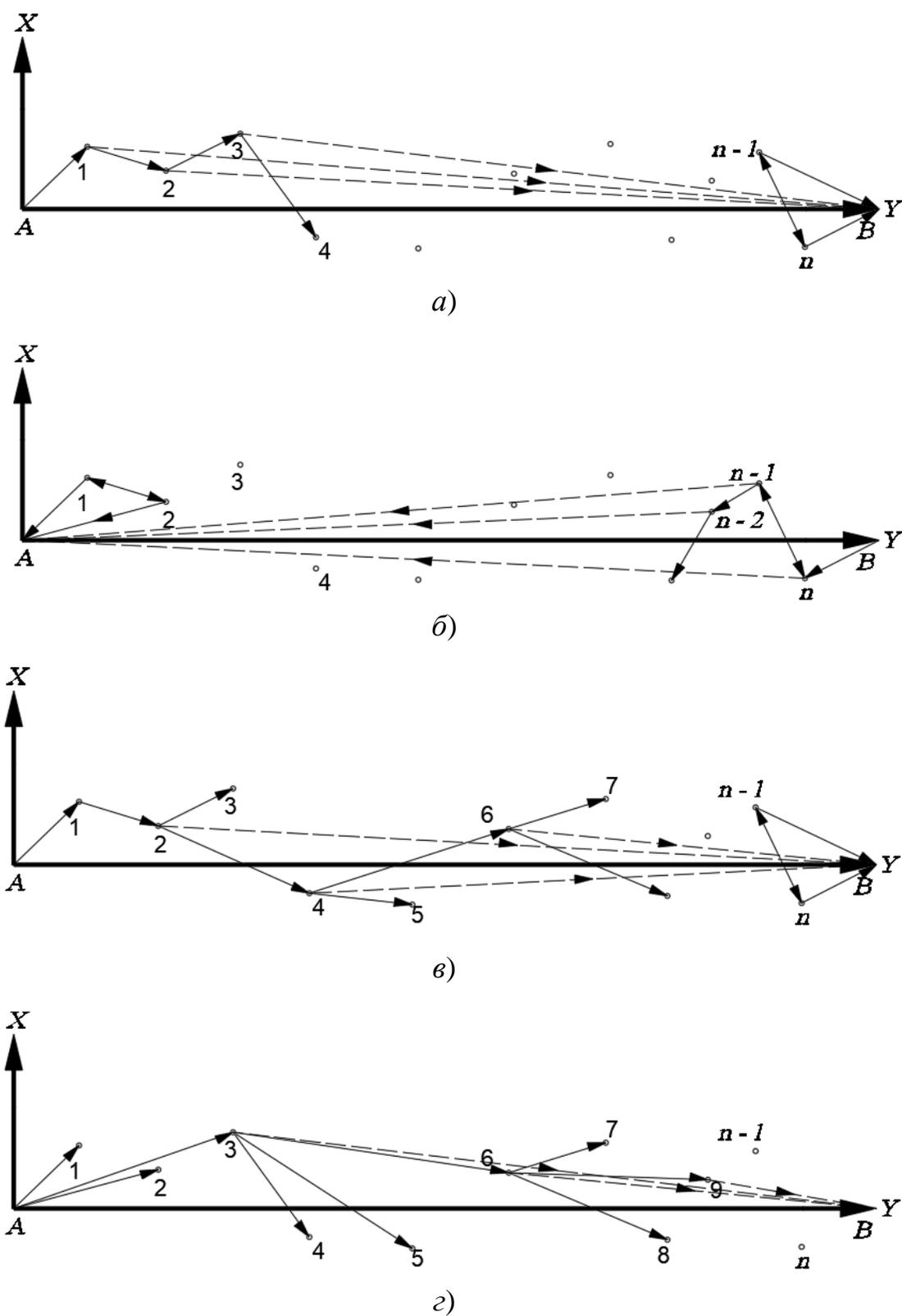


Рис. 4. Определение нестворностей по программе последовательных створов:

- а) определение координат для каждой точки створа с пункта *A*; б) определение координат для каждой точки створа с пункта *B*; в) определение координат двух точек створа; г) определение координат трех точек створа

Если принять, что количество точек створа равно 10, то величина СКО для последней точки при S между точками, равном 20 м, не должна превосходить $m_p = 1,0''$, с учетом ошибки за влияние внешних условий 0,2 мм. В результате получим $M = 1,5$ мм.

