

Геодезический контроль вертикальных деформаций инженерных сооружений на основе комбинации методов геометрического и тригонометрического нивелирования

Д. А. Афонин^{1}, Н. В. Канахин¹*

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

* e-mail: afonin83@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается двухступенчатая схема геодезических построений при определении высот деформационных марок в ходе геодезического контроля вертикальных деформаций инженерных сооружений в случае, когда деформационные марки закреплены как центром для установки нивелирной рейки, так и пленочными отражателями. В первой ступени методом геометрического нивелирования путем проложения нивелирных ходов от опорных реперов определяются высоты деформационных марок, закрепленных центром для установки нивелирной рейки, и определяются временные вспомогательные реперы. Во второй ступени методом тригонометрического нивелирования относительно вспомогательных реперов определяются высоты групп деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями. Выполнен предрасчет точности каждой ступени геодезических построений, который доказал обеспечение II класса точности измерения деформаций (по ГОСТ 24846–2019). Представленная схема геодезических построений была успешно применена на ряде объектов геодезического мониторинга и является хорошей альтернативой проложению высотных ходов электронным тахеометром только методом тригонометрического нивелирования, так как она более простая в организации полевых работ и позволяет достичь требуемой точности определения высот деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями, при значительном их удалении от опорных реперов.

Ключевые слова: мониторинг сооружений, контроль деформаций, вертикальные деформации, геометрическое нивелирование, тригонометрическое нивелирование, пленочный отражатель

Введение

Безусловно, геометрическое нивелирование является основным методом определения вертикальных перемещений зданий и сооружений (далее под вертикальным перемещением будем понимать осадку, как наиболее распространенную деформационную характеристику) и широко представлен и описан в практике таких работ [1–6]. При использовании метода геометрического нивелирования выбирается и соответствующая конструкция деформационной марки, предполагающая однозначную установку на нее нивелирной рейки (рис. 1).

Нередко часть деформационных марок закрепляется пленочными отражателями. При-

чины такой ситуации могут быть разными и неважны для дальнейшего рассмотрения, следует отметить только, что пленочные отражатели позволяют достаточно быстро выполнить восстановление утраченных деформационных марок и являются наиболее удобными для установки на металлические конструкции (рис. 2).

При закреплении деформационных марок пленочными отражателями наблюдения на них можно выполнить только методом тригонометрического нивелирования, который согласно п. 6.2 ГОСТ 24846–2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» [7] разрешается использовать для II–IV классов точности измерений деформаций.

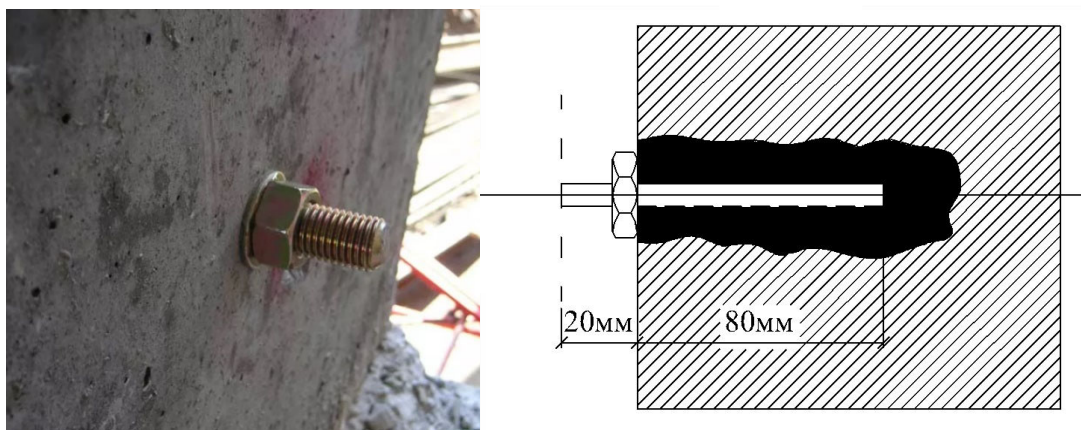


Рис. 1. Пример деформационной марки, закрепленной центром для установки нивелирной рейки



Рис. 2. Пример установки пленочного отражателя

Часто замена геометрического нивелирования тригонометрическим нивелированием связана со значительным перепадом высот. В работах [8–10] представлены и другие случаи, когда целесообразна такая замена, а также представлены конструкции марок для выполнения тригонометрического нивелирования и схемы их установки.

