

При геометрическом нивелировании способом из середины (рис. А.1) на начальной (задней) и определяемой (передней) точках ставят отвесно рейки с делениями, обозначенными снизу вверх. Между рейками ставят нивелир. Его визирную ось приводят в горизонтальное положение и наводят последовательно на заднюю (А), а затем на переднюю (В) точки и берут отсчеты a и b . Превышение h_{AB} между измеряемыми точками вычисляется по формуле:

$$h_{AB} = a - b, \quad (\text{A.1})$$

Расстояние от нивелира до рейки называют плечом. Различают соответственно заднее и переднее плечо, они должны быть приблизительно одинаковыми при измерениях способом из середины.

Обычно в качестве задней точки выбирают исходный репер с известной отметкой H . Тогда отметка передней точки (H_B) определится по формуле:

$$H_B = H_A + (\pm h_{AB}), \quad (\text{A.2})$$

Знак « \rightarrow » в превышении говорит о том, что передняя точка В ниже чем задняя А. Знак « $+$ » означает, что передняя точка выше задней.

Взять отсчет по рейке – означает отсчитать число делений рейки от ее основания (пятки) до горизонтальной визирной оси.

Для передачи высот на большие расстояния применяют нивелирование с нескольких станций, связанных между собой общими точками. Такое нивелирование называют нивелирным ходом (рис. А.2).

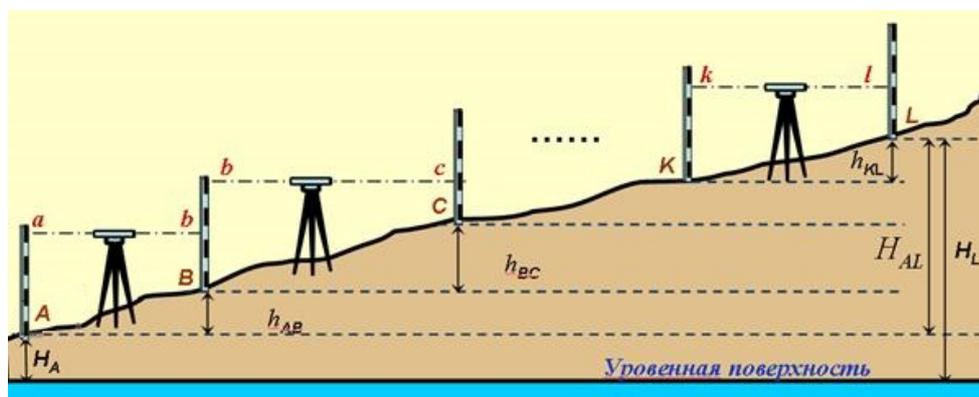


Рисунок А.2 — Нивелирный ход

Превышение между точками А и L будет равно алгебраической сумме промежуточных превышений:

$$h_{AL} = h_{AB} + h_{BC} + \dots + h_{KL}, \quad (\text{A.3})$$

Зная отметку одной из точек, например H_A , можно всегда вычислить отметку точки L:

$$H_L = H_A + (\pm h_{AL}), \quad (\text{A.4})$$

Как мы видим из сказанного, главным предназначением нивелира является задание горизонтальной плоскости, определяемой визирной осью при вращении нивелира вокруг вертикальной оси, и снятие отсчетов по нивелирным рейкам. То есть нивелир является

отсчетным устройством, которое дает определенный вклад в бюджет средней квадратической погрешности нивелирования на станции и, соответственно, в нивелирном ходу. А это значит, что применение по отношению к нивелиру такой характеристики, как погрешность нивелира, нашедшее отражение в ряде нормативных документов является неправомерным и технически абсолютно неграмотным. В действительности стоит говорить о погрешности нивелирования и о вкладе в ее значение составляющей, обусловленной конструктивными особенностями и неточностью настройки отсчетного устройства (нивелира).

На точность определения превышений влияют многочисленные факторы, среди которых основными являются: влияние кривизны Земли и рефракции атмосферы; невыполнение главного условия нивелира; погрешности отсчетов по шкалам реек; погрешности установки зрительной трубы; погрешности в нанесении делений шкал реек и др.

Рассмотрим влияние указанных погрешностей и факторов на точность нивелирования. Для этого обратимся к книге, написанной Г. Г. Покладом, «Геодезия: Учеб. пособие для вузов».

1. Влияние кривизны Земли

На физической поверхности Земли на расстоянии L находятся точки A и B , превышение между которыми равно h (рис. А.3).