С использованием данной схемы измерений определение положения точки n створа будет выполнено с наибольшей ошибкой. Для ее уменьшения измерения необходимо выполнить еще и с пункта B створа (рис. 4, б). В этом случае сначала с пункта B производится определение положения точки n створа. Затем тахеометр устанавливается на точке n створа, труба ориентируется на пункт A и определяются координаты следующей точки $n - 1$ и т. д. За окончательное значение X, Y принимается среднее значение из двух измерений: прямого и обратного. Тогда значение ошибок M_i для всех точек створа уменьшится примерно на 30–40 %.

Вторая схема. При реализации второй схемы выполняется определение координат полярной засечкой сразу двух (рис. 4, в) или трех (рис. 4, г) точек створа.

Так, при определении из пункта A координат сразу двух (рис. 4, в) точек 1, 2 створа тахеометр переносится в точку 2, которая становится переходной, и снова определяются координаты следующих двух точек 3 и 4. Затем тахеометр переносится в точку 4, которая снова становится переходной, и определяются координаты очередных двух точек 5 и 6 и т. д. до завершения измерений на пункте B конца створа AB . В этом случае одни из точек створа определяются как «висячие», а другие входят в состав хода.

Если из пункта A и в последующем будут определяться координаты полярной засечкой сразу трех (рис. 4, в) пунктов, то переходной точкой будет каждая третья из них: 3, 6, 9, ..., n , а остальные будут определены как «висячие».

Для повышения точности определения координат так же, как и при реализации первой схемы, измерения рекомендуется выполнить еще раз с начальной установкой тахеометра на конечном пункте B общего створа, т. е. выполнить ход обратно.

Величина СКО определения координат точек створа будет практически такой же, как при реализации первой схемы, но продвиг работ будет больше, так как тахеометр будет устанавливаться, приводиться в рабочее положение и ориентироваться на пункт B не на каждой точке, а через одну или две.

Д. Программа с дополнительными опорными пунктами.

Кроме рассмотренных программ наблюдений способом прямого оптического визирования, используются измерения с использованием дополнительных опорных пунктов (дополнительного створа). Как известно, необходимость в применении дополнительных опорных пунктов обусловлена тем, что тело плотины, а также берега испытывают большие и циклические нагрузки от напора воды верхнего бьефа, что приводит к смещению опорных пунктов створа AB . Эти дополнительные опорные пункты применяются для определения стабильности начального A и конечного B пунктов створа при определении

деформационного состояния гребня гравитационных и арочных плотин гидроэлектростанций, а также собственно здания ГЭС. При этом также могут определяться и смещения точек 1, 2, 3, ..., n створа. На гребнях гравитационных плотин точки 1, 2, 3, ..., n (створные марки) размещаются по створу (рис. 5), а на арочных – по окружности соответствующего радиуса (рис. 6).

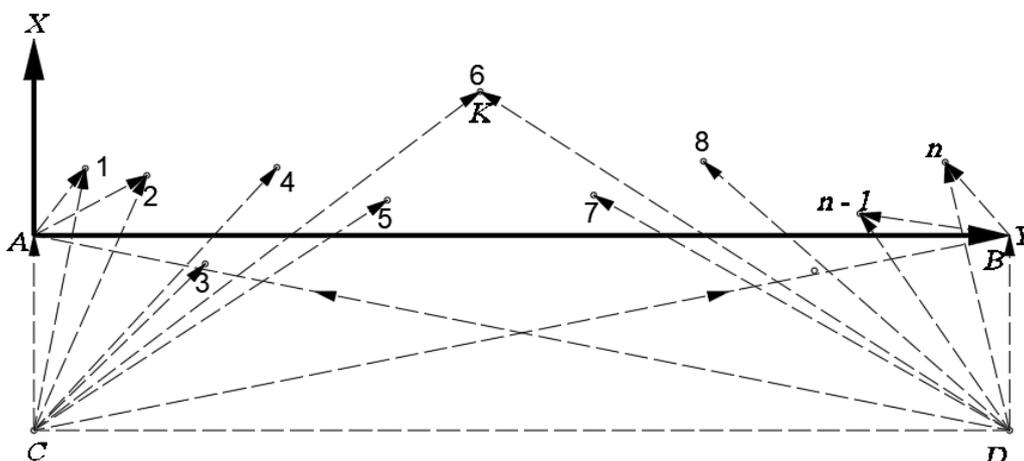


Рис. 5. Определение нестворностей с дополнительными опорными пунктами (точки размещены по створу)

