

УДК 528.482

Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом

© Уставич Г. А., Рахымбердина М. Е., Никонов А. В.,
Бабасов С. А., 2013

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», г. Новосибирск
sibte@bk.ru

Рассмотрена методика тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами с использованием высокоточных тахеометров для измерения осадок и деформаций зданий и сооружений. Предлагается классификация тригонометрического нивелирования в зависимости от требуемой точности нивелирования.

Высота, осадка сооружений, тахеометры, тригонометрическое нивелирование.

Height, slump of constructions, total station, trigonometric leveling.

Необходимость постановки данного вопроса обусловлена тем, что до настоящего времени инженерно-геодезическое нивелирование, выполняемое тригонометрическим способом, не находило достаточного применения при выполнении различных инженерно-геодезических работ. Это в значительной мере было обусловлено тем, что в некоторых нормативных документах этот способ нивелирования вообще не рекомендовался для применения. Кроме того, например, в нормативном документе [6] для определения осадок и деформаций сооружений и оборудования тепловых электростанций наряду с геометрическим и гидростатическим нивелированием рекомендуется применять и тригонометрическое нивелирование, но методика его производства не приводится.

Появление в геодезическом производстве высокоточных электронных тахеометров способствует их все более широкому применению при создании инженерно-геодезических сетей на промплощадке, в строительстве и при эксплуатации инженерных сооружений, включая линейные. При этом применяемые ранее способы и средства измерений в значительной степени заменяются способами измерений, основанными на использовании тахеометров. К таким способам относится геометрическое нивелирование короткими лучами,

применяемое при определении осадок и деформаций инженерных сооружений и оборудования.

Одни из недостатков геометрического нивелирования – необходимость обеспечения видимости на рейку при горизонтально расположенной визирной оси. В связи с этим в условиях действующего предприятия приходится затрачивать значительное количество времени на выбор нивелирной станции, при котором соблюдается целый ряд условий: выбор собственно места установки нивелира, обеспечивающего устойчивость системы «штатив-нивелир», обеспечение видимости на рейку, а также равенства плеч и высоты визирования. Примерно в 25–30 % случаев оказывается невозможным обеспечение этих требований для непосредственного измерения превышения между марками, и поэтому приходится делать переходные точки, что значительно увеличивает объем нивелирных работ.

В отдельных случаях для определения осадок и деформаций 15–20 лет назад применялось и тригонометрическое нивелирование. Однако его широкому применению препятствовала трудоемкость выполнения этого вида геодезических измерений, так как для определения превышения тригонометрическим нивелированием необходимо было измерить светодальномером расстояние, а высокоточным теодолитом типа

T2 измерить угол наклона. С появлением электронных тахеометров, задача определения превышения тригонометрическим нивелированием значительно упростилась. Решать эту задачу стало еще легче в связи с появлением в геодезическом производстве тахеометров, обеспечивающих:

среднюю квадратическую ошибку (СКО) измерения расстояния и угла наклона, соответственно, 1,0–2,0 мм и 1,0–2,0";

измерение расстояний до 150–200 м с СКО 1,5–2,0 мм в безотражательном режиме.

Последнее обстоятельство значительно упростило задачу однозначной фиксации точки визирования, на которую производятся измерения расстояния и угла наклона.

С учетом этого начали проводиться исследования возможности применения тахеометров для определения геометрических параметров строительных конструкций и для определения осадок и деформаций инженерных сооружений [1–3]. Такие же исследования, а также выполнение работ начали проводиться и производственными организациями при строительстве, реконструкции и эксплуатации инженерных сооружений и оборудования. Эти исследования и производственные работы показали достаточно высокую эффективность тригонометрического нивелирования при выполнении целого ряда геодезических работ, включая определение осадок и деформаций сооружений и оборудования. Необходимо отметить, что в настоящее время при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений производственные организации вместо геометрического нивелирования довольно часто применяют тригонометрическое нивелирование, хотя нормативными документами, как уже указывалось выше, это иногда не предусматривается.

