

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОСАДКАМИ СООРУЖЕНИЙ

Антон Викторович Никонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и информационных систем, e-mail: sibte@bk.ru

В статье рассматривается вопрос применения тригонометрического нивелирования электронным тахеометром для наблюдений за осадками инженерных сооружений. На основе производственных данных по наблюдению осадок железобетонных труб объектов энергетики сформулированы рекомендации по применению нивелирования наклонным лучом.

Ключевые слова: тригонометрическое нивелирование, нивелирование тахеометром, осадки и деформации, превышения.

EXPERIENCE OF APPLICATION OF TRIGONOMETRIC LEVELLING WITH USE ELECTRONIC TOTAL STATIONS FOR MEASURING DEFORMATIONS OF CONSTRUCTIONS

Anton V. Nikonov

Post-graduate student, Department of Engineering Geodesy and Information Systems, Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., e-mail: sibte@bk.ru

In article the question of application of trigonometric levelling by electronic total station for supervision over deformations of engineering constructions is considered. Recommendations about levelling application by an inclined beam are formulated.

Key words: trigonometric leveling, tacheometer leveling, deformations of constructions, height differences.

В комплекс работ по наблюдениям за кренами дымовых труб, как правило, входит нивелирование осадочных марок фундамента [9]. Согласно [1], измерения осадки фундаментов зданий и сооружений производятся методом геометрического и гидростатического нивелирования. Измерения осадки в период эксплуатации осуществляются с точностью, характеризующейся средней квадратической погрешностью определения осадки в слабом месте не более 1 мм (наиболее удаленной марки от исходных реперов).

Специализированные организации, выполняющие строительство и ремонт дымовых труб, а также осуществляющие их геодезический контроль, не всегда обладают комплектом приборов и инструментов для производства прецизионного нивелирования [8, 16].

Тем не менее, применение современных электронных тахеометров позволяет обнаружить осадку фундамента 1мм и более по сравнению с предыдущим циклом наблюдений, так как грунтовые репера зачастую

находятся неподалеку от дымовых труб (50 – 250 м), а также зафиксировать неравномерность осадок марок трубы более 1 мм [11, 12].

Среднюю квадратическую погрешность превышения, определенного тригонометрическим нивелированием, вычисляют по формуле [2]:

$$m_h^2 = (m_s \operatorname{ctg} z)^2 + \left(\frac{m_z \rho}{\sin^2 z}\right)^2, \quad (1)$$

где m_s – С.К.П. измерения расстояния; z – зенитное расстояние; m_z – С.К.П. измерения зенитного расстояния; $\rho=206265$ – число секунд в радиане.

Так, при проложении нивелирного хода по осадочным маркам вокруг дымовой трубы, среднее расстояние от прибора до рейки составляет 6м, а зенитное расстояние 100° . Подставив известные величины, получим $m_h = 0,38$ мм ($m_z = 5''$) и $m_h = 0,36$ мм ($m_z = 2''$). В конкретном случае, точность измерения вертикального угла практически не влияет на точность измеряемого превышения.

При тщательном выполнении измерений, возможно добиться того, чтобы превышение, измеренное тахеометром, отличалось от превышения, измеренного прецизионным нивелиром, не более, чем на 0,2 – 0,3 мм.

Летом 2012 года на Бийской ТЭЦ выполнялись геодезические наблюдения четырех железобетонных дымовых труб. Определение отметок осадочных марок производилось тригонометрическим нивелированием с использованием электронного тахеометра Leica TS-02 (5'') и телескопической шашечной рейки.

Работы выполнялись в солнечную погоду ($t=+23^\circ\text{C}$). По возможности прибор устанавливался в тени от строений ТЭЦ.

Порядок работы на станции следующий: тахеометр устанавливался приблизительно посередине между двумя марками, визирование выполнялось на один и тот же штрих рейки (удобный для данной станции). В основном выполнялось визирование на «5см» штрих, в целях уменьшения влияния наклона рейки. Из-за большой высоты осадочных марок, уровень при удержании рейки не применялся.