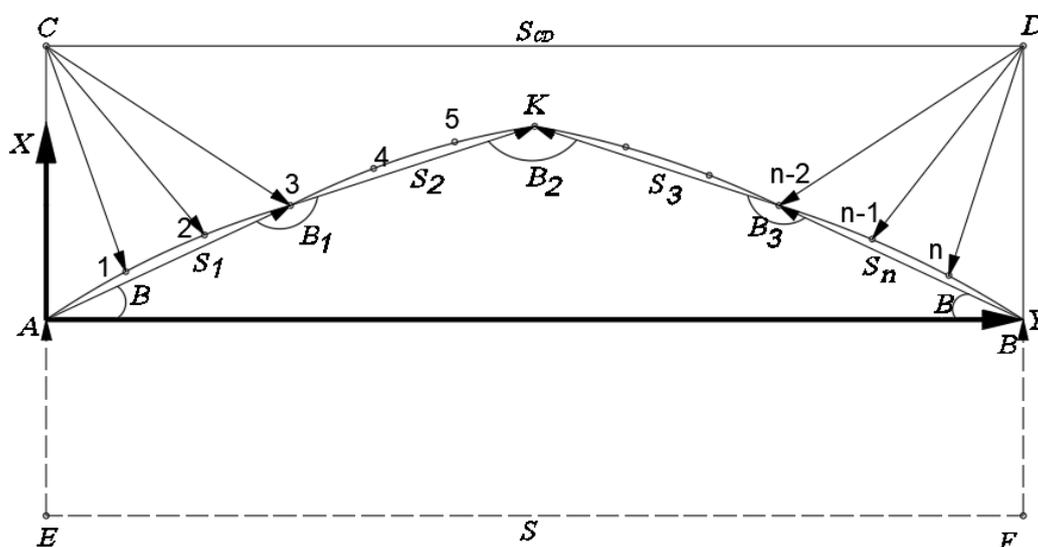


Рис. 6. Определение нестворностей с дополнительными опорными пунктами (точки размещены по окружности)

Первая схема. Она используется для определения деформационного состояния (стабильности) начального A и конечного B пунктов створа AB , а также гребня гравитационных плотин (см. рис. 5). В этом случае примерно параллельно створу AB создается дополнительный створ, начальный C и конечный D

пункты которого закрепляются в скальных породах, не подверженных влиянию напора воды. С этих пунктов высокоточными линейными измерениями или ГНСС-технологиями контролируется положение пунктов A и B створа AB .

При применении линейных измерений с пунктов C и D высокоточными тахеометрами измеряются расстояния AC , DB до контролируемых пунктов створа, а также расстояние CD , величины которых, в зависимости от мощности ГЭС, составляют 0,5–2,0 км. При наличии видимости измеряются также расстояния CB и AD .

Измерения с пунктов C и D на точки 1, 2, 3, ..., n представляют собой способ полярных координат и поэтому при определении СКО измерений необходимо использовать формулу (1). Так, при $m_{\beta} = 1,0''$, $S_{СК} = 500\text{--}600$ м и $m_S = 1,5\text{--}2,0$ мм ошибка за центрирование тахеометра и мини-отражателя $m_{\text{ц}} = m_{\text{ф}} = 0,5$ мм и за влияние внешних условий $m_{\text{вн}} = 0,5$ мм, получаем величину ошибки для середины K гребня плотины, равную $m_{XY} = 3,0\text{--}3,5$ мм.

