

УДК 528.024.4

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-6-33-47

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЕЕРООБРАЗНОГО ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

*Георгий Афанасьевич Уставич*

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

*Антон Викторович Никонов*

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

*Иван Абиб оглы Мезенцев*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (923)241-80-42, e-mail: vania.mezentzew@yandex.ru

*Елена Алексеевна Олейникова*

Сибирская государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, e-mail: panasenkoelena@mail.ru

В статье рассматривается методика веерообразного инженерно-геодезического нивелирования, выполняемого тригонометрическим способом. Сущность данной методики заключается в проложении нивелирного хода тригонометрическим способом с одновременным нивелированием нескольких точек на станции. Предлагаемая методика инженерно-геодезического нивелирования может быть применена при определении высотного положения строительных конструкций, установке закладных деталей, выверке технологического оборудования, наблюдении за деформационными процессами, а также при обеспечении монтажа и эксплуатации подкрановых путей мостовых кранов. Реализация данной методики позволяет определять высотное положение точек, находящихся на разных горизонтах. Достоинством предлагаемой методики является выполнение нивелирования при значительном неравенстве плеч, а также возможность выбора нивелирной станции с минимальным влиянием возмущающих воздействий.

**Ключевые слова:** тригонометрическое нивелирование, тахеометр, нивелирная станция, нивелирный ход, профильные линии, разность плеч, ошибка измерений

### *Введение*

В настоящее время при установке строительных конструкций и закладных деталей, выверке технологического оборудования по высоте и наблюдении за вертикальными деформациями сооружений в подавляющем большинстве случаев применяется геометрическое инженерно-геодезическое нивелирование различной точности, выполняемое способом из середины [1]. Веерообразное нивелирование применяется, как правило, для работ технической точности, например, при высотной съемке надземных крановых путей.

Недостатками геометрического нивелирования являются необходимость обеспечения видимости на рейку при горизонтально расположенной визирной оси и соблюдение допустимой величины неравенства плеч на станции, поэтому в условиях действующего предприятия приходится затрачивать много времени на выбор нивелирной станции. Однако часто из-за наличия технологического оборудования обеспечение этих требований оказывается невозможным и приходится делать переходные точки, что увеличивает объем работ.

В то же время многочисленными исследованиями [2–9] установлено, что применение

современных тахеометров, обеспечивающих среднюю квадратическую ошибку (СКО) измерения углов наклона  $m_\alpha$  (1,0–2,0") и расстояний  $m_S$  (1,0–2,0 мм), позволяет тригонометрическому нивелированию конкурировать по точности с геометрическим. Например, при длине плеч до 10,0 м СКО измеренного на станции превышения составит не более 0,15–0,20 мм [10, 11]. При соблюдении ряда требований тригонометрическое нивелирование может соответствовать по точности нивелированию III и IV классов [12].

Обеспечение высотного положения строительных конструкций и технологического оборудования при их монтаже зачастую осуществляется при разных длинах (до 5–10 м) визирного луча, при этом требуется достаточно высокая точность определения их высотного положения. Так, СКО определения высотного положения закладных деталей фундамента турбоагрегата должна быть не более 0,50 мм. Длина фундамента может достигать 60,0 м, а в период строительства, когда помехами для измерений являются щиты опалубки, перепады высот, сварочные и прочие виды работ, очевидно, что нивелирование при установке в проектное положение множества закладных деталей приходится выполнять при значительном неравенстве плеч. При величине угла  $i = 10,0''$  и неравенстве плеч 8,0–10,0 м ошибка, обусловленная только

этим фактором, будет равна 0,39–0,48 мм, что, с учетом других источников ошибок, не обеспечит необходимую точность установки закладных деталей.

На основании сказанного целесообразным является применение для выполнения измерений в таких условиях высокоточных тахеометров и реализация ими веерообразного способа нивелирования.

### Методы решения

Рассмотрим методику веерообразного тригонометрического нивелирования короткими лучами, реализация которой позволит выполнять измерения практически без потери точности в стесненных условиях, при значительной разности плеч, влиянии вибрации и резкого перепада температур.

*Обеспечение монтажа технологического оборудования.* Итак, пусть требуется определить высотное положение целого ряда элементов строительных конструкций (закладных деталей) или частей устанавливаемого оборудования (рис. 1). В этом случае необходимо:

- проложить нивелирный ход между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$  внешнего или внутреннего обоснования;
- выполнить нивелирование разбивочных точек (углов закладных деталей  $K, L, M, N$  и  $P$ ) 1, 2, 3, ...,  $n$ .

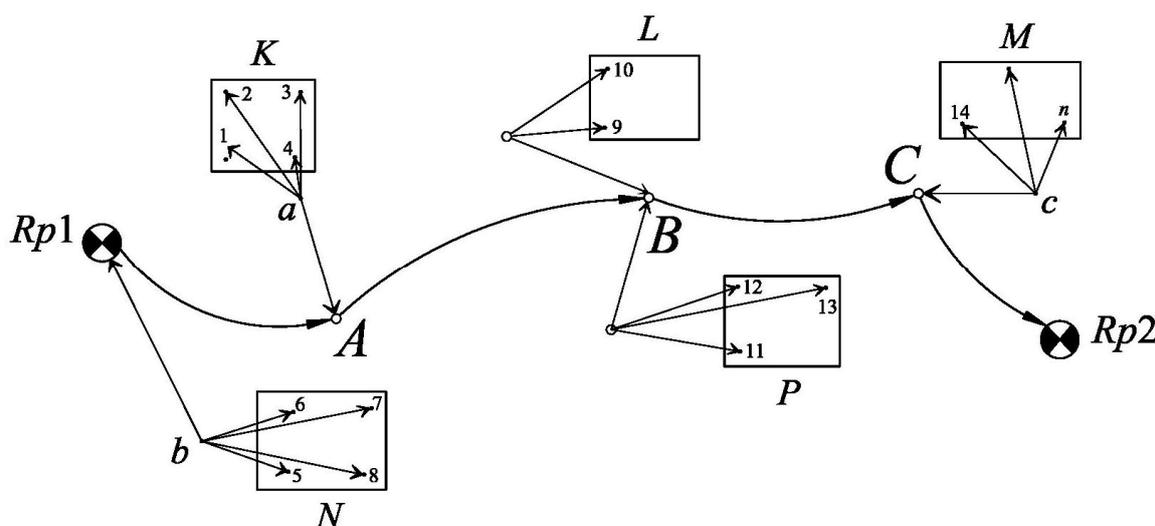


Рис. 1. Схема выноса разбивочных точек закладных частей геометрическим нивелированием

При использовании геометрического нивелирования короткими лучами данные работы должны выполняться в следующей последовательности. Сначала между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$  с использованием переходных точек  $A$ ,  $B$ , и  $C$  прокладывается и уравнивается нивелирный ход. Затем нивелиром с использованием реперов и переходных точек способом из середины или веерообразным способом (если позволяет точность) производится вынос (определение) высотных отметок точек  $1, 2, 3, \dots, n$ , в нашем случае углов закладных деталей  $K, L, M, N$  и  $P$ . Для повышения точности нивелирования углы закладных частей должны быть тщательно зачищены.