Далее в безотражательном режиме измерялись превышения между задней и передней рейкой. Для удобства вычислений с прибора выписывались не превышения между осью вращения зрительной трубы и целью, которые могут иметь разные знаки, а отвлеченные отметки «5-и» сантиметровых штрихов рейки. Превышение между осадочными марками определялось как условная отметка «5-и» сантиметрового штриха рейки, установленной на передней точке, минус его отметка на задней точке.

Наведение на штрих выполнялось два раза, значение высоты выписывалось с точностью до десятых долей миллиметра. Если при двойном наведении значения высот отличались более чем на 0,4 мм, производились дополнительные измерения.

При нивелировании вокруг труб плечи нивелирования составляли порядка 5-10 м. В ходах связи (между исходным репером и осадочной маркой трубы

или осадочными марками соседних труб) длины плеч не превышали 40 м. Ходы связи выполнялись прямо и обратно.

На дымовых трубах было установлено от 4 до 12 осадочных марок. По результатам замыканий вокруг труб были получены следующие невязки (см. табл. 1).

Таблица 1

Невязки ходов нивелирования по осадочным маркам дымовых труб

№ трубы	Станций в полигоне	Невязка триг. нив., мм	Невязка геом. нив. 2011 г., мм
1	2	3	4
1	4	+0,2	-
2	6	+1,5	+0,54
3	6	+1,4	+0,38
4	6	+0,4	-0,74

Допустимые невязки, подсчитанные по формулам [3 с.156] для геометрического нивелирования II класса ($f = 0,5 \text{ мм}\sqrt{n}$) и III класса ($f = 1,5 \text{ мм}\sqrt{n}$) равны соответственно 1,2 и 3,6 мм (где n – число станций в замкнутом полигоне, в данном случае $n=6$).

Все значения полученных невязок (столбец 3 таб.1) меньше допустимых значений для III класса геометрического нивелирования и близки к допускам для II класса.

В 2011 году по тем же осадочным маркам были проложены ходы высокоточного геометрического нивелирования с использованием нивелира Н-05.

Поскольку данной ТЭЦ более полувека, то осадки зданий и сооружений практически стабилизировались, что подтверждает анализ результатов наблюдений за последние годы, вплоть до 2011г. В связи с этим осадки дымовых труб с 2011 г по 2012 г маловероятны. Это позволяет провести сравнительный анализ превышений, полученных разными методами [10, 13,14,15].

При нивелировании в 2011 и в 2012 годах схемы ходов не всегда совпадали, поэтому в ряде случаев сравниваются не непосредственно измеренные превышения между осадочными марками, а их вычисленные значения.

По результатам обработки получены разности измеренных, а также уравненных значений превышений тригонометрического и геометрического нивелирования по формуле:

$$\Delta = h_T - h_G \quad (2)$$

Данные разности были отсортированы по интервалам с шагом 0,1 мм и помещены в табл. 2.

Таблица 2

Количественная характеристика различий
тригонометрического и геометрического нивелирования

№ интер.	интервал	число до урав.	число после урав.
1	от -0,6 до -0,7	0	1
2	от -0,5 до -0,6	0	0
3	от -0,4 до -0,5	0	1
4	от -0,3 до -0,4	1	7
5	от -0,2 до -0,3	3	3
6	от -0,1 до -0,2	2	0
7	от 0 до -0,1	5	6
8	от 0 до 0,1	6	4
9	от 0,1 до 0,2	1	1
10	от 0,2 до 0,3	0	0
11	от 0,3 до 0,4	3	0
12	от 0,4 до 0,5	3	1
13	от 0,5 до 0,6	2	0
14	от 0,6 до 0,7	2	0
15	от 0,7 до 0,8	0	2

Таким образом, 85% разностей до уравнивания находятся в пределах 0,5 мм, а 40% в интервале $\pm 0,1$ мм. Из 4-х разностей, превышающих интервал 0,5 мм до уравнивания, три разности вошли в этот интервал после уравнивания, однако две другие разности после уравнивания превысили 0,5 мм.

В итоге, после уравнивания 88% разностей не превышают 0,5 мм, и 38% разностей не превышают 0,1 мм.