В связи с тем, что измерения выполняются на границе двух сред («вода – воздух» с непрерывным изменением метеопараметров) и при значительной разности температуры воздуха (+20 ÷ –25 °С), то СКО этих измерений (с учетом летнего и зимнего периодов) может увеличиваться до 3,5–4,0 мм, хотя по внутренней сходимости она будет находиться в пределах 1,5–2,0 мм. Одновременно с пунктов C и D производится контроль стабильности пунктов A и B створа со СКО измерений порядка 1,5–2,5 мм.

Для более детального (локального) определения взаимного деформационного состояния смежных точек 1, 2, 3, ..., n створа AB (с СКО измерений порядка 0,4–0,6 мм) нами рекомендуется применять одну из схем определения нестворностей по программе последовательных створов (см. рис. 5). В этом случае при нестабильном положении начального A и конечного B пунктов створа AB общая картина изменения их положения, а также прогиба гребня плотины будет определяться с пунктов C и D дополнительного створа, а локальная – створными измерениями с использованием пунктов A и B .

Если при выполнении измерений используются ГНСС-технологии, то общая картина деформационного состояния гребня плотины с использованием точек 1, 2, 3, ..., n может определяться с начального A и конечного B пунктов створа AB или с пунктов C и D дополнительного створа с СКО 2,5–3,0 мм. Также для более детального, локального определения взаимного деформационного состояния смежных точек 1, 2, 3, ..., n створа авторами рекомендуется применять одну из схем измерений по программе последовательных створов (см. рис. 5).

Вторая схема. Данная схема используется при определении деформационного состояния гребня арочных плотин (см. рис. 6). При ее реализации измерения могут выполняться с использованием основного створа AB или дополнительных – CD или EF . Так как точки 1, 2, 3, ..., n створа на гребне плотины расположены по окружности, то для детального определения их взаимного деформационного состояния может иметь место отсутствие прямой видимости на них

с использованием створа AB . В этом случае окружность разбивается на несколько частей, например, на четыре (см. рис. 6), и тем самым образуются части общего створа AB , относительно которых способом полярных координат и определяется их взаимное деформационное состояние.

Положение начальных и конечных пунктов частей створа может выполняться следующими способами:

- полярных координат;
- высокоточными линейными измерениями;
- ГНСС-технологиями.

Так, при использовании способа полярных координат положение точки 3 (конечного пункта первого створа $A3$) конца первой части створа определяется не менее чем из трех приемов. При $S = 200$ м, $m_S = 1,0$ мм и $m_\beta = 1,0''$ величина СКО не будет превосходить 0,8–1,0 мм. После этого относительно створа $A3$ определяется положение точек 1 и 2 с СКО 0,4–0,6 мм. Затем тахеометр принудительно центрируется в точке 3, тремя приемами измеряется угол β_1 и расстояние S_2 и определяется положение конечной точки K второй части створа. При величине ошибки положения точки 3, равной 1,0 мм (ошибка исходных данных для пункта K), $S = 200$ м, $m_S = 1,0$ мм и $m_\beta = 1,0''$ величина СКО положения точки K не будет превосходить 1,5–2,0 мм. Аналогично производятся измерения из пункта B до пункта K . Величина СКО среднего значения координат положения точки K из двух определений не будет превышать 2,0 мм. После этого относительно части $3K$ створа определяется положение точек 4 и 5 и т. д.

Выше были рассмотрены программы створных измерений с применением стандартных серийных тахеометров. В настоящее время в геодезическое производство начинают внедряться высокоточные тахеометры с автоматическим наведением на отражатель, установленный на точке, координаты которой необходимо определить. Такие тахеометры могут использоваться при выполнении створных измерений, при данных измерениях имеет ряд следующих преимуществ:

- автоматическое наведение на центр отражателя с СКО не хуже $m_\beta = 1,0''$;
- в случае многократных (повторных) измерений отсутствие необходимости в перефокусировании зрительной трубы при визировании на точки створа, расположенные на разном расстоянии от тахеометра;
- возможность работы в составе автоматизированных систем деформационного мониторинга сооружений и оборудования;
- наличие установленной программы, позволяющей по известным координатам опорных пунктов створа, в режиме реального времени, вычислять расстояние (величину нестворности) от контрольной точки створа до линии створа;
- при наличии видимой в зрительной трубе турбулентности воздуха более высокая точность наведения на отражатель по лучу лазера по сравнению с визуальным наведением.