Однако в условиях возведения инженерного сооружения данная последовательность реализуется далеко не всегда. Как правило, сначала относительно  $Rp1$  определяется отметка только переходной точки  $A$ , а затем от нее (со станции  $a$ ) уже выносятся отметки разбивочных точек, например,  $1, 2, 3$  и  $4$  закладной части  $K$ . Вынос отметок точек  $5, 6, 7$  и  $8$  другой закладной детали  $N$  можно выполнить относительно репера  $Rp1$  (со станции  $b$ ) или переходной точки  $A$ . После этого через некоторое время относительно уже переходной точки  $A$  определяется отметка следующей переходной точки  $B$  с последующим выносом в натуру отметок разбивочных точек  $9-13$  закладных деталей  $L$  и  $P$ . Очевидно, что в данном случае не прокладывается весь нивелирный ход и не производится его уравнивание, а последовательно используются висячие станции. Аналогично относительно  $Rp2$  выносятся переходная точка  $C$ , от которой (со станции  $c$ ) производится вынос в натуру отметок ближайших разбивочных точек.

Применение для данных целей тригонометрического нивелирования позволяет значительно упростить вынос разбивочных точек в натуру, так как можно увеличить неравенство плеч на станции, а также и в нивелирном ходе с сохранением необходимой точности измерений, что является важным фактором в условиях загруженности мест выполнения работ технологическим оборудованием, например, монтажной площадки турбоагрегата. Возможность увеличения неравенства плеч обусловлена тем, что место нуля (МО), определенное в резуль-

тате поверки, заносится в память электронного тахеометра и учитывается при измерении углов наклона. Для контроля постоянства МО необходимо периодически повторять выполнение поверки, особенно при резких перепадах температуры. При выполнении наиболее ответственных работ для исключения влияния непостоянства МО целесообразно выполнять измерения при двух положениях круга. Практика выполнения тригонометрического нивелирования показывает, что при незначительном, до  $3-5^\circ\text{C}$ , изменении температуры колебание МО не превышает  $2,0''$ .

Рассмотрим схемы выполнения тригонометрического нивелирования для решения указанной выше задачи. При реализации первой схемы (рис. 2) между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$  способом из середины при двух кругах прокладывается (как и при геометрическом нивелировании) нивелирный ход с последующим его уравниванием и вычислением отметок закрепленных переходных точек  $A, B$  и  $C$ . Для повышения точности измерения превышений используется безотражательный режим с визированием на отражательные пленки, закрепленные на рейке [7]. Применение рейки с надежно и правильно закрепленной пяткой позволяет однозначно устанавливать ее на точки нивелирования, а отражательных пленок – повысить точность визирования.

После этого тахеометр устанавливается в произвольной точке  $a$  и относительно переходной точки  $A$  выставляются в проектное положение углы  $1, 2, 3, \dots, 8$  закладных деталей  $K$  и  $N$  фундамента. Выставление в проектное положение может производиться способом из середины или веерообразным способом. Для выставления в проектное положение остальных закладных деталей тахеометр поочередно устанавливается в точках  $b$  и  $c$ , с которых и производится вынос отметок в натуру. При реализации первой схемы возможно комбинирование двух методов: ход между реперами прокладывается геометрическим нивелированием, а непосредственные разбивочные работы выполняются тригонометрическим нивелированием.

При реализации второй схемы (рис. 3) отдельно нивелирный ход между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$  не прокладывается и измерения выполняются в следующей последовательности.

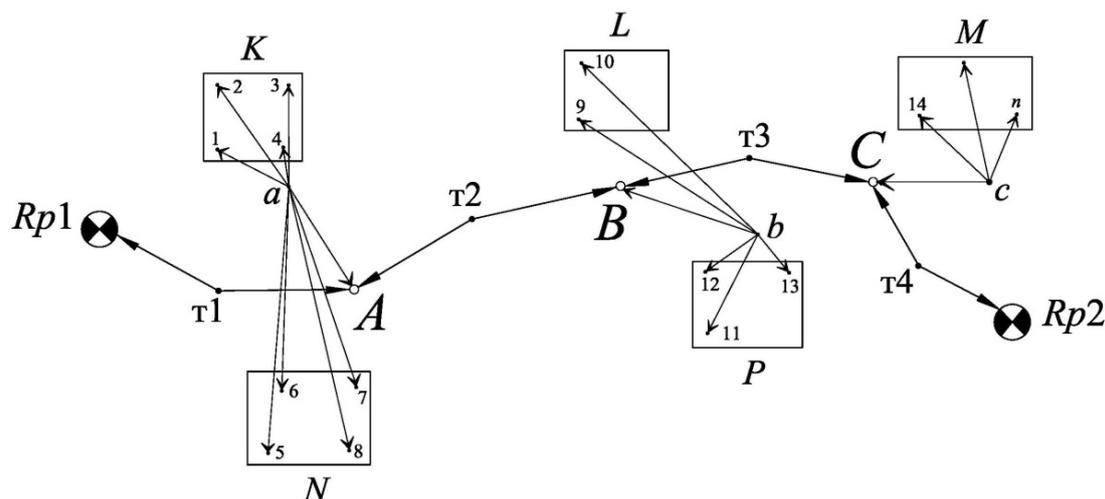


Рис. 2. Схема выноса разбивочных точек тригонометрическим нивелированием при проложении хода между реперами (первая схема)

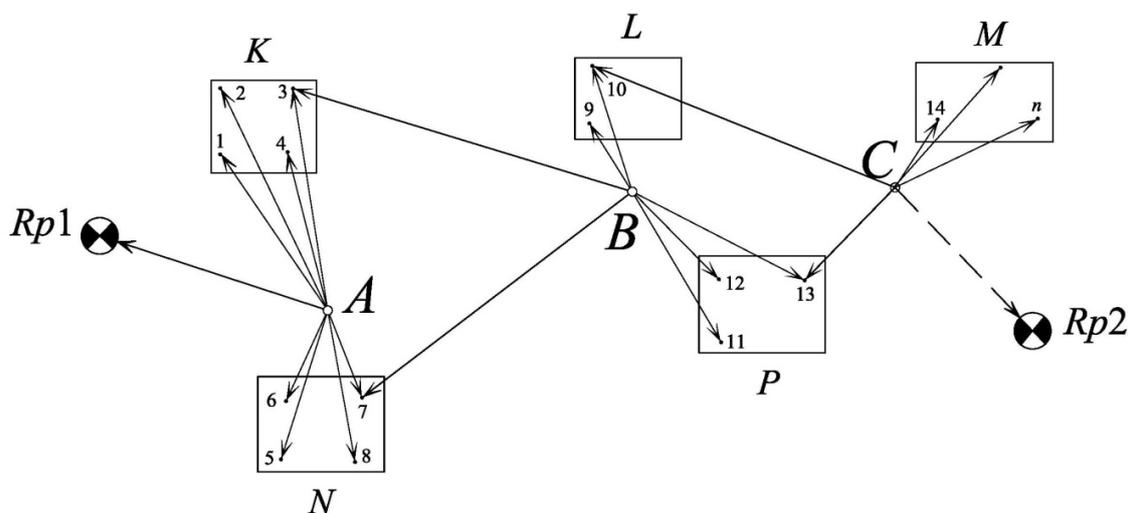


Рис. 3. Схема выноса разбивочных точек тригонометрическим нивелированием без предварительного проложения хода между реперами (вторая схема)

В точке  $A$  устанавливается тахеометр и методом обратного тригонометрического нивелирования относительно  $Rp1$  определяется горизонт инструмента (отметка оси вращения зрительной трубы) [13]. Визирование выполняется на отражательную пленку, закрепленную на рейке, измерения выполняются при двух положениях круга и двумя приемами (в тахеометрах Leica используется установка станции в режиме «Передача отметки»). Затем при круге слева выполняется установка в проектное положение по высоте закладных деталей  $K$  и  $N$  по угловым точкам 1, 2, 3, ..., 8. После выверки деталей следует произвести контрольные измерения при круге право.

