

А. С. Горилько¹✉, Н. М. Рябова¹, А. Р. Якушева¹

Выполнение высокоточного полигонометрического хода короткими лучами для создания планового обоснования на техногенном геодинамическом полигоне

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: cahek28@mail.ru

Аннотация. В данной статье выполнен обзор и анализ применения традиционных методов геодезических измерений для определения горизонтальных смещений на техногенных геодинамических полигонах. Известно, что наиболее часто используется метод статических спутниковых определений. Данный метод достаточно хорошо зарекомендовал себя в части определения плановых координат рабочих пунктов на исследуемых территориях. Однако не во всех случаях спутниковый метод может быть применен. Прежде всего это связано с отсутствием условий для качественных наблюдений. При появлении в геодезическом производстве высокоточных тахеометров с более точной светодальномерной частью для решения ряда научно-производственных задач предлагается создавать плановое обоснование методом высокоточной полигонометрии короткими лучами. Выполнен предрасчет точности с учетом ошибок, возникающих при горизонтировании визирных целей. Результаты предрасчета показали что современными роботизированными тахеометрами можно выполнить ход полигонометрии в прямом и обратном направлении со средней квадратической ошибкой в слабом месте от 1,0 до 4,0 мм, в зависимости от числа сторон и длины хода.

Ключевые слова: техногенный геодинамический полигон, горизонтирование, отражательная призма, высокоточный тахеометр, полигонометрический ход короткими лучами

A. S. Gorilko¹✉, N. M. Ryabova¹, A. R. Yakusheva¹

Performing high-precision polygonometric running with short beams to create a planning justification at a man-made geodynamic landfill

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: cahek28@mail.ru

Abstract. This article provides an overview and analysis of the application of traditional geodetic measurement methods to determine horizontal displacements at man-made geodynamic polygons. It is known that the method of static satellite definitions is most often used. This method has proven itself quite well in terms of determining the planned coordinates of work sites in the studied territories. However, the satellite method cannot be applied in all cases. First of all, this is due to the lack of conditions for qualitative observations. When high-precision total stations with a more accurate light-measuring part appear in geodetic production, it is proposed to create a planning justification using high-precision short-beam polygonometry to solve a number of scientific and production tasks. The accuracy was calculated taking into account the errors that occur during the horizontal alignment of sighting targets. The results of the preliminary calculation showed that modern robotic total stations can perform polygonometry in the forward and reverse directions with an average square error in the weak spot from 1.0 to 4.0 mm, depending on the number of sides and the length of the stroke.

Keywords: technogenic geodynamic polygon, levelling, reflective prism, high-precision total station, polygonometric short ray traverse

Введение

В настоящее время во многих странах мира активно развивается атомная энергетика. Это обусловлено энергетической независимостью, стабильностью цен на электроэнергию, компактностью размещения атомных электростанций (АЭС) и другими причинами [1].

В России атомная энергетика по сравнению с другими странами развивается наиболее стремительно. По данным 2024 года, доля российской атомной энергетики в мировом масштабе составляет 18,4 %, а доля России по реализации новых проектов в сфере строительства новых АЭС в разных странах – 80 % [1].

Одним из перспективных направлений является строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. При этом топливом для АЭС с таким типом реакторов будет являться высокорadioактивное ядерное топливо. После его переработки получается вторичное топливо, которое сжигается в реакторе [1]. Так как в специальных инженерных сооружениях будет перерабатываться высокообогащенное ядерное топливо, то требования к точности, цикличности и безопасности геодезических работ повышаются.

Для своевременного выявления горизонтальных и вертикальных смещений на промышленных площадках строительства объектов атомной промышленности и других технически сложных и особо опасных инженерных сооружений создаются техногенные геодинамические полигоны (ТГП). На ТГП размещаются пункты с принудительным центрированием, что дает возможность создания высокоточной геодезической сети, исключая ошибки за центрировку и редукцию.