При реализации технологии геодезического обеспечения строительства ответственных и уникальных инженерных сооружений, а также монтажа технологического оборудования необходимо применять автоматизированное наведение на створные пункты.

Высокая (требуемая) точность измерений достигается минимизацией инструментальных ошибок, а также ошибок, обусловленных влиянием внешних условий. Для минимизации инструментальных ошибок состав комплекта тахеометра с автоматическим наведением на отражатель должен состоять из рекомендованных производителем высокоточных комплектующих: тахеометра, отражателей и подставки с адаптером.

Точность определения величины нестворности координатным способом определяется не только принятой схемой измерений и длиной створа, но и качеством изготовления отражателей и адаптеров. На рис. 7 показана схема взаимного расположения геометрического центра B призмы отражателя, оси B его вращения и центра C адаптера.

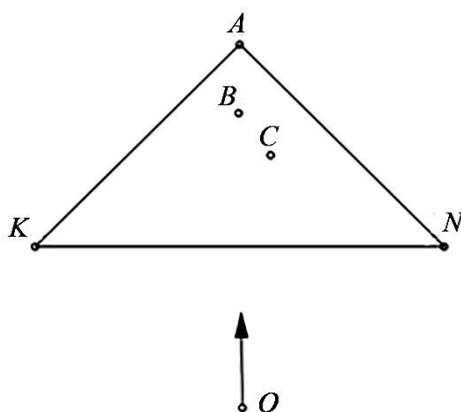


Рис. 7. Схема взаимного расположения геометрического центра призмы отражателя, оси его вращения и центра адаптера:

A – геометрический центр призмы; B – ось вращения отражателя; C – центр адаптера; O – визирная ось тахеометра; KN – плоскость призмы

В общем случае геометрический центр A призмы отражателя, ось B его вращения и центр C адаптера должны совпадать и тогда при повороте призмы отражателя (при створных измерениях плоскость KN призмы должна быть перпендикулярна визирной оси O тахеометра) на некоторый угол измеряемая величина нестворности не будет изменяться. Однако, фактически эти геометрические центры не совпадают и при повороте призмы вокруг оси B или повороте (смещении) всего отражателя относительно центра C адаптера происходит изменение величины измеряемой нестворности. Поэтому при производстве высокоточных створных измерений необходимо выполнить определение (поверку) величин несовпадения указанных центров. Эта проверка производится поворо-

том отражателя на определенный угол относительного направления O визирной оси (светового луча) тахеометра во время выполнения измерений.

Проверка отражателей на наличие несовпадений указанных геометрических центров была выполнена в лабораторных условиях с применением высокоточного тахеометра Leica TCRP 1201. При выполнении проверки на расстоянии 15–20 м от тахеометра на центры с принудительным центрированием устанавливался отражатель на подставку с адаптером, после чего выполнялись измерения расстояния и изменения отсчетов по горизонтальному и вертикальному кругам (было выполнено исследование трех отражателей фирмы Leica Geosystems). При поведении исследований отражатели поочередно устанавливались на адаптер и для каждого из них было выполнено по 16 отсчетов.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что максимальное смещение оптического центра и асимметрия значений отсчетов по кругам относительно исходного положения призмы отражателя (переднее ребро призмы перпендикулярно визирному лучу) наблюдается у отражателя GRZ122. В линейной мере смещение оптического центра призмы равно 1,6 мм при повороте призмы на $\pm 15^\circ$.

Проверка симметричности оптического центра отражателя относительно вертикальной оси адаптера