Для выставления в проектное положение углов 9, 10, 11, ..., 13 закладных частей  $L$  и  $P$  тахеометр устанавливается в точке  $B$ . Теперь горизонт инструмента определяется обратным тригонометрическим нивелированием относительно ранее вынесенных точек 3 и 7 также при двух положениях круга, двумя приемами. При установке станции в режиме «Передача отметки» от двух точек (3 и 7) оценка точности определения горизонта инструмента производится микрокомпьютером тахеометра непосредственно в поле.

Наконец, для установки в проектное положение закладной детали  $M$  тахеометр устанавливается в точке  $C$ , обратным тригономет-

рическим нивелированием относительно точек 10 и 13 определяется его горизонт, после чего выполняется разбивка. После установки по высоте закладной детали  $M$  выполняется замыкание своеобразного «хода» путем визирования на репер  $Rp2$ .

Таким образом, при использовании данной схемы измерений нивелирный ход между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$  прокладывается новым способом нивелирования – обратным тригонометрическим нивелированием, а установка в проектное положение закладных деталей или оборудования осуществляется способом из середины или веерообразным способом. В данном случае также определяется невязка в ходе, однако распределить ее согласно принятому правилу невозможно, так как точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  не закрепляются. Уравнивание хода производится в следующей последовательности:

- вычисляется невязка в ходе между реперами  $Rp1$  и  $Rp2$ , а также поправки в отметки (в горизонт инструмента) переходных точек  $A$ ,  $B$  и  $C$ ;

- полученные поправки вводятся в отметки горизонтов инструмента;

- вычисляются исправленные отметки точек 1, 2, 3, ...,  $n$  закладных деталей;

- при необходимости с учетом исправленных отметок производится исправление (рихтовка) положения закладных деталей.

*Определение деформаций инженерных сооружений и оборудования.* Следующей областью применения тригонометрического нивелирования веерообразным способом является определение вертикальных деформаций (или перемещений) инженерных сооружений и технологического оборудования [14–16].

С учетом сказанного рассмотрим требования, которые необходимо выполнять с целью получения требуемой точности измерений. В работах [10, 11] рассматриваются требова-

ния, предъявляемые к тригонометрическому нивелированию I, II, III, IV и V разрядов, выполняемого только способом из середины с определенным ограничением неравенства плеч на станции. Очевидно, что для получения точности тригонометрического нивелирования I разряда веерообразным способом требуется соблюдение ряда условий. В частности, необходимо выполнить исследование тахеометра и убедиться, что перефокусирование зрительной трубы не оказывает существенного влияния на положение визирной оси, в частности, на МО.

Применительно к выполнению разрядного нивелирования веерообразным способом установим дополнительные требования:

- конструкция визирных целей должна обеспечивать качественное наведение на них в условиях недостаточной освещенности;

- колебания МО, не связанные с влиянием внешних факторов, не должны в процессе работы превышать 2,0–3,0'';

- необходимо проводить повторную проверку МО с записью результатов в память прибора в случаях, когда в процессе выполнения нивелирования значительно изменяется температура окружающего воздуха (свыше 10 °С);

- необходимо тщательно выбирать место установки тахеометра, так как при значительной разности плеч в производственных условиях возможно влияние локальных конвекционных потоков воздуха на прохождение визирного луча.

В связи с тем, что при выполнении обратного тригонометрического нивелирования определяется горизонт инструмента, вычислим СКО его высотного положения из одного полного приема. В отличие от геометрического нивелирования примем за ошибку взгляда  $m_{взгл}$  СКО превышения, измеренного на одну рейку одним полным приемом и вычисляемую по формуле [10]:

$$m_{взгл} = \sqrt{m_S^2 \sin^2 \alpha + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S^2 \cos^2 \alpha + m_p^2 + m_{виз}^2 + m_{вн}^2 + m_{шт}^2}, \quad (1)$$

где  $m_\alpha$  – ошибка измерения угла наклона (инструментальная);

$m_S$  – ошибка измерения наклонного расстояния;

$m_p$  – ошибка, обусловленная влиянием наклона визирной цели (рейки);

$m_{виз}$  – ошибка визирования;

$m_{вн}$  – ошибка, вызванная влиянием внешних условий;

$m_{шт}$  – ошибка, вызванная возможным вертикальным перемещением системы «штатив-тахеометр».

Вообще говоря, ошибка визирования входит в ошибку собственно измерения угла наклона  $m_\alpha$  [17]. Действительно, при определении в лабораторных условиях СКО измерения вертикального угла выполняют многократные измерения испытуемым угломерным прибором, после чего сравнивают полученный результат с эталонным значением [18]. Однако СКО одного визирования с помощью биссектора в полевых условиях может возрасти в 2-3 раза по сравнению с лабораторными условиями [19]. Несмотря на то, что данный вывод сделан применительно к триангуляционным теодолитам, будет справедливым считать, что в условиях производственного цеха ошибка визирования будет больше, чем в лабораторных условиях, и требует дополнительного учета.

В случае, когда веерообразное нивелирование выполняется сначала по всем маркам сначала при круге слева, а потом при круге справа, в подкоренном выражении формулы (1) добавится еще одно слагаемое  $m_{мо}$ , обусловленное непостоянством места нуля.

Ошибка угла наклона, обусловленная влиянием наклона визирной цели, вычисляется по формуле [16]:

$$\Delta\alpha = \frac{l\varepsilon^2}{2S\rho} \cos^2 \alpha + \frac{l\varepsilon}{2S} \sin 2\alpha + \frac{a\varepsilon}{S} \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

Зависимость СКО измерения превышения тахеометром в зависимости от угла наклона, точности его измерения и длины визирного луча

$m_\alpha$	Средняя квадратическая ошибка превышения, мм, при угле наклона								
	$\alpha = 5^\circ$			$\alpha = 10^\circ$			$\alpha = 15^\circ$		
	5 м	10 м	20 м	5 м	10 м	20 м	5 м	10 м	20 м
2''	0,19	0,20	0,26	0,24	0,25	0,30	0,31	0,32	0,36
3''	0,19	0,23	0,34	0,25	0,28	0,37	0,31	0,33	0,41
5''	0,22	0,30	0,52	0,26	0,33	0,53	0,33	0,38	0,56

Как видно из таблицы, СКО определения положения горизонта инструмента при работе с 2-секундным тахеометром находится в пределах от 0,19 до 0,36 мм.