Вертикальные смещения на ТГП измеряются как правило методом геометрического нивелирования I класса. Горизонтальные смещения измеряются с применением спутниковых технологий и высокоточными линейно-угловыми измерениями [2].

Появление электронных тахеометров с улучшенными техническими характеристиками способствует совершенствованию методов линейно-угловых измерений [3].

В данной статье приводится обзор и анализ применения высокоточных роботизированных тахеометров для создания высокоточного планового обоснования на территории ТГП объектов атомной энергетики. Предлагается к применению принципиальная новая схема линейно-угловых измерений – высокоточная полигонометрия короткими визирными лучами.

Методы и материалы

Выше было указано, что появление электронных тахеометров с улучшенными техническими характеристиками способствует совершенствованию методов линейно-угловых измерений. Прежде чем анализировать точность указанных приборов, рассмотрим требования нормативно-технических документов по

определению горизонтальных и вертикальных смещений зданий и сооружений, размещенных на промышленных площадках АЭС.

В табл. 1 приводятся нормы точности определения горизонтальных и вертикальных смещений [4].

Таблица 1

Требования к точности определения вертикальных и горизонтальных перемещений

Объект исследования	Допустимая погрешность измерения смещений, мм	
	вертикальных	горизонтальных
Рабочие пункты техногенного геодинамического полигона, строящейся или эксплуатируемой АЭС	1,0	5,0
Деформационные марки, размещенные на несущих конструкциях технически сложных и особо опасных инженерных сооружений	1,0	2,0
Деформационные марки на земляных сооружениях	10,0	15,0

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что особые требования предъявляются к контролю положения в плане и по высоте земной поверхности площадки строительства АЭС (рабочие пункты ТПП) и несущих конструкций технически сложных и особо опасных инженерных сооружений (размещенные на них деформационные марки).

Работа АЭС с реакторами на быстрых нейтронах может подразумевать реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Это означает, что на площадке строящейся или эксплуатируемой АЭС должны размещаться следующие инженерные сооружения (модули):

- машинный зал;
- модуль временного хранения среднеактивных и низкоактивных отходов;
- модуль переработки высокоактивных и низкоактивных отходов;
- модуль переработки отработанного ядерного топлива;
- модуль хранения высокоактивных отходов;
- модуль хранения отработанного ядерного топлива;
- модуль фабрикации и рефабрикации топлива [1].

Перечисленные выше инженерные сооружения относятся к 1 и 2 классу ответственности за ядерную и радиационную безопасность, а также сейсмостойкость.

Контроль вертикальных смещений для указанных сооружений выполняется методом геометрического нивелирования I класса. Контроль горизонтальных смещений, как уже указывалось, определяется спутниковыми и традиционными (линейно-угловыми) методами измерений.

В настоящее время производители геодезического оборудования предлагают к эксплуатации роботизированные тахеометры с техническими характеристиками: $m_{\beta} = 1,0''$ $m_s = 0,5 - 2,0$ мм [3].

Несмотря на высокую стоимость таких приборов, актуальность их эксплуатации на объектах атомной энергетики только возрастает.

Одной из основных задач деформационного мониторинга объектов атомной энергетики является построение опорной геодезической сети пунктов с принудительным центрированием. При использовании высокоточных тахеометров принимаются во внимание различные схемы линейно-угловых построений. Поскольку на промышленных площадках АЭС важно определять координаты всех рабочих пунктов с принудительным центрированием, то целесообразно рассмотреть единую геометрическую схему, например, замкнутый ход полигонометрии.

На точность измерений при выполнении хода полигонометрии влияют ошибки, обусловленные внешними условиями, точностью применяемого прибора, подвижностью пунктов и некоторыми другими факторами.

Фактор подвижности пунктов на промышленных площадках АЭС сводится к минимуму поскольку они заложены ниже границы сжимаемой толщи. Схема измерений на станции при выполнении полигонометрического хода по пунктам с принудительным центрированием представлена на рис. 1.