Предложение по определению высот деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями

В целом опыт тригонометрического нивелирования для геодезического контроля деформаций и исследования в этой области до-

статочно широко представлены [8, 9–17] и показывают, что применение современных тахеометров позволяет тригонометрическому нивелированию конкурировать по точности с геометрическим.

В работах [9, 10] подробно представлена методика тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами с использованием высокоточных тахеометров для измерения осадок и деформаций зданий и сооружений, которая заключается в проложении электронным тахеометром высотного хода тригонометрического нивелирования. Однако, в случае, когда на объекте геодезического мониторинга деформационные марки частично закреплены пленочными отражателями,

определение высот таких деформационных марок целесообразно вести по двухступенчатой схеме на основе комбинации метода геометрического и тригонометрического нивелирования.

В первой ступени рядом с группой деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями, определяется временный вспомогательный репер путем проложения через него от ближайшего опорного репера замкнутого нивелирного хода. Высокоточное геометрическое нивелирование позволяет с высокой точностью передать высоту от значительно удаленного опорного репера на

вспомогательный репер, расположенный рядом с наблюдаемыми пленочными отражателями. С точки зрения оптимальной организации работ, первую ступень рекомендуется совмещать с проложением нивелирных ходов по деформационным маркам, закрепленным центром для установки нивелирной рейки.

Во второй ступени электронным тахеометром методом тригонометрического нивелирования осуществляется передача высоты с временного репера на наблюдаемые пленочные отражатели.

Примерная модельная схема измерений представлена на рис. 3.

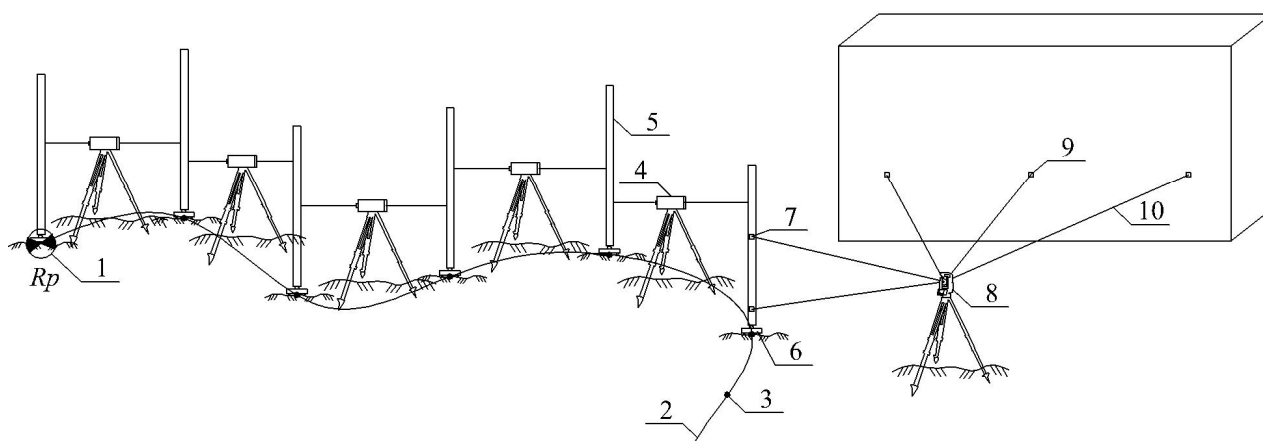


Рис. 3. Схема определения высот пленочных отражателей на основе комбинации метода геометрического и тригонометрического нивелирования:

1 – опорный репер; 2 – условная линия нивелирного хода; 3 – связующая точка; 4 – нивелир; 5 – нивелирная рейка; 6 – нивелирный башмак; 7 – пленочный отражатель, наклеенный на рейку; 8 – электронный тахеометр; 9 – деформационные марки, закрепленные на сооружении пленочными отражателями; 10 – условные линии визирования

Вспомогательные реперы следует располагать вблизи деформационных марок так, чтобы превышения между этим репером и наблюдаемыми марками можно было определить с одной станции электронного тахеометра. В качестве такого репера рекомендуется выбирать имеющуюся рядом деформационную марку, закрепленную центром для установки нивелирной рейки, или закрепить вспомогательный репер временным центром (арматура, дюбель и т. п.) для обеспечения его сохранности в рамках текущего цикла геодезического контроля

деформаций. При параллельном выполнении первой и второй ступени силами двух бригад в качестве вспомогательного репера можно использовать нивелирный башмак (рис. 3), установленный на одной из связующих точек нивелирного хода первой ступени.