К влиянию внешних условий можно отнести воздействие вибрации на систему «штатив – тахеометр» и турбулентность воздуха от работающего оборудования, что приводит

где  $l$  – высота визирования;

$\varepsilon$  – угол наклона рейки;

$\alpha$  – угол наклона визирного луча;

$a$  – величина несовпадения высотной точки с осью рейки (возникает, когда рейка устанавливается на точку не центром пятки, а со смещением).

Для высоты прибора 1,6 м и длины визирного луча 10 м рассмотрим два расчетных примера. В первом случае  $l = 200$  мм,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\varepsilon = 300''$  и  $a = 10,0$  мм; получим  $\Delta\alpha = 1,1''$ . Во втором случае будем наводиться на цель с высотой  $l = 1500$  мм, тогда угол наклона составит  $\alpha = 0,5^\circ$ , а ошибка  $\Delta\alpha = 0,7''$ . Как видим, ошибка за наклон цели в пределах 5' приводит к ошибке в угле наклона около 1,0'', что для рассматриваемого расстояния в 10 м составляет в линейной мере пренебрежимо малую величину 0,05 мм.

Величина ошибки визирования в угловой мере при увеличении зрительной трубы 30 $\times$  равна 1,0–2,0'' [19], что при расстоянии 20 м составит в линейной мере 0,1–0,2 мм. Подставляя в формулу (1) величины  $m_s = 1,0$  мм,  $m_p = 0,05$  мм,  $m_{виз} = 0,15$  мм, проследим, как зависит точность превышения из тригонометрического нивелирования в зависимости от угла наклона, точности его измерения и длины визирного луча; результаты представлены в таблице.

к ухудшению качества визирования на рейку или отражательную пленку. Кроме того, при длительной работе на станции (20 и более минут) под влиянием вибрации система «штатив – тахеометр» может иметь вертикальное перемещение и, следовательно, дополнительно будет изменяться горизонт инструмента (до 0,50 мм) [10]. Поэтому при выборе

места установки штатива необходимо уделять внимание стабильности его положения в течение всего времени работы на станции.

После определения из обратного тригонометрического нивелирования горизонта тахеометра производится вынос в натуру разбивочных точек, т. е. реализуется нивелирование способом из середины. Отличие состоит в том, что при рихтовке закладной детали повторные измерения выполняются лишь на переднюю цель, т. е. горизонт инструмента считается неизменным.

Для вычисления превышения на станции необходимо из превышения на переднюю цель (закладную деталь) вычесть превышение на заднюю цель (известную точку):

$$h_{ст} = h_{II} - h_3 = S_{II} \sin \alpha_{II} - S_3 \sin \alpha_3. \quad (3)$$

В этом случае при выполнении измерений полным приемом СКО выноса в натуру высотной точки будет характеризоваться ошибкой:

$$m_{h_{ст}} = m_{взгл} \sqrt{2}. \quad (4)$$

Таким образом, для перехода к СКО измерения превышения на станции значения из таблицы должны быть умножены на  $\sqrt{2}$ . Стоит обратить внимание, что при работе с электронным тахеометром нет необходимости использовать формулу (3). Найденный горизонт инструмента (высота вращения зрительной трубы) остается в памяти тахеометра, а после измерения  $h_{II}$  автоматически вычисляется отметка выносимой точки, которую остается сравнить с проектным значением. Данное обстоятельство заметно ускоряет процесс разбивки, избавляя инженера-геодезиста от дополнительных вычислений.

При выполнении геометрического нивелирования, с целью значительного ослабления оседания системы «штатив – нивелир», а также изменения угла  $i$ , применяется симметричная программа наблюдений на станции (ЗППЗ и ПЗЗП) [20]. Применительно к веерообразному тригонометрическому нивелированию может быть реализовано три программы наблюдений.

*Первая программа.* Наблюдения на станции  $A$  (см. рис. 3) производятся по схеме, при

которой отсчеты на точки производятся сразу при двух положениях круга:

- визирование на  $Rp1$  при КЛ и КП, т. е. определение горизонта инструмента;
- последовательное визирование на определяемые точки  $1_{(КЛ+КП)}$ ,  $2_{(КЛ+КП)}$ ,  $3_{(КЛ+КП)}$ , ...,  $8_{(КЛ+КП)}$ ;
- контрольное визирование (замыкание) на  $Rp1$ .

*Вторая программа.* Наблюдения на станции  $A$  производятся сначала по ходу часовой стрелки, а затем против ее хода:

- по ходу часовой стрелки при КЛ:  $Rp1$ , 1, 2, 3, ..., 8,  $Rp1$ ;
- против хода часовой стрелки при КП:  $Rp1$ , 8, ..., 3, 2, 1,  $Rp1$ .

*Третья программа.* Наблюдения выполняются при одном положении круга (КЛ) с выполнением двух наведений на визирную цель. Измерения при двух кругах выполняются только при визировании на  $Rp1$  (в начале и при замыкании горизонта) с целью контроля постоянства МО в процессе работы на станции.

При реализации всех трех программ выполняется повторное наведение на начальную точку с целью контроля оседания системы «штатив – тахеометр».

Рассмотрим возможные схемы проложения нивелирных ходов веерообразным способом, подходящие для наблюдений на промплощадках. Если осадочные марки располагаются по внешнему периметру инженерных сооружений, например, зданий на территории энергопредприятий или на резервуарах нефтепродуктов, градирнях, дымовых трубах и т. д., то целесообразно применять схемы ходов, показанные на рис. 4 и 5. При их реализации привязка может производиться к одному реперу  $Rp1$ , и тогда образуется свободная сеть, или к нескольким реперам (например,  $Rp1$  и  $Rp2$  на рис. 5).

На объектах энергетики (ТЭС, ГРЭС) осадочные марки устанавливаются внутри здания главного корпуса (на колоннах каркаса здания), на наружных стенах, когда доступ к колоннам внутри здания ограничен, а также на технологическом оборудовании (фрагменты турбин, мельниц, стойки котлов и т. д.). Схема нивелирования в таком случае имеет вид, показанный на рис. 6.

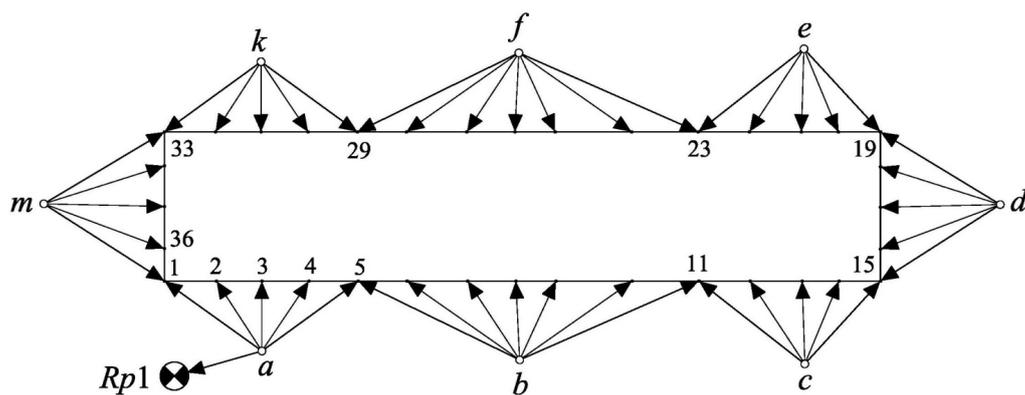


Рис. 4. Схема веерообразного тригонометрического нивелирования по внешним маркам 1–36 здания