С учетом этого рассмотрим основные положения технологического характера, которые необходимо учитывать при применении тригонометрического нивелирования на промплощадке, а также при выработке более или менее единого подхода с целью внесения в общегосударственные нормативные документы дополнений на данный вид геодезических работ, с учетом возможностей высокоточных электронных тахеометров.

Для этого сначала, по аналогии с геометрическим нивелированием короткими

визирными лучами, остановимся на предложении [7] регламентировать тригонометрическое нивелирование на промплощадке как нивелирование короткими, до 100 м, визирными лучами. Далее, с учетом этого, можно разрабатывать разряды тригонометрического нивелирования, методику измерений и допуски на его выполнение. Для этого необходимо отметить, что наши предложения будут относиться только к разрядному тригонометрическому нивелированию, которое на промплощадке будет производиться «способом из середины». Одностороннее же тригонометрическое нивелирование на промплощадке применяется, в основном, при земляных работах, топографической (исполнительной) съемке, при которых требуемая точность измерения превышения на станции в среднем равна 10–30 мм и для ее достижения не нужно особых рекомендаций.

Для разработки разрядного тригонометрического нивелирования приведем требования, предъявляемые к выполнению основных нивелирных работ для обеспечения строительства и эксплуатации инженерных сооружений и оборудования:

длина нивелирных ходов, замкнутых или опирающихся на исходные реперы, в условиях промплощадки редко превышает 2,0–2,5 км;

СКО измерения превышения при установке строительных конструкций (фундаментов и фундаментных плит, закладных частей, колонн и т. д.) в среднем должна быть равна 1,0–2,0 мм;

при выполнении нивелирования (при эксплуатации инженерных сооружений) штатив, как правило, устанавливается на жестком основании (асфальт, бетон), а рейка, отражатель или светоотражающая пленка – на исследуемом объекте (осадочная марка, часть оборудования и т. д.);

СКО измерения превышения на станции при определении осадок и деформаций инженерных сооружений, в основном, должна быть равна 0,15–0,25 мм;

СКО измерения превышения на станции при нивелировании подкрановых путей различного назначения должна быть равна 2,0–3,0 мм.

При разработке требований для выполнения разрядного тригонометрического нивелирования необходимо стремиться

к удобству выполнения измерений и ослаблению инструментальных ошибок.

Измерение превышения на станции тригонометрическим нивелированием может производиться дважды: при КЛ и КП. Такое измерение аналогично геометрическому нивелированию, выполняемому по основной и дополнительной шкалам. Если измерение превышения производится при одном круге (КЛ или КП), то СКО полученного превышения на нивелирной станции при нивелировании способом из середины будет равна [7]:

$$m_{h_{ст}} = m_{взгл} \sqrt{2}, \quad (1)$$

где $m_{взгл}$ – величина «ошибки взгляда» на один отражатель.

Под величиной «ошибки взгляда» будем понимать, как и при геометрическом нивелировании, суммарное влияние основных источников ошибок при выполнении однократного измерения при КЛ или при КП на один отражатель.

При измерении одним приемом (КЛ и КП) СКО измеренного превышения на станции будет равна:

$$m_{h_{ст}} = m_{взгл}. \quad (2)$$

Так как измеряемое превышение на станции вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} h_{ст} &= -(S_3 \sin \alpha_3 - S_{II} \sin \alpha_{II}) = \\ &= S_{II} \sin \alpha_{II} - S_3 \sin \alpha_3 \end{aligned} \quad (3)$$

то величину ошибки взгляда с учетом влияния основных источников ошибок: наклона отражателя, внешних условий и вертикальных перемещений системы «штатив-тахеометр» – можно найти по формуле:

$$m_{взгл} = \sqrt{m_s^2 \sin^2 \alpha + \frac{m_a^2}{\rho^2} S^2 \cos^2 \alpha + m_p^2 + m_{виз}^2 + m_{вн}^2 + m_{шт}^2}, \quad (4)$$

где m_s – СКО измерения наклонного расстояния; m_a – СКО измерения угла наклона; m_p – ошибка, обусловленная наклоном отражателя; $m_{виз}$ – ошибка визирования; $m_{вн}$ – ошибка, вызванная влиянием внешних условий; $m_{шт}$ – ошибка, вызванная возможным вертикальным перемещением системы «штатив-тахеометр».