Тип отражателя	Угол поворота отражателя	Отсчет по горизонтальному кругу (")	СКО измерения (")	Отсчет по вертикальному кругу (")	СКО измерения (")	Расстояние до отражателя (мм)	СКО измерения (мм)
GPR121	0°	0,82	0,35	15,99	0,32	14 252,2	0,12
	+5°	-0,79	0,26	15,93	0,22	14 252,2	0,16
	+10°	-2,8	0,23	16,24	0,27	14 252,1	0,08
	+15°	-5,57	0,24	16,57	0,29	14 252,1	0,11
	-5°	0,29	0,37	16,14	0,35	14 252,2	0,11
GPR121	-10°	0,76	0,18	16,16	0,25	14 252,2	0,10
	-15°	1,50	0,20	15,73	0,37	14 252,3	0,12
GPH1	0°	2,49	0,22	25,18	0,40	14 251,7	0,14
	+5°	0,80	0,36	25,21	0,28	14 251,5	0,12
	+10°	-2,15	0,22	24,93	0,26	14 251,5	0,09
	+15°	-5,66	0,77	24,97	0,56	14 251,6	0,16
	-5°	4,04	0,18	25,14	0,23	14 251,7	0,13
	-10°	5,31	0,22	24,74	0,32	14 251,7	0,21
	-15°	6,54	0,22	23,64	0,56	14 251,8	0,12
GRZ122	0°	10,88	0,44	55,18	0,24	14 251,1	0,09
	+5°	11,09	0,33	55,71	0,32	14 251,0	0,09
	+10°	5,61	0,28	54,49	0,20	14 250,7	0,07
	+15°	1,6	0,28	54,58	0,44	14 250,5	0,10
	-5°	17,69	0,25	56,81	0,62	14 250,9	0,11
	-10°	22,77	0,22	58,41	0,27	14 250,7	0,13
	-15°	26,06	0,5	58,18	0,48	14 250,5	0,09

У отражателей GPR121 и GPH1 смещение оптического центра и асимметрия различаются незначительно. В линейной мере смещение оптического центра этих призм призмы равно 0,5 мм при повороте их на $\pm 15^\circ$. Изменение измеряемой длины линии с применением отражателей GPR121 и GPH1 не превышает 0,2 мм, при паспортной величине СКО измерения расстояния, равной 1,0 мм. Поворот призмы оказывает наименьшее влияние на изменения отсчетов по вертикальному кругу.

Для проверки методики определения отклонений от створа с помощью программы тахеометра Leica TCRP 1201 в закрытом помещении были выполнены измерения при длине створа 76 м. Измерения выполнялись с использованием отражателя GPR121. Разности отклонений от створа трех контрольных точек, полученные при двух положениях тахеометра, изменялись прямо пропорционально расстоянию визирования от 0,2 до 0,4 мм. Полученные результаты позволяют сделать вывод о стабильной работе дальномерной и угломерной частей исследуемого тахеометра при автоматическом наведении на отражатель.

Контрольные измерения, выполненные по двум опорным пунктам створа, показали, что отклонения опорных пунктов от первоначального положения относительно линии створа не превысили 0,2 мм.

Рассмотренную последовательность действий при проверке комплекта тахеометра можно взять за основу при выборе методики измерений для производства высокоточных створных измерений при монтаже технологического оборудования.