Также следует отметить, что максимальные значения разностей получены не по измеренным превышениям, а путем вычислений. Разности в интервале от 0,7 до 0,8 получены путем алгебраических действий с двумя превышениями тригонометрического и двумя превышениями геометрического нивелирования.

Еще были вычислены разности между превышениями ходов связи, приведенных к одноименным маркам, из-за разной схемы ходов. В табл. 3 указано соотношение количества превышений тригонометрического и геометрического нивелирования, используемых в вычислениях.

Из таблицы следует, что результаты тригонометрического нивелирования хорошо согласуются с результатами высокоточного геометрического нивелирования. Максимальное значение разности, превышающее 1 мм, было получено при использовании в вычислениях 7(!) превышений тригонометрического нивелирования и 5 превышений высокоточного нивелирования.

Аналогичным образом тригонометрическое нивелирование применялось в 2012 году при наблюдениях за осадками фундаментов дымовых труб

Назаровской ГРЭС, Красноярской ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 (всего три трубы). Все измерения производились в пасмурную погоду, $t = +15^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3

Разность превышений
тригонометрического и геометрического нивелирования в ходах связи

Порядок связи (№ труб)	Соотношение числа станций тригон./геометр.	Разность до урав., мм	Разность после урав.,мм
от 1 к 2	2/5	-0,09	-
от 2 к 3	2/7	-0,87	-1,06
от 2 к 3*	7/5	1,18	1,38
от 3 к 4	3/9	0,02	-

* - вычисленные по другим превышениям

Данные по ходам связи представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение превышений
из тригонометрического и геометрического нивелирования в ходах связи

Объект	Тригон. нив. прям/обрат.	Геом. нив.	$\Delta=h_T-h_G$	год геом. нивел.	штатив триг./геом.
НГРЭС	+1341,7	+1341,40	+0,30	2005	2/5
	+1341,5		+0,10		4/5
ТЭЦ-1	+493,1	+493,56	-0,46	2010	4/7
ТЭЦ-2	-1889,3	-1889,38	+0,08	2011	1/2
	-1889,0		+0,38		

Из таблицы видно, что превышения «прямо» и «обратно» не отличаются более чем на 0,2 – 0,3 мм. Различия в превышениях, полученных разными методами, не отличается более чем на 0,5 мм. Эти отличия могли быть вызваны как осадкой высотной основы и сооружений за период эксплуатации между циклами наблюдений, так и ошибками измерений обоих методов. Сравним превышения между осадочными марками фундаментов дымовых труб (см. табл. 5).

Найденные разности между превышениями из тригонометрического и геометрического нивелирования не превышают 0,5 мм, а среднее по абсолютной величине значение разности равно 0,2 мм.

Производить оценку точности тригонометрического нивелирования, используя только допустимые невязки для геометрического нивелирования, не совсем корректно, поэтому в методику следует внести изменения для более надежного контроля качества измерений.

Таблица 5

Сравнение превышений между марками дымовой трубы из тригонометрического и геометрического нивелирования

	Тригон. нив.		невязка тригон. нивелир. f, мм/стан	Геом. нив.	$\Delta=h_T-h_T$		год геом. нив.	число штативов триг/геом
	до урав.	после урав.			до ур.	после ур.		
НГРЭС	-247,7	-247,1	+2,6 / 8	-247,2	-0.5	+0.1	2005	2/1
ТЭЦ-1	+3,6	-	нет возм замкн.	+3,6	0	-	2010	1/1
	+613,7	-		+613,5	+0,2			2/2
ТЭЦ-2	-51,0	-51,0	+0,1 / 6	-51,32	+0,32	+0,36 -0,29 -0,45 -0,09 +0,13	2011	1/1
	+20,5	+20,5		+20,83	-0,33			
	+90,7	+90,8		+91,28	-0,58			
	-15,3	-15,3		-15,18	-0,12			
	-73,6	-73,6		-73,69	+0,09			
	+28,6	+28,6		+28,30	+0,3			

Для этого предлагается визировать на два штриха рейки, находящиеся наиболее близко к пятке и разнесенные на 5 – 10 см друг от друга. В связи со сложной схемой ходов при нивелировании осадочных марок и необходимости полевого контроля, результаты измерений целесообразно записывать не в память прибора, а в журнал.