Прежде чем вычислять величину ошибки взгляда рассмотрим возможности применения тригонометрического нивелирования при определении осадок и деформаций инженерных сооружений и оборудования.

Для определения осадок и деформаций необходимо на исследуемом объекте закладывать осадочные марки. В связи с этим довольно часто при закладке марок возникают трудности, связанные с выбором места их размещения, с возможностью установки на них рейки и с последующим обеспечением их сохранности. Так как тахеометром можно определять превышения, используя безотражательный режим измерения расстояния, то условия закладки марок и последующих измерений, особенно связанные с выбором места установки прибора, значительно облегчаются. Так, если на сооружении или оборудовании уже имеются стандартные марки, то измерение превышения можно производить путем наведения зрительной трубы тахеометра (рис. 1, а) на штрих 1 (или светоотражающую пленку) короткой инварной рейки [2] или на марку 2, полученную кернением на строительной конструкции (например, на металлических колоннах) этого сооружения.

Кернение может производиться в виде перекрестья 3 (см. рис. 1, б) или в виде углубления 4. Важным фактором при выполнении измерений является возможность выполнять визирование на любой штрих рейки (на любую высоту визирования). Кроме того, в стесненных условиях, где невозможно на марку установить рейку, вместо короткой инварной рейки может применяться штангенциркуль.

Необходимо также отметить, что в последнее десятилетие возникла необходимость наблюдения за осадками высотных жилых и административных зданий, и их число быстро увеличивается. При возведении таких зданий осадочные марки закладываются в подвальных помещениях, и в процессе строительства доступ к ним практически всегда имеется. После ввода

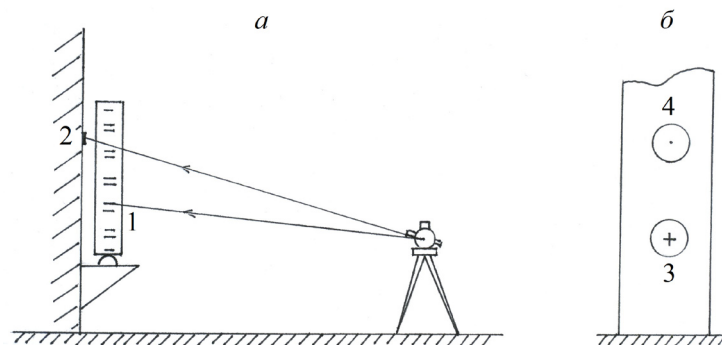


Рис. 1. Схемы визирования на осадочные марки

их в эксплуатацию доступ к маркам практически невозможен и они закладываются по внешнему периметру здания. При классической методике измерений осадочные марки закладываются на высоте 0,8–1,5 м (или на высоте 1,8–2,3 м при использовании подвесных реек) от уровня земли. Однако первые этажи таких зданий, как правило, обкладывают сайдингом или плиткой, что часто препятствует установке осадочных марок классической конструкции. Кроме того, если марки и установить, то в густонаселенных местах в течение года многие из них уничтожаются; восстановление их порой бывает еще сложнее, чем установка. Выход из такой ситуации может быть следующий (он неоднократно апробирован авторами).

Если здание закрывается сайдингом, то по разрешению администрации в нем и в утеплителе на высоте 0,8–1,2 м делается отверстие 1 (рис. 2, а) диаметром 25–30 мм и к стене здания приклеивается светоотражающая пленка 2, на которую затем тахеометром будут производиться измерения.