Во второй ступени электронный тахеометр устанавливается на равных расстояниях между вспомогательным репером и группой пленочных отражателей. Предварительно на нивелирную рейку также приклеивается пленочный отражатель (рекомендуется два), на который

в дальнейшем будут выполняться стандартные наблюдения тригонометрического нивелирования, при этом нивелирная рейка устанавливается на временном репере по круглому уровню и ориентируется отражателем на электронный тахеометр. Такие же наблюдения выполняются

и на пленочные отражатели, закрепляющие деформационные марки. Пример исполнения и выполнения наблюдений представлен на рис. 4, 5. В работах [8, 9] предложены и другие варианты визирования, например на один или несколько штрихов рейки.



Рис. 4. Наблюдение двух пленочных отражателей, закрепленных на нивелирной рейке. В качестве временного репера выступает одна из деформационных марок потолочно-подвесного типа:

а) визирование на верхний пленочный отражатель; *б)* визирование на нижний пленочный отражатель



Рис. 5. Передача высоты тригонометрическим нивелированием с временного репера на деформационную марку, закрепленную пленочным отражателем:

а) рейка установлена на нивелирном башмаке (временный репер); *б)* пленочный отражатель (деформационная марка)

Предрасчет точности определения высот деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями

Рассмотрим II класс точности измерения деформаций (по ГОСТ 24846–2019) как наиболее высокий по требованиям точности, и который допускает использование тригонометрического нивелирования. Допустимая погрешностью измерения осадок для II класса составляет 2 мм.

Опираясь на положения пунктов 3.6–3.8 Руководства [18], можно приравнять допустимую погрешность измерения осадок к средней квадратической ошибке (СКО) осадки, определенной из двух циклов измерений

Осадку отдельного деформационной марки характеризуется разностью ее высот, определенных в начальном и текущем циклах наблюдений. Тогда при сохранении идентичности схемы измерений, СКО определения высот деформационных марок в двух циклах измерений можно считать одинаковыми, следовательно, СКО определения высоты деформационной марки в каждом цикле измерений не должна превышать:

$$m_H = \frac{m_S}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,4 \text{ мм},$$

где m_S – СКО определения осадки деформационных марок.

В свою очередь, для деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями, учитывая двухступенчатую схему геодезических построений, СКО определения их высот можно представить следующим образом:

$$m_H = \sqrt{m_{H(I)}^2 + m_{H(II)}^2},$$

где $m_{H(I)}$, и $m_{H(II)}$ – составляющие СКО определения высоты пленочного отражателя соответственно в I и II ступенях.

Тогда, принимая во внимание принцип равных влияний, получим:

$$m_{H(I)} = m_{H(II)} = \frac{m_H}{\sqrt{2}} = \frac{1,4}{\sqrt{2}} = 1,0 \text{ мм}.$$

Предрасчет точности определения составляющей СКО определения высоты пленоч-

ного отражателя соответственно в I ступени, т. е. СКО определения высоты пункта сгущения опорной сети, можно получить в процессе строгого уравнивания результатов измерений (оценка точности после уравнивания) [19–21] или упрощенным способом, путем вычисления СКО измерения превышения на станции по следующей формуле:

$$\mu_h = \frac{m_{H(I)}}{\sqrt{n}},$$

где n – количеством станций от опорного репера до вспомогательного репера (превышения, измеряемые на станциях, принимаются равноточными).

