

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НИВЕЛИРОВАНИЯ III КЛАССА ШАШЕЧНЫМИ ДЕРЕВЯННЫМИ РЕЙКАМИ МЕТОДОМ СОВМЕЩЕНИЙ

Как известно из теории геометрического нивелирования, погрешностями, регламентирующими его точность, является так называемая «ошибка взгляда», т. е. суммарная погрешность, включающая следующие ошибки:

- 1) ошибка установки визирной оси в горизонтальное положение, зависящая от цены деления уровня, параллельности визирной оси и оси уровня, если иметь в виду уровенные нивелиры, или зависящая от правильности и точности работы компенсатора, если иметь в виду нивелиры с компенсаторами;
- 2) ошибка отсчета, которая находится в прямой зависимости от увеличения трубы и способа отсчитывания. Точность отсчитывания различными способами рассматривается ниже;
- 3) ошибки округления при отсчете по сантиметровым шашечным рейкам;
- 4) ошибки делений рейки.

Заметим, что названные причины «ошибки взгляда» не охватывают весь комплекс погрешностей «взгляда». Так, к погрешностям «взгляда» относятся: неточная установка рейки в вертикальное положение, действие вертикальной дифференциальной рефракции, изменение угла i за время работы на станции, ошибки, вызываемые температурными влияниями на нивелир и другие погрешности. Однако названные погрешности минимизируются в процессе нивелирования. Например, заметные наклоны рейки исключают

ются благодаря прикрепленным к рейкам уровням или отвесам; температурные нагревы ослабляются применением зонтов и термостатированием нивелиров; дифференциальная рефракция — выбором времени наблюдений. В результате точность нивелирования III класса на станции регламентируется именно названными четырьмя погрешностями.

В соответствии с [2] ошибка установки визирной оси в горизонтальное положение, зависящая от погрешности совмещения концов пузырька контактного уровня, выражается формулой

$$m_{уст} = 0,03\tau L/\rho'', \quad (1)$$

где τ — цена деления уровня; L — длина плеча (расстояние от нивелира до рейки); ρ'' — число секунд в радиане.

Согласно [2] ошибки округления при отсчете по сантиметровым шашечным рейкам составляют $m_{окр} = 0,54$ мм. Ошибки делений рейки определяют в результате компарирования. В соответствии с действующей инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов [1], допускаются ошибки дециметровых делений реек, пригодных для нивелирования III класса — 0,5 мм. Исходя из этого положим среднюю квадратическую ошибку деления реек $m_{дел} = 0,25$ мм.

Наконец, ошибки отсчета в соответствии с [2] определяем формулой

$$m_{отс} = 30L/\Gamma\rho'', \quad (2)$$

где Γ — увеличение трубы.

Таким образом, если нивелирование ведется деревянными шашечными рейками и сантиметровые деления рейки глазомерно делятся на миллиметры, то «ошибку взгляда» можно выразить формулой

$$m_{взг} = \sqrt{m_{отс}^2 + m_{окр}^2 + m_{уст}^2 + m_{дел}^2}. \quad (3)$$

С учетом (1) и (2) формула (3) имеет вид

$$m_{взг} = \sqrt{\left(\frac{30L}{\Gamma\rho}\right)^2 + m_{окр}^2 + \left(\frac{0,03\tau L}{\rho}\right)^2 + m_{дел}^2}. \quad (4)$$

При нормальной длине плеча нивелирования III класса $L = 75$ м, увеличении трубы $\Gamma = 30\times$, цене деления уровня $\tau = 30''$ ошибка «взгляда» составляет

$$m_{взг} = \sqrt{0,36^2 + 0,54^2 + 0,33^2 + 0,25^2} = \sqrt{0,5926} = 0,77 \text{ мм}$$

С учетом методики нивелирования III класса найдем

$$m_h = m_{взг}\sqrt{2}, \quad (5)$$

где m_h — ошибка в превышении, полученном из нивелирования по одной стороне реек (черной или красной).

Так как за окончательное значение превышения на станции берем среднее, то

$$m_{\text{ст}} = \frac{m_{\text{взг}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = m_{\text{взг}}. \quad (6)$$

Следовательно, при существующей методике нивелирования III класса ошибка определения превышения на станции $m_{\text{ст}}$ равна «ошибке взгляда».

Средняя квадратическая ошибка 1 км хода будет

$$m_{\text{км}} = m_{\text{взг}} \sqrt{\frac{1000}{75 \cdot 2}} = 0,77 \cdot 2,58 = 1,99 \text{ мм}. \quad (7)$$

Анализируя (4), заметим, что для уменьшения $m_{\text{взг}}$, т. е. для повышения точности нивелирования, необходимо исключить или минимизировать прежде всего ошибки $m_{\text{отс}}$ и $m_{\text{окр}}$, как максимальные из четырех составляющих ошибок «взгляда».