Перед выбором места для высверливания отверстия сначала уточняется местоположение точки (в пределах 0,5–1,0 м), с которой тахеометром будет наблюдаться данная марка. Если же сайдингом закрывается только первый этаж, то марка 3 закладывается выше; она, в простейшем

случае, может представлять собой саморез с шайбой, завинченный между кирпичной кладкой или между панелями.

При наличии облицовочной плитки также между ней на стыках завинчивается саморез 4 с шайбой (см. рис. 2, б) или на решетке окна зачищается небольшая область и керном наносится перекрестье 5.

Для определения величины ошибки взгляда при выполнении измерений рассмотрим влияние каждого источника ошибок из формулы (4).

Как указывалось выше, СКО измерения расстояния и угла наклона соответственно равны 1,0–2,0 мм и 1,0–2,0".

Величина ошибки, обусловленная наклоном рейки (отражателя), вычисляется по формуле [7]:

$$m_p = \frac{l \varepsilon^2}{2\rho^2} + \frac{l \varepsilon}{\rho} \operatorname{ctgz} + \frac{a \varepsilon}{\rho}, \quad (5)$$

где l – высота визирования; ε – величина угла наклона рейки (отражателя); z – зенитное расстояние (угол наклона визирной оси); a – расстояние от точки установки рейки (отражателя) до точки (плоскости) отражения луча при измерении расстояния.

При $l = 200$ мм; $z = 85^\circ$; $\varepsilon = 300''$ и $a = 1,0$ мм получим $m_p = 0,026$ мм.

Основное влияние на величину ошибки m_p оказывают величины l , z и ε , а в формуле (5) – второе слагаемое. Так при $l = 500$ мм; $z = 80^\circ$ и $\varepsilon = 300''$ получим величину второго слагаемого 0,13 мм.

Величина ошибки визирования в угловой мере при увеличении зрительной трубы $30\times$ будет равна 1,0–1,5".

К влиянию внешних условий при выполнении нивелирования можно отнести влияние турбулентности воздуха от работающего оборудования и нагретых в летнее время стен сооружения, а также вибрации на систему «штатив-тахеометр». Это влияние приводит к ухудшению визирования на рейку (отражатель) или светоотражающую пленку.

Ошибка, вызванная возможным вертикальным перемещением системы «штатив-тахеометр», возникает при установке штатива на гладкий пол,

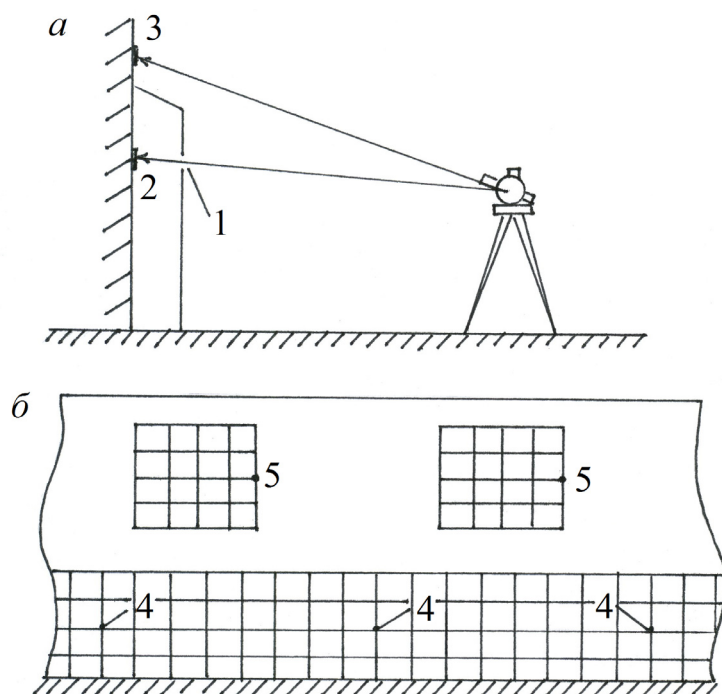


Рис. 2. Схемы закладки марок

а также при наличии вибрации; без принятия мер предосторожности их влияние приводит к расползанию ножек штатива.