Ориентируясь на полученную СКО определения превышения на станции, выбирается методика нивелирования. Например, пусть вспомогательный репер находится на расстоянии 1 км от опорного репера. Предполагая в априори методику геометрического нивелирования II класса по ГОСТ 24846–2019, примем длину визирного луча не более 40 м, а число станций в нивелирном ходе первой ступени – 15. Тогда на основании представленного точностного выражения получаем $\mu_h = 0,25$ мм и приходим к выводу о необходимости выполнения нивелирования по методике II класса точности по ГОСТ 24846–2019.

Во второй ступени предложенной схемы геодезических построений передача высоты со вспомогательного репера на пленочные отражатели выполняется с одной станции электронным тахеометром. При тригонометрическом нивелировании из середины превышение вычисляется по формуле:

$$h = D_1 \cdot \sin v_1 - D_2 \cdot \sin v_2 - l_1,$$

где D_1 и v_1 – наклонное расстояние и угол наклона, определенные на пленочный отражатель, закрепленный на рейке; D_2 и v_2 – наклонное расстояние и угол наклона, определенные на наблюдаемую деформационную марку (пленочный отражатель); l_1 – расстояние от пятки рейки до пленочного отражателя, закрепленного на рейке.

Выполним априорную оценку точности тригонометрического нивелирования, принимая, что углы наклона $v_1 = v_2 = v$ и все линейно-угловые измерения равноточные:

$$m_h = \sqrt{2 \cdot \left(\sin^2(v) \cdot m_D^2 + \frac{D^2 \cdot \cos^2(v) \cdot m_v^2}{\rho^2} \right) + m_l^2},$$

где m_v – СКО измерения угла наклона; m_D – СКО измерения расстояния; $\rho = 206265''$ – коэффициент перехода от угловых величин к линейным (число секунд в радиане); m_l – СКО измерения высоты пленочного отражателя, закрепленного на рейке.

Примем, что измерения проводятся электронным тахеометром со стандартными в строительстве точностями линейно-угловых измерений: $m_D = 2$ мм для коротких расстояний, $m_v = 2''$ и $5''$. Учитывая высокие требования к точности измерений, дополнительно в точности угловых измерений учтем ошибку визирования, которая может быть определена по формуле

$$m_{\text{виз}} = \frac{20''}{\Gamma^x},$$

где Γ^x – увеличение зрительной трубы. Тогда при $\Gamma^x = 30$, к приборной СКО измерения углов прибавим $m_{\text{виз}} = 1''$. Расстояние от пятки рейки до нижнего пленочного отражателя следует измерить штангенциркулем, тогда СКО измерения высоты пленочного отражателя m_l соотнесем с точностью совмещения губки штангенциркуля для измерения наружных размеров с центром пленочного отражателя, что соответствует разрешающей способности человеческого глаза на расстоянии наилучшего зрения (250 мм), и примем 0,2 мм. Если измеряемое расстояние больше предельного значения для штангенциркуля, то оно определяется путем многократных измерений компарированной стальной рулеткой. При этом следует в каждом цикле геодезического контроля деформаций использовать одну и ту же рейку с сохранением одних и тех же наклеенных пленочных отражателей. Тогда ошибка измерения высоты пленочного отражателя из разности высот исключается.

Результаты априорной оценки точности тригонометрического нивелирования для различных значений расстояний и углов наклона представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

СКО измерения превышения тригонометрическим нивелированием при $m_D = 2$ мм и $m_v = 3''$ (с учетом ошибки визирования)

Расстояние, м	Угол наклона					
	0°	5°	10°	15°	20°	25°
5	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
10	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
15	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
20	0,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
25	0,6	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3
30	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3
35	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
40	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4
45	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5
50	1,0	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5
55	1,1	1,2	1,2	1,3	1,5	1,6

Таблица 2

СКО измерения превышения тригонометрическим нивелированием при $m_D = 2$ мм и $m_v = 6''$ (с учетом ошибки визирования)

Расстояние, м	Угол наклона					
	0°	5°	10°	15°	20°	25°
5	0,3	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
10	0,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
15	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3
20	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4
25	1,0	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5
30	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6

Опираясь на полученные данные, приходим к выводу, что при использовании электронного тахеометра с угловой точностью 2'' предельное расстояние и угол наклона составляют 50 м и 20° соответственно; а при использовании электронного тахеометра с угловой точностью 5'' – 25 м и 20°. Подобные результаты предрасчета точности получены и в других работах. Например, при длине плеч до 10,0 м СКО измеренного на станции превышения составит не более 0,15–0,20 мм при выполнении измерений электронным тахеометром, обеспечивающим СКО измерения углов наклона (1,0–2,0'') и расстояний (1,0–2,0 мм) [16].