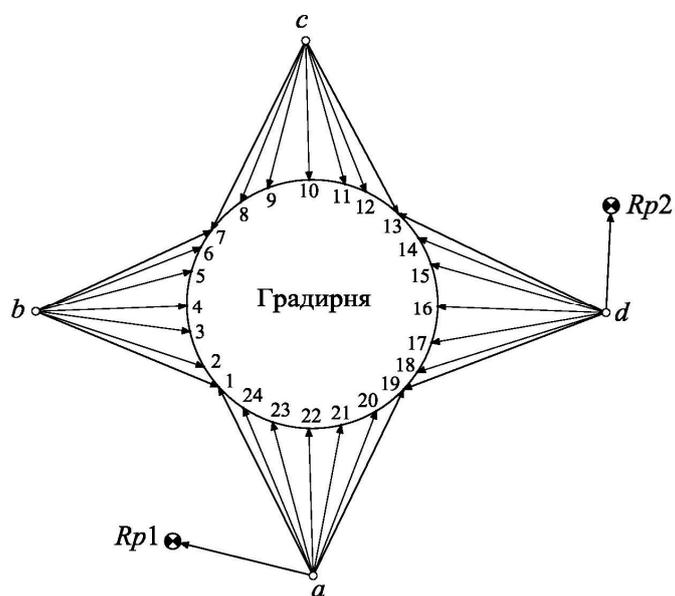


Рис. 5. Схема веерообразного тригонометрического нивелирования на примере башенной градирни

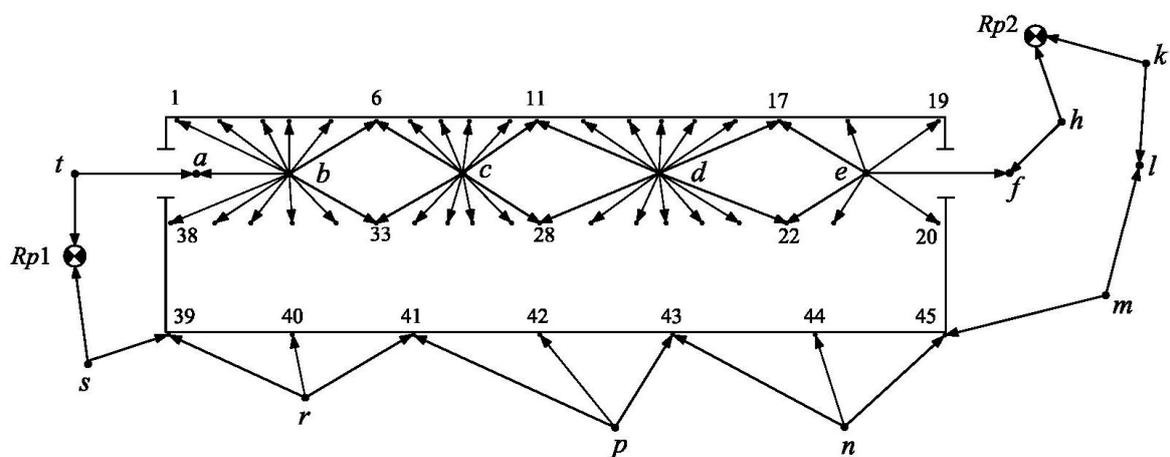


Рис. 6. Схема веерообразного тригонометрического нивелирования по внутренним (1–38) и внешним (39–45) осадочным маркам здания

Осадочные марки 1–38 установлены внутри здания, а марки 39–45 – в несущих конструкциях здания, снаружи. Осадочные марки устанавливаются на высоте 0,4–0,8 м от уровня отмостки или пола – это обеспечивает удобство геометрического нивелирования с применением метровой рейки [21, 22]. Опыт показывает, что при проведении контрольных циклов измерений осадок фундаментов раз в пять лет потери осадочных марок на ТЭС с типовой компоновкой оборудования составляют 15 % [23]. Т. е. при числе марок на объекте 500 шт. за пять лет эксплуатации может быть уничтожено или закрыто около 70 шт.

В связи с этим наравне со стандартными осадочными марками предлагается устанавливать дублирующие марки в виде отражательных пленок. Последние целесообразно закреплять на высоте 2,0–2,5 м, что обеспечит их сохранность и удобство наблюдений. Важно отметить, что отметки нижнего и верхнего рядов марок определяются единожды –

в первом цикле измерений, это позволяет определить превышения  $l$  между каждой парой марок, которые являются постоянными. В этом случае при повреждении стандартной стеновой марки, закрепленной на высоте 0,4 м, может быть использована марка в виде пленки на высоте 2,0 м. Для обеспечения преемственности измерений при вычислении осадки от полученной отметки верхней марки отнимается постоянная  $l$ .

Следующим важным моментом является сущность обработки результатов веерообразного тригонометрического нивелирования, так как по его завершении требуется оценить качество выполненных измерений, которое обычно производится по величине невязки в ходе. При выполнении геометрического нивелирования невязка находится как сумма превышений в замкнутом полигоне. В нашем же случае результатом измерений являются превышения между осью вращения зрительной трубы тахеометра и центром визирной цели (рис. 7, а).