После установки прибора приблизительно посередине между осадочными марками и его горизонтирования, предлагается следующая последовательность действий при визировании на заднюю рейку:

1) Визирование на нижний штрих и измерение превышения между штрихом и осью вращения зрительной трубы. Запись превышения в полевой журнал.

2) Второе совмещение и измерение превышения. Запись превышения в полевой журнал.

3) Сравнение полученных результатов. Допустимое расхождение 0,4 мм при длинах плеч 20-40 м и 0,3 мм при длинах плеч менее 20 м.

4) Визирование на верхний штрих и измерение превышения между верхним штрихом и осью вращения зрительной трубы. Запись превышения в полевой журнал.

5) Второе совмещение и измерение превышения. Запись превышения в полевой журнал.

6) Сравнение превышений при двойном визировании на верхний штрих. Допустимые расхождения такие же, как и при наведении на нижний штрих.

7) Сравнение разности средних превышений на верхний и нижний штрихи с теоретическим расстоянием между штрихами, которое известно из градуировки рейки или при использовании бар-кодовой рейки, измерено

женевской линейкой либо компарированной рулеткой. Допустимое различие 0,4 мм при длинах плеч менее 20 м и 0,6 мм для длин плеч 20 – 40 м.

Порядок работы с передней рейкой аналогичный.

При сравнении измеренных превышений с данными из предыдущих циклов нивелирования определяют необходимость выполнения двойного хода.

Если различия в превышениях из двух циклов превышают 0,6 мм, то выполняется обратный ход по аналогичной программе.

В случае, если предыдущие измерения отсутствуют или сильно устарели, чтобы отказаться от проложения двойного хода следует выполнять работу по описанной схеме, но при двух положениях вертикального круга.

При работе с тахеометрами, у которых один экран, измерения при другом положении круга (КП) требуют обходить прибор для взятия отсчета, что вызывает неудобства. Поэтому при работе с такими приборами есть смысл работать при одном круге, но в два горизонта.

Наведение на два штриха целесообразно при визировании на расстояния свыше 15–20 м, что характерно для ходов связи. При нивелировании двух близко расположенных марок следует ограничиться визированием на один штрих.

В качестве цели удобно использовать метровую нивелирную рейку с инварной полосой и круглым уровнем. Возможно использовать и обычную шашечную рейку, как в опыте, но важно визуально следить за ее вертикальностью.

Из выше сказанного следует, что в зависимости от требуемой точности, расстояния от прибора до цели, от удаленности наблюдаемого сооружения от репера порядок измерений на станции может значительно меняться. Это говорит об адаптированности метода к местным условиям.

Оценка точности проводится по формуле, для вычисления СКО превышения по разностям двойных равноточных измерений:

$$m = \sqrt{\frac{d^2}{2n}}, \quad (3)$$

где d – разность измерений, n – число пар измерений.

При измерениях по упрощенной схеме в качестве двойных измерений выступают превышения, вычисленные отдельно по нижним и верхним штрихам рейки. При нивелировании в два горизонта (или при двух кругах) значения d получают, как разность превышений полученных при разной высоте инструмента (или при разных кругах).

Данную методику предлагается использовать для наблюдения за осадками дымовых труб, а также малонагруженных зданий и сооружений, таких как здания химводоочистки, баки хранения жидкого топлива и т.д.

Преимущество данного метода состоит в том, что с одной станции можно выполнить измерения сразу на несколько марок, (рис. 1) при этом допуская неравенства плеч, значительно большие, чем в геометрическом нивелировании специальных классов.

Тригонометрическое нивелирование является менее трудоемким методом в сравнении с геометрическим нивелированием способом совмещения, в котором

для нивелирования того же количества марок требуется больше перестановок прибора (рис. 2).