Это возможно при переходе от нивелирования III класса методом отсчитывания к нивелированию такими же деревянными шашечными рейками методом совмещений. Для этого необходимо сконструировать оптический микрометр нивелира, оснащенный специальной плоскопараллельной стеклянной пластинкой.

Как известно, входящий луч, прошедший плоскопараллельную пластинку, параллельный входящему лучу, но смещенный относительно него на величину h , причем

$$h = d \frac{n-1}{n} i, \quad (8)$$

где d — толщина пластинки; i — угол поворота пластинки; n — показатель преломления стекла, из которого пластинка изготовлена.

При конструировании параметры пластинки в соответствии с (8) выбирали такими, чтобы в случае максимального поворота пластинки i_{max} смещение h было больше 10 мм.

Такой оптический микрометр сконструирован, выполнены его лабораторные и полевые испытания. Создание такого микрометра нивелира позволяет перейти от нивелирования III класса методом отсчитывания к нивелированию такого же класса методом совмещений. Нетрудно отметить, что при нивелировании методом совмещений погрешность округления при отсчете $m_{\text{окр}}$ исключается. Более того, по данным [2], ошибка отсчета при методе совмещений выражается формулой

$$m_{\text{отс}} = 10L/\Gamma\rho. \quad (9)$$

Таким образом, «ошибку взгляда» при способе совмещений находим по формуле

$$m_{\text{взг}} = \sqrt{\left(\frac{10L}{\Gamma\rho}\right)^2 + \left(\frac{0,03\tau L}{\rho}\right)^2 + m_{\text{дел}}^2}. \quad (10)$$

При тех же значениях L , Γ и τ на основании (10) получим: $m_{\text{взг}} = \sqrt{(0,12)^2 + (0,33)^2 + (0,25)^2} = \sqrt{0,1858} = 0,43$ мм. Поэтому в данном случае средняя квадратическая ошибка 1 км хода будет $m_{\text{км}} = 0,43 \sqrt{\frac{1000}{75 \cdot 2}} = 1,11$ мм.

Как видим, можно ожидать двухкратного повышения точности нивелирования от замены глазомерного способа отсчитывания на инструментальный способ совмещения.

Разумеется, такой вывод необходимо подтвердить лабораторными, полевыми экспериментальными и производственными наблюдениями.

Опишем вначале результат лабораторных испытаний. В лаборатории нивелиров Н-3, установленным на металлической трубе-штативе, брали отсчеты по деревянной рейке с сантиметровыми делениями, устанавливаемой последовательно на семи таких же трубах-штативах, удаленных от нивелира на расстояние 2,50, 5,00, 5,35, 6,25, 7,45, 8,90 и 10,45 м. Эти расстояния обусловлены размерами лаборатории и расположением постоянно установленных труб-штативов. Каждую установку рейки сопровождали двумя совмещениями и двумя отсчетами микрометра нивелира. Выполняли по десять прямых и обратных ходов. Совокупность перечисленных действий составляет одну серию наблюдений. Далее снимали насадку с оптическим микрометром и серию наблюдений производили аналогично тем же нивелиром без насадки. Всего выполнено четыре серии наблюдений с насадкой и без нее. В результате для каждой установки рейки получено до 80 разностей отсчетов Δ_i (с насадкой и без насадки).

Результаты измерений обработаны как двойные измерения, и получены средние квадратические ошибки отсчетов рейки с насадкой и без нее:

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{2n}}, \quad (11)$$

где n — число разностей Δ_i .

Средние квадратические ошибки m (мм) приведены ниже при таких расстояниях (м):

Вид измерения	2,50	5,00	5,35	6,25	7,15	8,90	10,45
С насадкой	0,062	0,067	0,060	0,067	0,067	0,075	0,062
Без насадки	0,35	0,37	0,32	0,22	0,25	0,29	0,35

Из анализа этих данных следует, что ошибки отсчитывания с применением микрометра уменьшились в шесть раз.

Заметим, что цена деления микрометра нивелира составляет (при 50 делениях барабана микрометра) $10 \text{ мм}/50 = 0,2$ мм.

В полевых условиях из-за возрастания длины плеч, быстроты действий нивелировщика, колебания изображений делений рейки и других причин возможно существенное понижение точности «взгляда».

Приведем результаты производственных испытаний, которые заключались в следующем: одновременно тремя нивелирами Н-2,

Н-3 и Н-3К проводили нивелирование на трех производственных участках.

Общая длина ходов составила около 30 км. С помощью Н-2 вели нивелирование по программе II класса инварными рейками. Нивелиры Н-3 и Н-3К снабжены сконструированными насадками, и нивелирование производили методом совмещений одной парой деревянных реек.