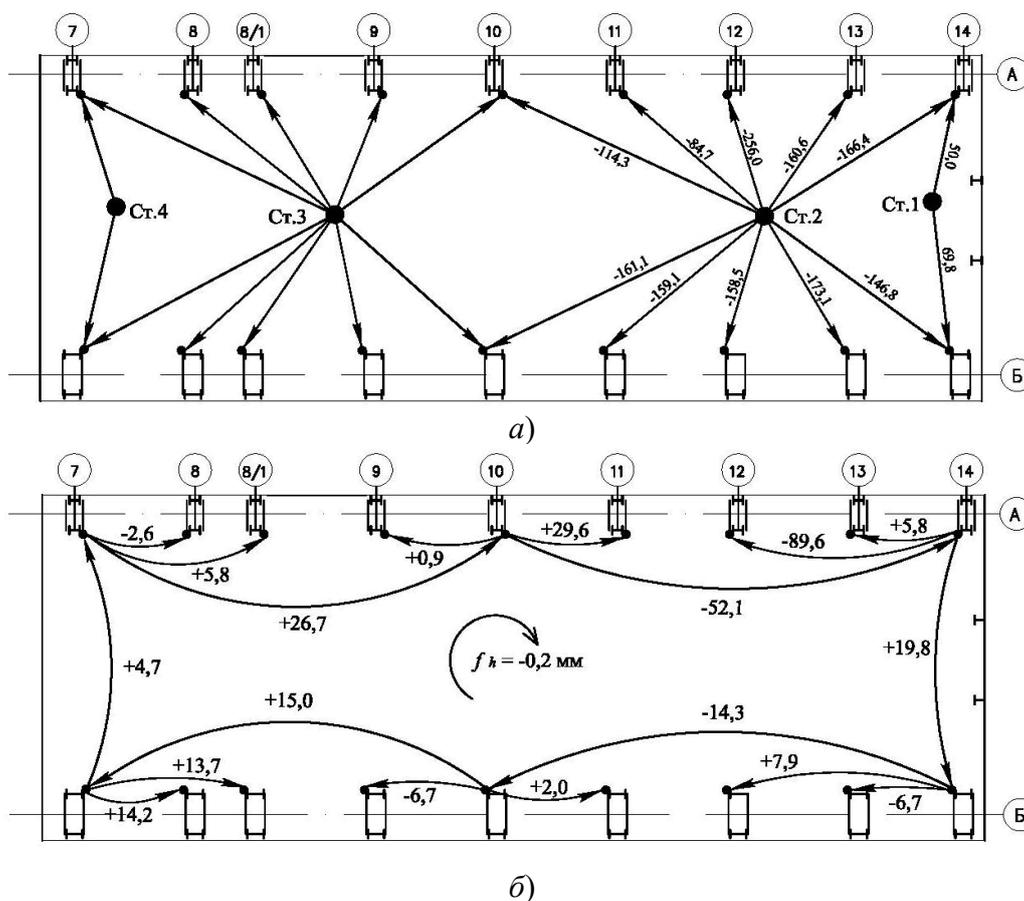


Рис. 7. Схемы:

а) первичных результатов веерообразного тригонометрического нивелирования; б) схема нивелирования после обработки

Для получения привычной схемы нивелирования с указанием превышений между осадочными марками необходимо произвести вычисления по формуле (3). Следует иметь в виду, что превышения, полученные при работе тахеометром на одной станции, например, станции 2, являются зависимыми. Действительно, если по данным рис. 7, а вычислить превышения между колоннами А/10, А/14, Б/14, Б/10, их сумма всегда будет равна нулю, даже если в одном из измерений будет допущена грубая ошибка. Для получения более надежной оценки точности по невязке в полигоне целесообразно отдельные превышения измерять независимо – с других станций (станция 1, станция 4 на рис. 7, а).

Наблюдения за деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях осуществляются путем периодического нивелирования исходных и опорных реперов профильных линий, а также путем измерения расстояний между реперами. Согласно инструкции [24] для определения сдвижения реперов в вертикальной плоскости периодически производится геометрическое нивелирование с длиной визирного луча до 75 м, что должно обеспечить соответствие получаемых результатов точности нивелирования III класса. Действительно, при средней величине оседания земной поверхности 70 мм/год допустимая СКО определения этого параметра составляет 14 мм,

а СКО определения отметки репера в отдельном цикле – 10 мм. В зависимости от длины профильной линии достаточно точности нивелирования III–IV классов.

Инструкцией [24] допускается применение и тригонометрического нивелирования с длиной визирного луча до 200 м. Сегодня, благодаря применению электронных тахеометров, данный метод может получить широкое распространение при реализации разнообразных схем измерений, что особенно актуально для пересеченной и холмистой местности.

Веерообразное тригонометрическое нивелирование при наблюдениях за деформациями земной поверхности предлагается выполнять по одной из двух технологических схем:

- двухстороннее тригонометрическое нивелирование по опорным реперам профильных линий с выполнением измерений на боковые точки веерообразным способом при длине визирного луча до 100 м;

- тригонометрическое нивелирование способом из середины по основным реперам профильной линии со съемкой боковых точек (для уменьшения влияния вертикальной рефракции расстояние до боковых точек должно быть сопоставимо с длинами плеч в основном ходе).

Рассмотрим более подробно порядок реализации первой технологической схемы (рис. 8).

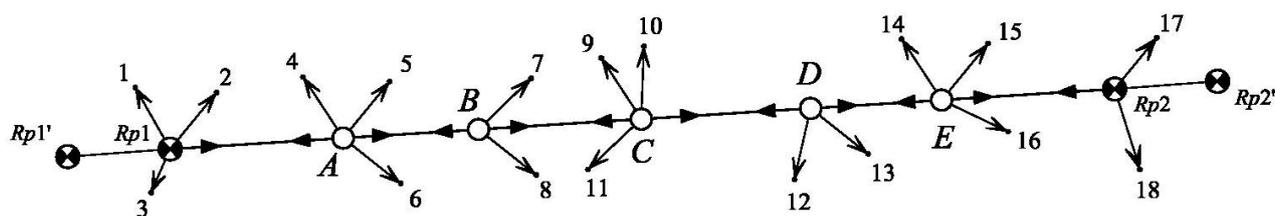


Рис. 8. Схема двухстороннего тригонометрического нивелирования по реперам профильной линии

По рабочим реперам А–Е прокладывается ход двухстороннего тригонометрического нивелирования, опирающийся на исходные реперы Rp1 и Rp2. Методика нивелирования подробно изложена в статье [25]. Длина сторон в высотном ходе не должна превышать 300 м. Если рабочие реперы расположены на

профильной линии с большей частотой, то их отметки определяются веерообразным способом, как и контрольные точки 1–18. В качестве точек 1–18 могут выступать стенные марки, закрепленные на несущих конструкциях наблюдаемых зданий и сооружений, а также грунтовые реперы, располагаемые

вдоль стен зданий напротив ственных марок на расстоянии 2–3 м от фундамента [24]. Расстояние до контрольных точек 1–18 (см. рис. 8) не должно превышать 100–150 м. Измерения на контрольные точки следует выполнять двумя приемами с допустимым расхождением между превышениями 3 мм.

При реализации второй схемы (рис. 9) проложение основного хода по рабочим реперам *A, B, C, D, E* профильной линии производится с установкой тахеометра в точках *a, b, c, ... k*, с условием соблюдения равенства плеч. Нивелирование способом из середины выполняется по методике, изложенной в статье [12]. Одновременно с проложением основного хода веерообразным способом выполняются

измерения на контрольные точки 1–14. Расстояния до контрольных точек должны с точностью 20–30 м равняться длине плеч основного хода на данной станции. Например, применительно к станции *c* должно соблюдаться условие:  $cA = cB \approx c4 \approx c5 \approx c6$  (рис. 9).

Как правило, профильные линии проектируют таким образом, чтобы они располагались как вкрест простирания, так и по простиранию пласта [24]. На рис. 10 красным цветом показана схема двух пересекающихся профильных линий, реализуемая на одном из объектов [26]. Практика показывает, что применение тригонометрического нивелирования востребовано не только в инженерной геодезии, но и в маркшейдерском деле [26–28].