Рассчитаем величину $m_{\text{взгл}}$ и m_{hct} для случая выполнения измерений одним приемом при благоприятных условиях и при $S = 10$ м; $\alpha = 2^\circ$ ($z = 88^\circ$); $m_s = 2,0$ мм; $m_{\alpha} = 2''$; $l = 200$ мм; $\varepsilon = 300''$ и $a = 1,0$ мм. Согласно формулам (1)–(3) получим $m_{\text{hct}} = m_{\text{взгл}} = 0,14$ мм.

Если превышение на станции измерить двумя приемами, то $m_{\text{hct}} = 0,10$ мм. При увеличении числа приемов следует ожидать некоторого повышения точности и надежности получаемых результатов. Однако, тем не менее, в условиях промплощадки и наличия возмущающих воздействий не следует ожидать уменьшения ошибки измерения превышения на станции менее 0,10–0,12 мм.

Из приведенного расчета следует, что тригонометрическое нивелирование короткими лучами с применением высокоточных тахеометров при небольших углах наклона позволяет вполне уверенно измерять превышение на станции с ошибкой не хуже 0,15 мм; этот вывод в определенной степени подтверждается также исследованиями авторов [1].

Приведем классификацию разрядов тригонометрического нивелирования (таблица), которая в значительной степени соответствует применяемому в настоящее время разрядам геометрического нивелирования [4, 5, 7–10].

Тригонометрическое нивелирование 1 разряда. Данный разряд нивелирования предназначен для определения осадок и деформаций инженерных сооружений, а также для обеспечения монтажа и эксплуатации применяемого на них технологического оборудования.

Исходную высотную основу необходимо создавать геометрическим нивелированием.

Перед началом измерений тщательно производится проверка тахеометра с введением необходимых поправок. Тригонометрическое нивелирование выполняется в прямом и обратном направлениях. Измерение превышения на станции в одном направлении производится двумя приемами. Измерение расстояний производится в безотражательном режиме. Между приемами горизонт тахеометра изменяется на величину не менее 3,0 мм. При выполнении измерений в условиях влияния вибрации применяются амортизационные подкладки.

В качестве визирных целей может применяться: штрих инварной рейки или наклеенная на нее светоотражающая пленка; накерненная визирная цель.

При применении накерненной визирной цели исключается ошибка m_p .

Контроль результатов измерений следующий: разность измеренных превышений между приемами на станции не должна превышать 0,30 мм; разность измеренных превышений из прямого и обратного ходов (невязка) не должна превышать величины $f \leq 0,30 \sqrt{n}$ мм.

Тригонометрическое нивелирование 2 разряда. Предназначение то же, что и у нивелирования 1 разряда.

Нивелирование выполняется в прямом направлении с измерением превышения на станции двумя приемами. Измерение расстояний производится в безотражательном режиме. Между приемами горизонт тахеометра изменяется на величину не менее 3,0 мм. При выполнении измерений в условиях влияния вибрации применяются амортизационные подкладки.

В качестве визирных целей может применяться: штрих инварной рейки или наклеенная на нее светоотражающая пленка, а также накерненная визирная цель.