Согласно исследованиям, представленным в работах [22–25], для таких коротких расстояний влияние ошибки за рефракцию при тригонометрическом нивелировании незначительно, особенно при нивелировании из середины, поэтому неучет ошибки за рефракцию в предрасчете точности является обоснованным.

Следует отметить, что в предложенной методике наблюдений рекомендуется использовать два пленочных отражателя, закрепленных на нивелирной рейке. В этом случае, искомое превышение определяется дважды и в случае, если расхождение между ними не превышает удвоенного значения m_h , за оконча-

тельный результат принимается среднее значение.

Выводы

Предложенная методика геодезических наблюдений, основанная на комбинации методов геометрического и тригонометрического нивелирования, может применяться в практике геодезических деформационных наблюдений в случае совместного использования деформационных марок, закрепленных как центром для установки нивелирной рейки, так и пленочными отражателями. Опыт работ показывает состоятельность предложенной методики для получения точностных требований II класса точности по ГОСТ 24846–2019. На практике удаленность деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями, от опорных реперов составляла от 1 км до 2 км.

С точки зрения организации полевых работ и надежности определения высот деформационных марок, закрепленных пленочными отражателями, данная методика, на наш взгляд, является хорошей альтернативой предложению электронным тахеометром высотных ходов тригонометрическим нивелированием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Канашин Н. В., Афонин Д. А. Геодезический мониторинг при эксплуатации футбольных стадионов Чемпионата мира 2018 // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 42–52.
2. Канашин Н. В., Сергеев О. П. Геодезические работы при мониторинге стадиона «Самара Арена» // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов : Сб. материалов III Всероссийской научно-практической конфе-

ренции (Санкт-Петербург, 15 мая 2020 г.). – СПб. : Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2021. – С. 261–266.

3. Брынь М. Я., Богомолова Н. Н., Афонин Д. А., Никитчин А. А., Романов А. В. Исследование деформаций земляного полотна при тяжеловесном движении поездов // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 19–21.

4. Новиков Ю. А., Краев А. Н. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 28 – 41.

5. 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.

6. Баширова Д. Р., Брынь М. Я., Кривонос Д. А. Методика определения осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83, № 5. – С. 2–10.

7. ГОСТ 24846–2019. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

8. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–19.

9. Уставич Г. А., Рахымбердина М. Е., Никонов А. В., Бабасов С. А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.

10. Ворошилов А. П. Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2005. – Вып. 3, № 13. – С. 37–39.

11. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдений за осадками сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 78–86.

12. Беспалов Ю. И., Дьяконов Ю. П., Терещенко Т. Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8–10.

13. Павлов А. И. О применении тригонометрического нивелирования при определении деформации оснований зданий и сооружений // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – № 10. – С. 110–113.

14. Никонов А. В. Методика тригонометрического нивелирования первого и второго разрядов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 39–45.

15. Уставич Г. А., Никонов А. В., Сальников В. Г., Рябова Н. М., Горилько А. С. Методика выполнения нивелирования III и IV классов тригонометрическим способом // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, № 7. – С. 2–11.

16. Уставич Г. А., Никонов А. В., Мезенцев И. А., Олейникова Е. А. Совершенствование методики веерообразного тригонометрического нивелирования // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 33–47.

17. Никонов А. В., Скрипников В. А., Скрипникова М. А. Применение высокоточного тригонометрического нивелирования при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 85–92.

18. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 1975. – 156 с.

19. Савинов В. К., Брынь М. Я. Проектирование геодезической высотной сети специального назначения // Сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 290–293.

20. Афонин Д. А., Брынь М. Я., Богомолова Н. Н. и др. О проектировании планово-высотной сети для геодезического мониторинга эксплуатации стадионов, построенных к проведению матчей Чемпионата мира 2018 года // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов : сб. материалов III Всероссийской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 15 мая 2020 г.). – СПб. : Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2021. – С. 213–220.