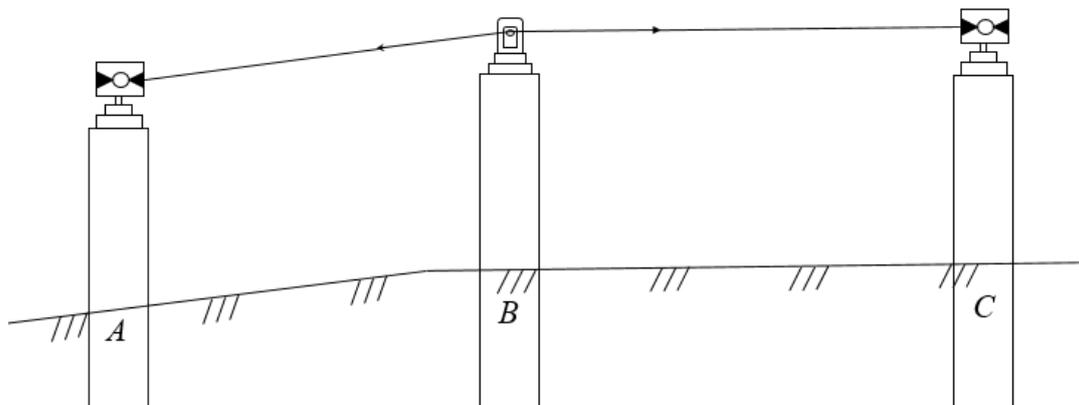


Рис.1. Схема измерений на станции при выполнении полигонометрического хода по пунктам с принудительным центрированием

При осуществлении такой схемы, как представлено на рис.1, отражательные призмы с маркой закреплены на адаптере с трегером. Точность установки системы «трегер-адаптер» в горизонтальной плоскости зависит от точности установки встроенного уровня. Уровни могут быть круглые и цилиндрические. Точность круглого уровня варьируется от 6' до 8', соответственно, а точность цилиндрического уровня достигает до 1'. Графическая интерпретация ошибки горизонтирования из-за неточности установки уровней представлена на рис.2.

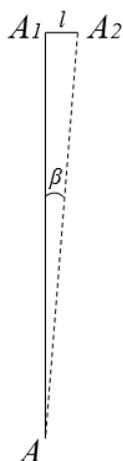


Рис.2. Графическая интерпретация ошибки горизонтирования из-за неточности установки уровней

Результаты

На рис.2 представлено, что из-за неточности установки уровня образуется угол β между вертикальной (отвесной) линией AA_1 и линией AA_2 , проходящей через центр системы «трегер-адаптер». Величина l является линейным сдвигом от центра пункта в данном случае. Это означает, что от точности горизонтирования зависит точность определения плановых координат.

Рассчитаем величину l при использовании круглого и цилиндрического уровней для наихудшего случая по формуле [5]

$$l = \frac{\beta'' \cdot S}{206265''} \quad (1)$$

где β'' - величина угла, образованного из-за неточности установки уровня,

S – высота установки системы «трегер-адаптер-отражательная призма с маркой», $\rho = 206265''$ - число секунд в одном радиане.

Высота системы «трегер-адаптер-отражательная призма с маркой» в зависимости от модели адаптера может иметь разные значения. При использовании разных моделей адаптеров, высота S может варьироваться от 200 до 300 мм.

Результаты расчетов по представленной выше формуле представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчетов величины линейного сдвига

Высота S установки системы «трегер-адаптер-отражательная призма с маркой», мм	Величина l , в мм	
	При круглом уровне (наихудший случай 480'')	При цилиндрическом уровне (наихудший случай 60'')
200	0,47	0,06
300	0,70	0,09

Анализируя данные в табл.2 следует сделать вывод, что для выполнения высокоточных измерений традиционным способом рекомендуется использовать адаптеры с цилиндрическим уровнем. Следует учесть, что этот расчет выполнен для наихудшего случая, на практике точность горизонтирования может быть выше. Тем не менее наличие ошибки центрирования ограничивает количество станций в ходе. В связи с этим выполним априорную оценку точности измерений при создании планового обоснования методом полигонометрии. Выполним расчет величины средней квадратической ошибки (СКО) m в зависимости от количества станций и длины хода по приближенной формуле [5–6]

$$m = \sqrt{[m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot L^2 \cdot \frac{n+3}{12}} \quad (2)$$

где m_s – СКО измерения расстояния, m_β – СКО измерения угла, ρ – число секунд в одном радиане, L – длина хода, n – количество сторон в ходе.