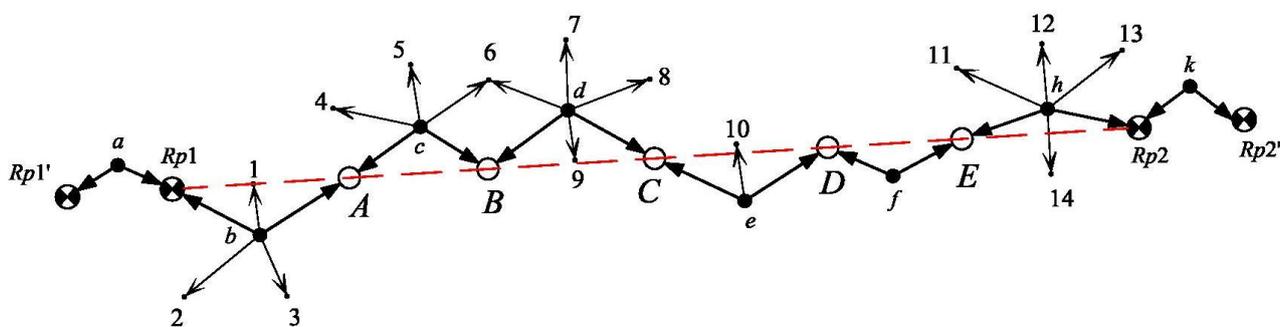


Рис. 9. Схема тригонометрического нивелирования из середины по реперам профильной линии

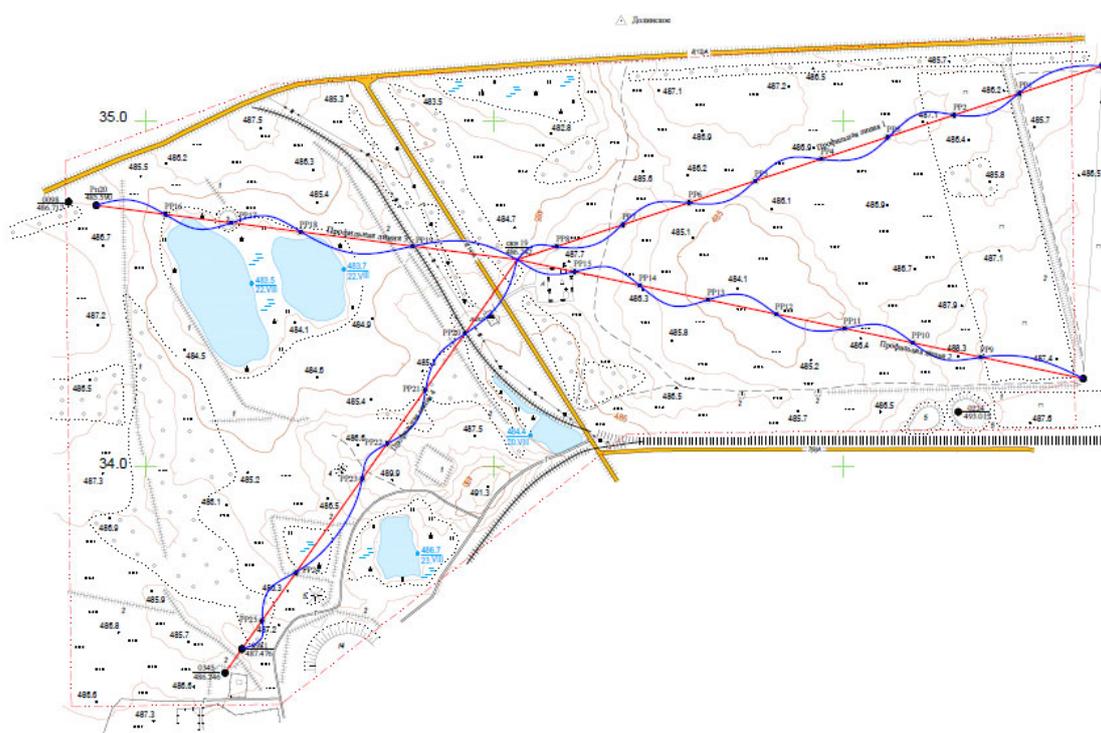


Рис. 10. Схема пересекающихся профильных линий [26]

### Выводы

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение веерообразного тригонометрического нивелирования короткими лучами при наблюдениях за осадками и деформациями инженерных сооружений повышает производительность труда, делает процесс измерений более мобильным;
- при работе в производственных цехах рекомендуется устанавливать дублирующие

марки на несущих конструкциях (колоннах и пр.) в виде отражательных пленок на высоте двух метров, что обеспечит преимущество геодезических измерений при повреждении основных осадочных марок;

- веерообразное тригонометрическое нивелирование может быть применено для обеспечения монтажа элементов строительных конструкций и технологического обслуживания, а также при определении вертикальных деформаций подрабатываемых территорий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уставич Г. А., Демин С. В., Шалыгина Е. Л., Пошивайло Я. Г. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования // Геодезия и картография. – 2004. – № 7. – С. 6–13.
2. Rueger J. M., Brunner F. K. Practical results of EDM-height traversing // The Australian Surveyor. – 1981. – Vol. 30, № 6. – P. 363–372.
3. Chrzanowski A. Implementation of trigonometric height traversing in geodetic leveling of high precision. Technical report № 142. – Canada : University of New Brunswick, 1989.
4. Hibbert R. J. Practical EDM height traversing to geodetic levelling accuracies as used in a geophysical monitoring scheme // Survey Review. – 1992. – Vol. 31 (246). – P. 434–453.
5. Ворошилов А. П. Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами // Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2005. – № 13 (53). – С. 37–39.
6. Kovačič B., Kamnik R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements // Engineering modelling. – 2007. – № 20. – P. 77–84.
7. 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.
8. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
9. Павлов А. И. О применении тригонометрического нивелирования при определении деформации оснований зданий и сооружений // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – № 10. – С. 110–113.
10. 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.
11. Никонов А. В. Методика тригонометрического нивелирования первого и второго разрядов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 39–45.
12. 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.
13. Уставич Г. А., Никонов А. В., Бабасов С. А. Методика выполнения обратного тригонометрического нивелирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 51–56.
14. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л. : ВНИМИ, 1972. – 165 с.
15. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдения 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.

16. Пискунов М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М. : Недра, 1980. – 248 с.
17. Хейфец Б. С., Данилевич Б. Б. Практикум по инженерной геодезии. – М. : Недра, 1973. – 320 с.
18. ГОСТ 10529–96. Теодолиты. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
19. Конопальцев И. М. Высокоточные угловые измерения при изучении движений земной коры. – М. : Недра, 1978. – 144 с.
20. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л. : ВНИМИ, 1971. – 187 с.
21. СО 153-34.21.322–2003. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадками фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – М. : ЦПТИиТО ОРГРЭС, 2005. – 56 с.
22. ГОСТ 24846–2019. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М. : Стандартинформ, 2020. – 11 с.
23. Резанов А. А. О сохранности контрольно-измерительной аппаратуры на ТЭС // Геодезия и картография. – 1984. – № 10. – С. 20–21.
24. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях / Мин-во угольной пром-сти СССР: Утв. 30.12.87. Разраб. ВНИМИ; Состав.: И. А. Петухов, Н. И. Митичкина, В. Н. Земисев и др. – М. : Недра, 1989. – 96 с.
25. Аврунев Е. И., Уставич Г. А., Грекова А. О., Никонов А. В., Мелкий В. А., Долгополов Д. В. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 188–201.
26. Бесимбаева О. Г., Уставич Г. А., Олейникова Е. А. Мониторинг деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 1, № 1 – С. 82–91.
27. Гордеев В. А., Раева О. С. Сопоставление точности геометрического и тригонометрического нивелирования при создании маркшейдерских высотных сетей // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – № 6. – С. 79–84.
28. Щерба О. С. Методы тригонометрического нивелирования при маркшейдерских наблюдениях на профильных линиях // Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2011. – № 16 (233). – С. 53–55.