Разряды тригонометрического нивелирования

Разряды	Длина визирного луча, м	СКО угла наклона, "	СКО измеренного расстояния, м	Число приемов	Высота визирования над пяткой, м	Мак угол наклона, °	m_{hct} , мм	Неравенство плеч, м
1	10	2,0	2,0	4	0,3	2	0,15	2,0
2	25	2,0	2,0	2	0,5	3	0,25	5,0
3	50	2,0	2,0	2	1,0	3	0,50	10,0
4	75	3,0	5,0	2	1,0	5	1,00	10,0
5	100	3,0	5,0	1	2,0	10	3,00	–

Контроль результатов измерений следующий: разность измеренных превышений между приемами на станции не должна превышать 0,50 мм; невязка не должна превышать величины $f \leq 0,50 \sqrt{n}$ мм.

Тригонометрическое нивелирование 3 разряда. Нивелирование выполняется в прямом направлении с измерением превышения на станции двумя приемами. Методика измерений аналогична методике при нивелировании 2 разряда.

Контроль результатов измерений следующий: разность измеренных превышений на станции между приемами не должна превышать 1,00 мм; невязка не должна превышать величины $f \leq 1,0 \sqrt{n}$ мм.

Тригонометрическое нивелирование 4 разряда. Нивелирование выполняется в прямом направлении с измерением превышения на станции двумя приемами. Методика измерений аналогична методике при нивелировании 3 разряда.

Контроль результатов измерений следующий: разность измеренных превышений на станции между приемами не должна превышать 1,50 мм; невязка не должна превышать величины $f \leq 2,0 \sqrt{n}$ мм.

Тригонометрическое нивелирование 5 разряда. Нивелирование выполняется в прямом направлении с измерением превышения на станции одним полным приемом. Необходимость введения данного разряда обусловлена большим объемом нивелирных работ таких, как: нивелирование подкрановых балок, путей, производство земляных работ и т. д. Выполнять данное нивелирование по программе IV класса чрезвычайно сложно и сопряжено с большими затратами на соблюдение неравенства плеч. Поэтому на практике нивелирование данной точности всегда производится со значительным неравенством плеч по схеме веерообразного нивелирования. Необходимо отметить, что нивелирование технической точности часто производится при одном круге, т. е. без контроля. На наш взгляд, это допустимо при земляных работах. Однако нивелирование протяженных подкрановых путей АЭС, ГРЭС, ТЭЦ, крупных заводов необходимо производить полным приемом.

При выполнении измерений одним приемом контроль следующий: разность измеренных превышений на станции между полуприемами не должна превышать

3,0 мм; невязка в ходе (если он прокладывается) не должна превышать величины $f \leq 3,0 \sqrt{n}$ мм.

В заключение отметим, что наши предложения по классификации и методике выполнения тригонометрического инженерно-геодезического нивелирования не являются окончательными, они будут и должны уточняться, но в итоге с учетом разработок других авторов, несомненно, приведут к внесению дополнений в существующие нормативные документы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Ю. И., Мирошниченко С. Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.
2. Беспалов Ю. И., Дьяконов Ю. П., Терещенко Т. Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 10. – С. 8–10.
3. Визиров Ю. В. Электронная съемка и обследование геометрии тоннеля // Геодезия и картография. – 1999. – № 10. – С. 20–25.
4. Жуков Б. Н., Жуков Н. Б. Предложения о создании единой инструкции по нивелированию для инженерно-геодезических работ // Геодезия и картография. – 1998. – № 8. – С. 22–26.
5. Карлсон А. А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений – М.: Недра, 1984. – 244 с.
6. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадками фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. СО 153-34.21.322-2003. – М.: ЦПТИиТО ОРГРЭС. – 20 с.
7. Пискунов М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
8. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами. – М.: Энергия, 1980. – 200 с.
9. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований фундаментов зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1985. – 160 с.
10. Уставич Г. А., Демин С. В., Шалыгина Е. Л., Пошивайло Я. Г. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования // Геодезия и картография. – 2005. – № 5. – С. 12–14.

Summary

The article deals with the method of short distances trigonometric leveling with high precision total stations for measurements of slumps and deformations of constructions. Classification of trigonometric leveling for required accuracy of geodetic works is recommended.