Выводы

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- координатный способ высокоточных створных измерений может быть реализован с применением разных программ и схем наблюдений;
- величина СКО измерений при благоприятных внешних условиях находится в пределах 0,2–0,3 мм, в зависимости от расстояний (не более 100 м) до определяемых точек (отражателей) створа;
- при значительных длинах створов можно применять комбинированные схемы измерений с сохранением требуемой точности;
- с целью исключения ошибок за несовпадение оси вращения отражателя, а также центров призмы и отражателя при выполнении высокоточных створных измерений необходимо применять только один отражатель с обязательной предварительной его поверкой;
- при выполнении измерений необходимо устанавливать переднюю грань призмы отражателя перпендикулярно визирному лучу зрительной трубы тахеометра;
- применение тахеометра с автоматическим наведением на отражатель позволяет значительно уменьшить ошибку за взятие отчета наблюдателем, что способствует увеличению точности створных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ямбаев Х. К. Высокоточные створные измерения. – М. : Недра, 1986. – 264 с.
2. Карпик А. П., Стефаненко Н. И. Оценка состояния Саяно-Шушенской плотины в период нормальной эксплуатации по данным геодезических измерений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 5. – С. 3–10.
3. Скрипникова М. А. Возможности применения автоматизированных высокоточных электронных тахеометров при измерении деформаций инженерных сооружений // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 1. – С. 131–134.
4. Сальников В. Г. Совершенствование методики выполнения измерений по программе общего створа // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 67–75.
5. Rechitskii V. I., Pudov K. O. Refined model of the concrete dam at the Boguchanskaya HPP based on field observations // Power Technology and Engineering. – 2014. – Vol. 47. – No. 6. – P. 393–399.
6. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
7. ГОСТ Р 55260.1.9-2013. Гидроэлектростанции. Ч. 1–9. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности при эксплуатации: нац. стандарт РФ. – Введ. 01.07.2015. – М. : Стандартиформ, 2014. – 30 с.
8. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84 : СП 126.13330.2012. – М. : Минрегион России, 2012. – 84 с.
9. Studies on the static and dynamic behaviour of the Sayano-Shushenskaya arch gravity dam / A. I. Savich, V. I. Bronshtein, M. E. Groshev, E. G. Gaziev, M. M. Lliyn, V. I. Rechitski, V. V. Rechifski // International Journal on Hydropower and Dams. – 2013. – Vol. 20, No. 6. – P. 53–58.
10. Горяинов И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.
11. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС / В. Г. Сальников, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, Т. А. Хлебникова // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 108–124.
12. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.
13. РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. – М. : Российское акционерное общество энергетики и электрификации «Единая энергетическая система России» (РАО «ЕЭС России»), 2001. – 24 с.
14. Руководство по эксплуатации V.5.5 Leica TPS1200+. – Heerbrugg, Switzerland, Leica Geosystems AG, 2005. – 215 с.
15. Gutov S. S., Li. V. T. Automated Satellite System for Strain Monitoring at the SayanoShushenskaya Hydroelectric Power Plant. Practical Experience in its Introduction // Power Technology and Engineering. – 2015. – Vol. 49, No. 4. – P. 252–257.
16. Малик Т. Н. Бурачек В. Г., Брик Я. П. Метод автоматизированного геодезического сплошного контроля деформаций инженерных сооружений // Технические науки и технологии. – 2016. – № 1 (3). – С. 145–152.
17. Cranenbroeck J. State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant // FIG Working Week 2011 Bridging the Gap between Cultures. – Marrakech, Morocco, 2011.

18. Геодезический контроль за сооружениями Братской ГЭС / Н. А. Лебедев, С. В. Орлов, А. Ф. Шерстнев, А. В. Дудин, А. А. Карлсон // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 1. – С. 9–20.

19. Некоторые направления развития и объекты использования методов высокоточной прикладной геодезии / И. Ю. Васютинский, В. В. Ознамец, С. П. Буюкян., А. А. Жидков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – № 6. – С. 40–44.

Получено 23.03.2020

© Г. А. Уставич, В. Г. Сальников, В. А. Скрипников,
Н. М. Рябова, Е. Л. Соболева, 2020

IMPROVEMENT OF ALIGNMENT MEASUREMENT PROGRAMS BY COORDINATE METHOD

Georgij A. Ustavich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: kaf.igmd@ssga.ru

Valerij G. Sal'nikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)932-62-20, e-mail: salnikov@ssga.ru

Viktor A. Skripnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: kaf.igmd@ssga.ru

Nadezhda M. Rjabova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: ryabovanadezhda@mail.ru

Ekaterina L. Soboleva

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mining, Dean of Design and Art Faculty, phone: (913)740-13-22, e-mail: e.l.soboleva@mail.ru

The article is devoted to the improvement of alignment measurements performance with the help of the coordinate method and using total stations. Depending on the type of engineering construction the implements bion of the coordinate method can be carried out with the application of different observation programs. The article considers different programs and schemes of misalignment determination of deformation marks, positioned on buildings. In the result of carried out survey it is stated that with the application of high-accuracy total stations the mean square error of misalignment determination is equal to 0,5–2,0 mm depending on the quantity of measurement ways, alignment length and the impact of outside conditions. Besides, the application of coordinate method allows controlling the obtained results during the process of measurement performance on the object. The article makes the conclusion that the coordinate method is more efficient than the method of travelling mark or the method of small angles.

Key words: total station, methods for alignment measurement, program of overall alignment, parts of alignment, consequent alignments, measurement schemes, alignment points, mean square error of measurements.