При выполнении расчетов рассмотрим случай применения высокоточного роботизированного тахеометра с паспортными характеристиками точности: $m_s = 0,5$ мм и $m_\beta = 1''$. Точность измерений рассмотрим при количестве сторон от 1 до 10, при том что измеряемое расстояние в пределах 100 м (короткие визирные лучи).

Результаты расчетов по приближенной формуле приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчетов величины СКО положения пункта в слабом месте полигонометрического хода по приближенной формуле

Количество сторон (n)	Расстояние L , м	СКО (m), мм
1	100,000	0,60
2	200,000	0,80
3	300,000	1,14
4	400,000	1,56
5	500,000	2,04
6	600,000	2,57
7	700,000	3,14
8	800,000	3,75
9	900,000	4,39
10	1000,000	5,07

Обсуждение

Известно, что при увеличении количества сторон и общей длины хода возрастает ошибка положения пункта в слабом месте, что и показали данные в табл. 3. Обращая внимание на данные, представленные табл. 2, учитываем, что на каждой станции из-за ошибки горизонтирования идет потеря точности от 0,06 до 0,09 мм при использовании адаптеров с цилиндрическим уровнем. При количестве сторон равным 10, общая ошибка горизонтирования равна 0,81 мм. Для по-

вышения точности полигонометрического хода необходимо выполнять измерения в прямом и обратном направлении. Обратный ход будет дополнять и контролировать результаты прямого хода. Из теории математической обработки результатов геодезических измерений известно, что при прямом и обратном ходе точность возрастет в 1,4 раза.

Заключение

Учитывая нормативно-технические требования, представленные в табл. 1, видим, что для определения горизонтальных смещений земной поверхности ТГП точность должна быть не хуже 5,0 мм. По данным табл. 3 и учитывая накопление ошибки за горизонтирование, следует сделать вывод, что для контроля горизонтальных смещений на ТГП следует прокладывать ход высокоточной полигонометрии при количестве сторон не более 8 при общей длине хода не более 800 м.

При использовании высокоточной полигонометрии для создания опорной сети в целях контроля деформационного состояния технически сложных и особо опасных инженерных сооружений количество сторон должно быть не более 4 при длине хода не более 400 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальный сайт <https://www.atomic-energy.ru>. Текст : электронный // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0. – <https://www.atomic-energy.ru> (дата обращения 07.05.2025).
2. Сравнение способов создания обоснования на промплощадке / А. С. Горилько, М. А. Минаева, Н. М. Рябова, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. научн. техн. конгр., 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 60–64. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-60-64.
3. Официальный сайт <https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations> Текст: электронный // Научно-деловой портал «Электронные тахеометры. – <https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations> (дата обращения 05.05.2025).
4. СТО СРО-Г6054295400007–2023. Геодезический мониторинг. Наблюдение за осадками и кренами зданий и сооружений. – Москва : Союзатомгео, 2023. – 160 с. – Текст : непосредственный.
5. Справочник геодезиста [Текст] / под ред. В. Д. Большакова. – Москва: «Недра», 1985. – 455 с.
6. Карев П. А., Лесных И. В., Павлова А. И. Геодезия. Проектирование геодезического обоснования для крупномасштабных топографических съемок, землеустроительных и кадастровых работ : метод. указания по выполнению курсовой работы. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 74 с.

© А. С. Горилько, Н. М. Рябова, А. Р. Якушева, 2025