Применяли два варианта обработки результатов измерений. Первый вариант обработки заключался в том, что по разностям двойных измерений (основная и дополнительная шкала инварных реек; красная и черная сторона деревянных реек) находили средние квадратические ошибки определения превышений на станции $m_{взг}$. При обработке все станции в зависимости от длины плеч разделили на пять групп: I — длина плеч 5...10 м; II — 11...20 м; III — 21...30 м; IV — 31...40 м; V — 41...53 м.

Средняя квадратическая ошибка превышения на станции получена по формуле (11).

Результаты вычислений средней квадратической ошибки $m_{ст}$ (мм) при расстояниях (м) приведены ниже (числа в скобках — число разностей Δ):

Нивелиры	5...10	11...20	21...30	31...40	41...53
Н-2	0,19(38)	0,22(44)	0,21(50)	0,29(56)	0,27(120)
Н-3	0,27(38)	0,32(44)	0,30(50)	0,34(56)	0,32(120)
Н-3К	0,33(38)	0,35(44)	0,29(50)	0,29(56)	0,33(120)

Из анализа этих данных следует, что средние квадратические ошибки станции мало зависят от длины плеч; экспериментальные исследования согласуются с теоретическими расчетами, выполненными по формуле (10).

Второй вариант обработки заключался в определении средней квадратической случайной ошибки 1 км хода η по формуле

$$\eta^2 = \frac{1}{4k} \left[\frac{d^2}{r} \right], \quad (12)$$

где d — разность прямых и обратных превышений в секциях длиной r ; k — число секций.

В результате вычислений получено: $\eta_{Н-2} = 1,16$ мм, $k = 65$; $\eta_{Н-3} = 2,31$ мм, $k = 53$; $\eta_{Н-3К} = 2,81$ мм, $k = 52$.

Резюмируя вышесказанное, на основании теоретических и экспериментальных данных можно утверждать, что точность нивелирования III класса деревянными шашечными рейками методом совмещений по меньшей мере в 1,5 раза точнее, чем нивелирование III класса традиционным методом.

Как показали специальные экспериментальные исследования, оптимальная длина плеч предлагаемого метода нивелирования такая же, как и традиционного метода.

Рассмотрим порядок работы на станции нивелирования III класса методом совмещений:

1) трубу наводим на заднюю рейку (черная сторона), элевационным винтом достигаем контактирования изображений концов

пузырька уровня, а вращением барабана микрометра добиваемся совмещения средней нити сетки с ближайшим сантиметровым делением; записываем номер сантиметрового деления и берем отсчет по барабану микрометра;

2) не изменяя положения барабана микрометра, берем отсчет по нижней нити сетки, как обычно, с точностью до 1 мм. Этот отсчет совместно с основным, выполненным микрометром, позволит определить длину плеч нивелирования;

Пример формы журнала

Ход от _____ до _____ * _____ 198 г.; начало _____
 конец _____; условия работы; грунт _____ изображение _____
 облачность _____; направление и сила ветра _____;

№ штатива	№ реек	Зарисовка привязок	Отсчеты по средней и верхней дальномерным нитям		Отсчеты по рейкам и микрометру						Среднее превышение в мм
			З	П	черная		красная				
					Р	Б	Р	Б			
1			1605,2 (17)	1623,6 (18)	3	160 (1)	52 (2)	638 (9)	87 (10)	—18,2 (23) +12/ +12 (24)	
1—2			1411 (3)	1430 (6)	П	162 (4)	36 (5)	630 (7)	66 (8)		
			19,42 (19)	19,36 (21)	3—П	—2 (11)	+16 (12)	—2 (13)	+21 (14)		
			38,84 (20)	38,72 (22)	h		—18,1 (15)		—17,9 (16)		

3) трубу наводим на переднюю рейку и выполняем действия, указанные в пунктах 1) и 2);

4) подаем команду реечникам: «красная»;

5) отсчитываем, как указано в пункте 1), по красной стороне передней рейки;

6) трубу наводим на заднюю рейку и снова берем отсчет, как указано в пункте 1).

Пример формы журнала прилагается. Цифры в круглых скобках означают порядок записи отсчетов, вычисление превышений и длин плеч. Превышения вычисляют только на основании отсчетов, взятых по средней нити. Расхождения превышений, вычисленных по черной и красной сторонам реек, не должны превышать 2 мм. Как показал хронометраж, время работы на отдельной станции по предлагаемой и традиционной методикам совпадает, хотя и имеется тенденция к уменьшению.

Экономическая эффективность предлагаемого метода нивелирования усматривается в том, что таким методом достаточно вести нивелирование только в одном направлении и получать точность, которая достигается традиционным методом нивелирования III класса.

1. Инструкция по нивелированию I, II, и IV классов. М., 1974. 2. Руководство по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. Высотные сети. М., 1976.

Статья поступила в редколлегию 07.04.86