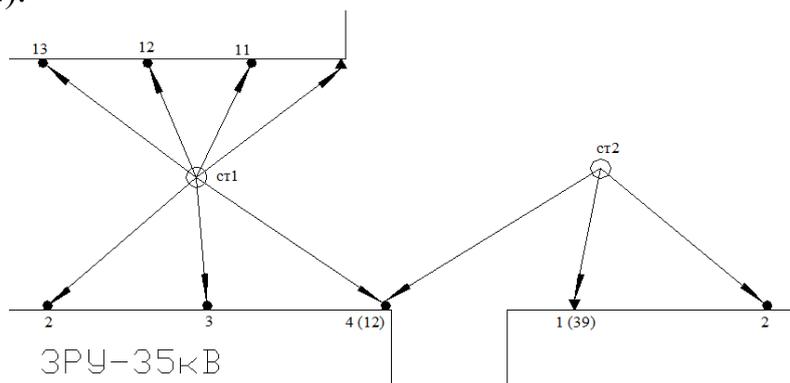


Рис. 1. Возможная схема нивелирования наклонным лучом

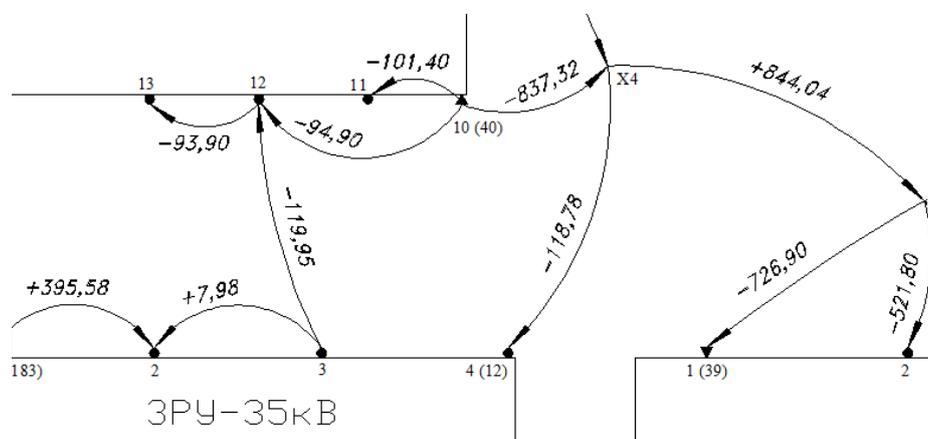


Рис. 2. Фрагмент схемы геометрического нивелирования

На основе полученных данных, можно сделать вывод, что тригонометрическое нивелирование короткими лучами (до 50м) с использованием современных тахеометров ($m_z \leq 5''$) и предложенной методики может применяться для обнаружения критических осадок (более 1мм) некоторых инженерных сооружений и сравнимо по точности с геометрическим нивелированием II класса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СО 153-34.21.322-2003 «Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций».
2. МДС 13-22.2009 «Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений».
3. Хаметов Т.И. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений : учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 200с.

4. Беспалов Ю.И., Мирошниченко С.Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.
5. 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.
6. Пискунов М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
7. Пискунов М.Е., Нгуен Ван Дау. Метод высокоточного тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1971. – № 6. – С. 37–48.
8. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. Технологическая схема геодезического обеспечения реконструкции гидрогенератора // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 46–52.
9. Хорошилова Ж.А., Хорошилов В.С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 77–80.
10. Прогноз деформаций с использованием функций показательного многочлена / В.А. Середович, Р. Эхигиатор-Иругхе, О.М. Эхигиатор, Х. Ориакхи // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 148–155.
11. Сальников В.Г. Геодезические работы при возведении градирен большой высоты // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 72–77.
12. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. Совершенствование схем планового обоснования для определения горизонтальных смещений гидротехнических сооружений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 97–100.
13. Басаргин А.А. Анализ деформаций фундаментов промышленных сооружений с применением геостатистических методов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 201–206.
14. Басаргин А.А. Вариограммный и ковариационный анализ результатов наблюдений за осадками фундаментов инженерного сооружения // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 13–18.
15. Лесных Н.Б., Лесных Г.И., Малиновский А.Л. Предельные ошибки измерений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 26–32.
16. Результаты комплексных геодезическо-гравиметрических наблюдений на геодинамическом полигоне Спорышевского месторождения / В.А. Середович, А.И. Каленицкий, Э.Л. Ким, М.Д. Козориз // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 12–15.