21. Брынь М. Я., Астапович А. В., Афонин Д. А. Уравнивание геодезических измерений параметрическим способом : учебное пособие. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 48 с.
22. Лобанова Ю. В., Брынь М. Я., Афонин Д. А. Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 670–676.
23. Брынь М. Я., Лобанова Ю. В., Афонин Д. А. Об определении и учете коэффициента рефракции на строительной площадке // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 6–14.
24. Лобанова Ю. В. Определение коэффициента рефракции в полевых условиях // Современные проблемы инженерной геодезии: сб. трудов Международной научно-практической конференции. – СПб. : ПГУПС, 2020. – С. 110–113.
25. Лобанова Ю. В. Анализ влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования при коротких расстояниях // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 2. – С. 77–84.

Об авторах

Афонин Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии.
Канашин Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии.

Получено 27.07.2023

© Д. А. Афонин, Н. В. Канашин, 2024

Geodetic control of vertical deformations of engineering structures based on a combination of geometric and trigonometric leveling methods

D. A. Afonin¹, N. V. Kanashin¹*

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russian Federation

* e-mail: afonin83@yandex.ru

Abstract. This article discusses a two-stage scheme of geodetic constructions when determining the heights of deformation marks during geodetic control of vertical deformations of engineering structures in the case when the deformation marks are fixed by the center for installing a leveling rod, and in the form of film reflectors. The first stage uses the method of geometric leveling by laying leveling paths from support benchmarks and determines both the heights of deformation marks fixed with a center for installing a leveling rod, and temporary auxiliary benchmarks. The second stage uses the method of trigonometric leveling relative to auxiliary reference points and determines the heights of groups of deformation marks fixed with film reflectors. A pre-calculation of the accuracy of each stage of geodetic construction was carried out, which proved to provide II class accuracy for measuring deformations (according to GOST 24846-2019). The presented scheme of geodetic constructions was successfully applied on a number of geodetic monitoring objects and is a good alternative to laying high-altitude passages with an electronic total station using only the trigonometric leveling method, because it is simpler in organizing field work and allows one to achieve the required accuracy in determining the heights of deformation marks fixed with film reflectors, at a significant distance from the reference points.

Keywords: monitoring of structures, deformation control, vertical deformations, geometric leveling, trigonometric leveling, film reflector

REFERENCES

1. Kanashin, N. V., & Afonin, D. A. (2020). Geodetic monitoring during the operation of foot-sick stadiums of the 2018 World Cup. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 42–52 [in Russian].
2. Kanashin, N. V., & Sergeev, O. P. (2021). Geodetic works during monitoring of the Samara Arena stadium. In *Sbornik materialov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovershenstvovanie*

sredstv i metodov sbora i obrabotki geoprostranstvennoy informatsii i sistemy podgotovki spetsialistov [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference: Improving the Means and Methods of Collecting and Processing Geospatial Information and the System of Training Specialists] (pp. 261–266). St. Petersburg: Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky Publ. [in Russian].

3. Bryn, M. Ya., Bogomolova, N. N., Afonin, D. A., Nikitchin, A. A., & Romanov, A. V. (2018). Investigation of deformations of the roadbed during heavy train traffic. *Put' i putevoe khozyaystvo [Path and Field Economy]*, 12, 19–21 [in Russian].

4. Novikov, Yu. A., & Kraev, A. N. (2019). Geodesic observations of building precipitation within the framework of geotechnical monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 28–41 [in Russian].

5. Sholomitsky, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High-precision geodetic measurements during deformation monitoring of the water park. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].

6. Bashirova, D. R., Bryn, M. Ya., & Krivonosov, D. A. (2022). Methodology for determining the sediment of the foundations of highways on high embankments. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 83(5), 2–10 [in Russian].

7. Standards Russian Federation. GOST 24846-2019. Soils. Methods of measuring deformations of the foundations of buildings and structures. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

8. Nikonov, A. V. (2013). Features of the use of modern geodetic instruments in the observation of precipitation and deformations of buildings and structures of energy facilities. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 4 (24), 12–19 [in Russian].

9. Ustavich, G. A., Rakhymberdina, M. E., Nikonov, A. V., & Babasov, S. A. (2013). Development and improvement of the technology of engineering geodetic leveling by the trigonometric method. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 17–22 [in Russian].