REFERENCE

1. Jambaev, H. K. (1986). *Vysokotochnye stvornye izmerenija [High-accuracy measurements]*. Moscow: Nedra Publ., 264 p. [in Russian].
2. Karpik, A. P., & Stefanenko, N. I. (2009). Evaluation of Sajano-Shushenskaja dam condition in the period of normal operation using geodetic measurement data. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 3–10 [in Russian].
3. Skripnikova, M. A. (2010). Application of automated high-precision total stations in measuring deformations of engineering structures. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 1, Part 1]* (pp. 131–134). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
4. Sal'nikov, V. G. (2019). Improving the measurement method on the overall alignment program. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 67–75 [in Russian].
5. Rechitskii, V. I., & Pudov, K. O. (2014). Refined model of the concrete dam at the Boguchanskaya HPP based on field observations. *Power Technology and Engineering*, 47(6), 393–399.
6. Code of Practice SP 47.13330.2012. Engineering site investigation for constructions. Basic statements. Revised edition SNiP 11-02-96. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
7. Standarts Russian Federation. (2014). GOST R 55260.1.9-2013. Hydraulic structures. Safety requirements for exploitation: national standard. Moscow: Standartinform Publ., 30 p. [in Russian].
8. Code of Practice SP 126.13330.2012. (2012). Geodetic works in construction. Updated edition of Construction Normatives and Rules SNiP 3.01.03-84. Moscow: Minregion Rossii Publ., 84 p. [in Russian].
9. Savich, A. I., Bronshtein, V. I., Groshev, M. E., Gaziev, E. G., Lliyn, M. M., Rechitski, V. I., & Rechifski, V. V. (2013). Studies on the static and dynamic behaviour of the Sayano-SHusnenskaya arch gravity dam. *International Journal on Hydropower and Dams*, 20(6), 53–58 [in Russian].
10. Gorjainov, I. V. (2018). Experimental research of linear-angular back-sight application for stability evaluation of horizontal geodetic control network points. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 28–39 [in Russian].
11. Sal'nikov, V. G., Skripnikov, V. A., Skripnikova, M. A., & Hlebnikova, T. A. (2018). Use of modern automated geodetic devices for monitoring hydrotechnical constructions of hydro power stations. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 108–124 [in Russian].
12. Sholomickij, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High-accuracy geodetic measurements in deformation monitoring of Aquapark. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].
13. Detailed Design Documentation RD 153-34.2-21.342-00 (2001). Method for determination of safety requirements for hydraulic structures. Moscow: Russian Joint-Stock Company of Energy and Electrification "Unified Energy System of Russia" (RAO "UES of Russia"), 24 p. [in Russian].
14. *Rukovodstvo po jekspluatacii [User manual] V.5.5 Leica TPS1200+*. (2005). Heerbrugg, Switzerland, Leica Geosystems AG, 215 p. [in Russian].

15. Gutov, S. S., & Li, V. T. (2015). Automated Satellite System for Strain Monitoring at the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant. Practical Experience in its Introduction. *Power Technology and Engineering*, 49(4), 252–257.
16. Malik, T. N., Burachek, V. G., & Brik, Ja. P. (2016). Method of full automated geodetic control of engineering structures' deformations. *Tehnicheskie nauki i tehnologii [Engineering Science and Technology]*, 1(3), 145–152 [in Russian].
17. Cranenbroeck, J. (2011). *State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant*. FIG Working Week 2011 Bridging the Gap between Cultures. Marrakech, Morocco.
18. Lebedev, N. A., Orlov, S. V., Sherstnev, A. F., Dudin, A. V., Karlson, A. A. (2005). Geodetic control of Bratskaja HPP structures. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, 1, 9–20 [in Russian].
19. Vasjutinskij, I. Ju., Oznamec, V. V., Bujukjan, S. P., & Zhidkov, A. A. (2019). Some tendencies of development and objects for methods of high-accuracy applied geodesy. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya vuzov. Geodezy and Aerophotography]*, 6, 40–44 [in Russian].

Received 23.03.2020

© G. A. Ustavich, V. G. Sal'nikov, V. A. Skripnikov,
N. M. Rjabova, E. L. Soboleva, 2020