Получено 22.06.2021

© Г. А. Уставич, А. В. Никонов, И. А. Мезенцев, Е. А. Олейникова, 2021

## IMPROVEMENT OF THE METHOD OF FAN-SHAPED TRIGONOMETRIC LEVELING

### *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: ystavich@mail.ru

### *Anton V. Nikonov*

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

### *Ivan A. Mezentsev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Surveying, phone: (923)241-80-42, e-mail: vania.mezentzew@yandex.ru

**Elena A. Oleynikova**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Surveying, phone: (923)241-80-42, e-mail: panasenkoelena@mail.ru

The article deals with the method of fan-shaped engineering and geodetic leveling carried out with the trigonometric method. The essence of this technique is to lay a leveling stroke in a trigonometric way with simultaneous leveling of several points at the station. The proposed method of engineering and geodetic leveling can be applied to determine the height position of buildings, installing embedded parts, verifying technological equipment, monitoring deformation processes, as well as ensuring the installation and operation of crane tracks of overhead cranes. The implementation of this technique allows determining the altitude position of points located on different horizons. The advantage of the proposed method is the possibility to carry out leveling with a significant inequality of the shoulders, as well as the possibility of choosing a leveling station with minimal influence of disturbing factors.

**Keywords:** trigonometric leveling, total station, leveling station, leveling stroke, profile lines, shoulder difference, measurement error

## REFERENCES

1. Ustavich, G. A., Demin, S. V., Shalygina, E. L., & Poshivailo, Ya. G. (2004). Development and improvement of engineering and geodetic leveling technology. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 7, 6–13 [in Russian].
2. Rueger, J. M., & Brunner, F. K. (1981). Practical results of EDM-height traversing / J. M. Rueger. *The Australian Surveyor*, 30(6), 363–372.
3. Chrzanowski, A. (1989). Implementation of trigonometric height traversing in geodetic leveling of high precision. Technical report No. 142. Canada: University of New Brunswick.
4. Hibbert, R. J. (1992). Practical EDM height traversing to geodetic levelling accuracies as used in a geophysical monitoring scheme. *Survey Review*, 31(246), 434–453.
5. Voroshilov, A. P. (2005). Measurement of sediments of buildings and structures by electronic total stations. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Vestnik SUSU. Series: Construction and Architecture]*, 13(53), 37–39 [in Russian].
6. Kovačič, B., & Kamnik, R. (2007). Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements. *Engineering Modelling*, 20, 77–84.
7. Bepalov, Yu. I., Diakonov, Yu. P., & Tereshchenko, T. Yu. (2010). Observation of precipitation of buildings and structures by the method of trigonometric leveling. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 8, 8–10 [in Russian].
8. Nikonov, A. V. (2013). Investigation of the accuracy of trigonometric leveling by the method from the middle with the use of electronic total stations. *Vestnik SGGa [Vestnik SSGA]*, 2(22), 26–35 [in Russian].
9. 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 [Vestnik SIC Construction]*, 10, 110–113 [in Russian].
10. Ustavich, G. A., Rakhymberdina, M. E., Nikonov, A.V., & Babasov, S. A. (2013). Development and improvement of the technology of engineering and geodetic leveling by the trigonometric method. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 17–22 [in Russian].
11. Nikonov, A. V. (2015). The method of trigonometric leveling of the first and second categories. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 39–45 [in Russian].
12. Ustavich, G. A., Nikonov, A. V., Salnikov, V. G., Ryabova, N. M., & Gorilko, A. S. (2019). Methodology for performing leveling of classes III and IV by a trigonometric method. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 80(7), 2–11 [in Russian].
13. Ustavich, G. A., Nikonov, A.V., & Babasov, S. A. (2014). Method of performing inverse trigonometric leveling. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 51–56). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

14. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov stroyashchikhsya i ekspluatiruemyykh kar'erov* [Methodological guidelines for determining the angles of inclination of sides, slopes of ledges and dumps of quarries under construction and operated]. (1972). Leningrad: VNIMI Publ., 165 p. [in Russian].
15. Nikonov, A. V. (2013). Experience in the application of trigonometric leveling with the use of electronic total stations for monitoring the precipitation of structures. In *Sbornik materialov Interexpo 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: SSGA Publ. [in Russian].
16. Piskunov, M. E. (1980). *Metodika geodezicheskikh nablyudeniy za deformatsiyami sooruzheniy* [Methodology of geodetic observations of deformations of structures]. Moscow: Nedra Publ., 248 p. [in Russian].
17. Kheifets, B. S., & Danilevich, B. B. (1973). *Praktikum po inzhenernoy geodezii* [Practicum on engineering geodesy]. Moscow: Nedra Publ., 320 p. [in Russian].
18. GOST 10529–96. Theodolites. General technical conditions. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
19. Konopaltsev, I. M. (1978). *Vysokotochnye uglovye izmereniya pri izuchenii dvizheniy zemnoy kory* [High-precision angular measurements in the study of the movements of the Earth's crust]. Moscow: Nedra Publ., 144 p. [in Russian].
20. *Instruktsiya po nablyudeniyam za deformatsiyami bortov, otkosov, ustupov i otvalov na kar'erakh i razrabotke meropriyatiy po obespecheniyu ikh ustoychivosti* [Instructions for observing deformations of sides, slopes, ledges and dumps in quarries and developing measures to ensure their stability]. (1971). Leningrad: VNIMI, 187 p. [in Russian].
21. SO 153-34. 21. 322-2003. (2005). Methodological guidelines for the organization and conduct of observations of foundation sediments and deformations of buildings and structures under construction and operated thermal power plants. Moscow: TSPTIITO ORGRES Publ., 56 p. [in Russian].
22. GOST 24846-2019. (2020). Soils. Methods for measuring deformations of the bases of buildings and structures. Moscow: Standartinform Publ., 11 p. [in Russian].
23. Rezanov, A. A. (1984). On the safety of control and measuring equipment at TPP. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], 10, 20–21 [in Russian].
24. Instructions for observations of the displacement of rocks, the Earth's surface and part-time structures in coal and shale deposits (approved December 30, 1987). (1989). Moscow: Nedra Publ., 96 p. [in Russian].
25. Avrunev, E. I., Ustavich, G. A., Grekova, A. O., Nikonov, A.V., Melky, V. A., & Dolgopopolov, D. V. (2020). Technological solutions in the field of providing geospatial information about main pipelines and their infrastructure objects. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University], 331(7), 188–201 [in Russian].
26. Besimbaeva, O. G., Ustavich, G. A., & Oleynikova, E. A. (2019). Monitoring of the earth's surface deformations in the territories under development. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1, no. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 1, No. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 82–91). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
27. Gordeev, V. A., & Raeva, O. S. (2014). Comparison of the accuracy of geometric and trigonometric leveling in the creation of surveying high-altitude networks. *Izvustiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 6, 79–84 [in Russian].
28. Shcherba, O. S. (2011). Methods of trigonometric leveling in surveying observations on profile lines. *Vestnik YuUrGU. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Vestnik of SUSU. Ser. Construction and Architecture], 16(233), 53–55 [in Russian].

Received 22.06.2021

© G. A. Ustavich, A. V. Nikonov, I. A. Mezentssev, E. A. Oleynikova, 2021