10. Voroshilov, A. P. (2005). Measurement of precipitation of buildings and structures by electronic total stations. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Stroitel'stvo i arkhitektura" [Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"]*, 3(13), 37–39 [in Russian].

11. Nikonov, A. V. (2013). Experience in the application of trigonometric leveling with the use of electronic total stations for observing the precipitation of structures. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 78–86). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

12. Bespalov, Yu. I., Dyakonov, Yu. P., & Tereshchenko, T. Yu. (2010). Observation of precipitation of buildings and structures by trigonometric leveling. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 8, 8–10 [in Russian].

13. Pavlov, A. I. (2014). On the application of trigonometric leveling in determining the deformation of the foundations of buildings and structures. *Vestnik NITs Stroitel'stvo [Bulletin of Science and Research Center of Construction]*, 10, 110–113 [in Russian].

14. Nikonov, A. V. (2015). Methodology of trigonometric leveling of the first and second digits. *Izvestiya vuzov "Geodeziya i aerofotos"emka" [Izvestia Vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"]*, 5/S, 39–45 [in Russian].

15. Ustavich, G. A., Nikonov, A. V., Salnikov, V. G., Ryabova, N. M., & Gorilko, A. S. (2019). Method of leveling III and IV classes by trigonometric method. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 80(7), 2–11 [in Russian].

16. Ustavich, G. A., Nikonov, A. V., Mezentsev, I. A., & Oleinikova, E. A. (2021). Improving the technique of fan-shaped trigonometric leveling. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(6), 33–47 [in Russian].

17. Nikonov, A. V., Skripnikov, V. A., & Skripnikova, M. A. (2021). Application of high-precision trigonometric leveling in deformation monitoring of hydraulic structures. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2021: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 85–92). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

18. *Guidelines for observations of deformations of foundations and foundations of buildings and structures.* (1975). Moscow: Stroyizdat Publ., 156 p. [in Russian].

19. Savinov, V. K., & Bryn, M. Ya. (2018). Designing a geodesic high-altitude network for special purposes. In *Sbornik trudov LXXVIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i*

molodykh uchenykh: Transport: problemy, idei, perspektivy [Proceedings of the LXXVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientist: Transport: Problems, Ideas, Prospects] (pp. 290–293). St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ. [in Russian].

20. Afonin, D. A., Bryn, M. Ya., Bogomolova, N. N., & et al. (2021). On the design of a planned high-altitude network for geodetic monitoring of the operation of stadiums built for the 2018 World Cup matches. In *Sbornik materialov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovershenstvovanie sredstv i metodov sbora i obrabotki geoprostranstvennoy informatsii i sistemy podgotovki spetsialistov [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference: Improving the Means and Methods of Collecting and Processing Geospatial Information and the System of Training Specialists]* (pp. 213–220). St. Petersburg: Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky Publ. [in Russian].

21. Bryn, M. Ya., Astapovich, A. V., & Afonin, D. A. (2014). *Uravnivanie geodezicheskikh izmereniy parametricheskim sposobom [Equalization of geodetic measurements by parametric method]*. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 48 p. [in Russian].

22. Lobanova, Yu. V., Bryn, M. Ya., & Afonin, D. A. (2019). Determination of the refraction coefficient at short distances. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Izvestia of the St. Petersburg University of Railways]*, 16(4), 670–676 [in Russian].

23. Bryn, M. Ya., Lobanova, Yu. V., & Afonin, D. A. (2022). On the determination and accounting of the refraction coefficient at the construction site. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(1), 6–14 [in Russian].

24. Lobanova, Yu. V. (2020). Determination of the refraction coefficient in field conditions. In *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovremennye problemy inzhenernoy geodezii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Contemporary Problems of Engineering Geodesy]* (pp. 110–113). St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ. [in Russian].

25. Lobanova, Yu. V. (2018). Analysis of the influence of vertical refraction on the results of trigonometric leveling at short distances. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of the Results of Scientific Research]*, 2, 77–84 [in Russian].

Author details

Dmitry A. Afonin – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

Nikolay V. Kanashin – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

Received 27.07.2023

© D. A. Afonin, N. V. Kanashin, 2024