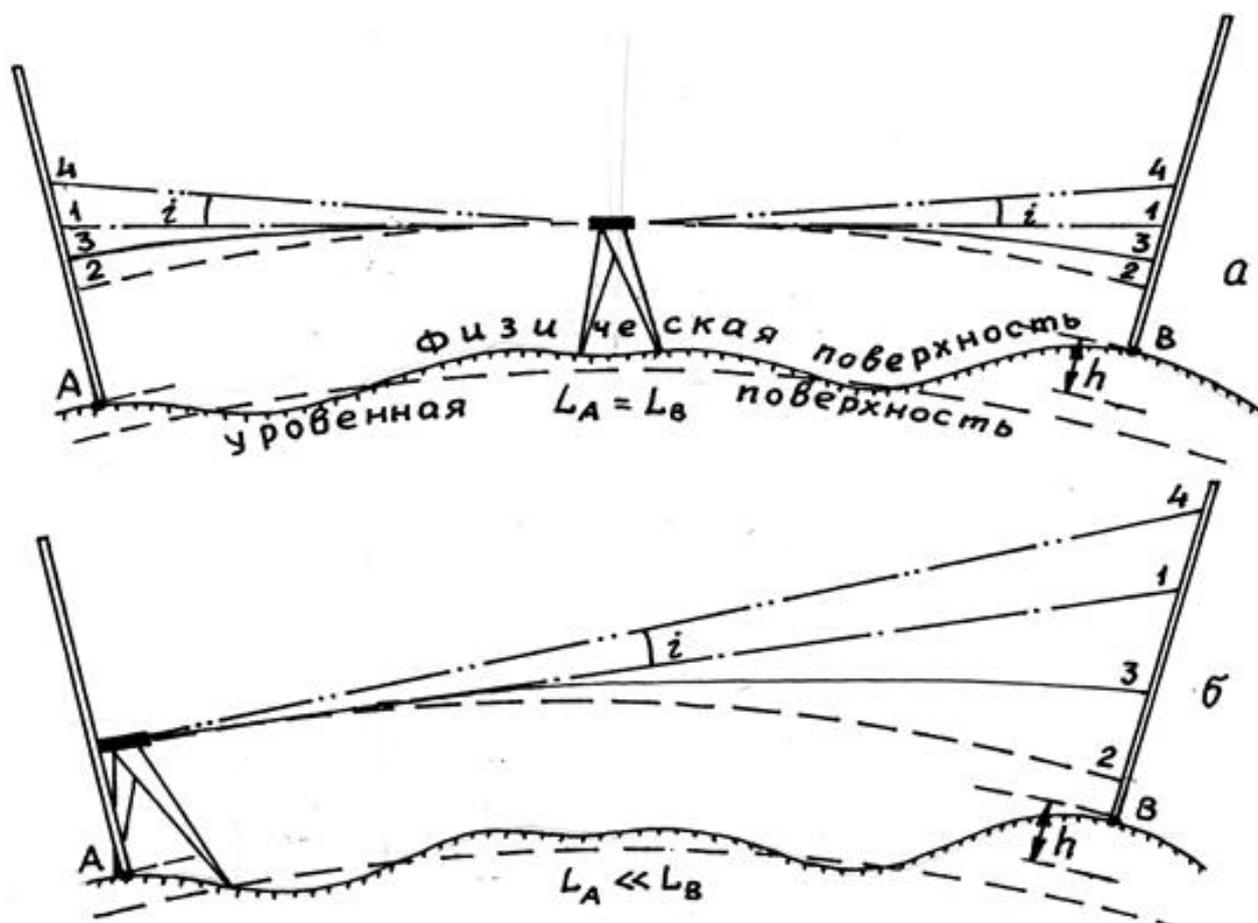


Рисунок А.3 — Влияние кривизны Земли, атмосферной рефракции и невыполнения главного условия нивелира на точность нивелирования

Установим нивелир точно посередине между точками A и B и возьмём отсчёты по рейкам, полагая, что световой луч (1) в направлении визирной оси распространяется в атмосфере прямолинейно. Для правильных отсчетов по рейкам следовало бы потребовать, чтобы световой луч проходил по уровенной поверхности, определяемой высотой прибора, т.е. по

пути (2). В этом случае превышение между точками будет соответствовать истинному его значению:

$$h_{ист} = Z_2 - П_2 , \quad (A.5)$$

где Z_2 и $П_2$ — отсчеты по задней и передней рейкам соответственно при условии прохождения визирного луча по уровенной поверхности.

На самом деле мы имеем:

$$h_1 = Z_1 - П_1 , \quad (A.6)$$

Очевидно, что для симметричной схемы, изображенной на части «а» рисунка А.3, погрешности в отсчётах по рейкам $\Delta Z_I = Z_1 - Z_2$ и $\Delta П_I = П_1 - П_2$, определяемые влиянием кривизны Земли, будут одинаковыми, поскольку $L_A = L_B$. Следовательно:

$$h = (Z_2 + \Delta Z_1) - (П_2 + \Delta П_1) = Z_2 - П_2 = h_{ист} , \quad (A.7)$$

То есть погрешность нивелирования, обусловленная кривизной земли может быть полностью исключена из результатов измерений посредством выполнения нивелирования методом «из середины».

При нивелировании вперёд, изображенном на части «б» рисунка А.3, значение ΔZ_I значительно меньше значения $\Delta П_I$, в связи с чем погрешность $\Delta П_I$ практически полностью входит в значение измеренного превышения.

Величина погрешности k из-за кривизны Земли в отсчёте по рейке, находящейся на расстоянии L от нивелира, может быть оценена по формуле:

$$k = \frac{L^2}{2 \cdot R} , \quad (A.8)$$

где R – радиус Земли.

Из всего сказанного следует однозначный вывод о том, что составляющая погрешности нивелирования, обусловленная влиянием кривизны Земли, может быть исключена из результатов измерений путем выполнения определенных правил нивелирования. Но главное — это то, что данная составляющая погрешности ни коим образом не относится к калибруемому нивелиру и к его метрологическим характеристикам, которые необходимо определять в процессе калибровки.

2. Влияние рефракции атмосферы

Рассмотрим снова рисунок А.3. Визирные лучи (3), проходя в атмосфере через слои воздуха, имеющие разную плотность, искривляются, отклоняясь в сторону земной поверхности. Составляющая погрешность в отсчёте, обусловленная влиянием атмосферной рефракции, $r_3 = (Z_3 - Z_2)$, $r_{II} = (П_3 - П_2)$, может быть оценена по приближённой формуле:

$$f = 0,43 \frac{L^2}{R} , \quad (A.9)$$

При нивелировании из середины (при симметричной схеме) $r_3 = r_{II}$, т.е. эти составляющие погрешности исключаются из значения полученного превышения, а при нивелировании вперёд r_3 значительно меньше r_{II} , что приводит к увеличению погрешности в определении превышения, обусловленной влиянием атмосферной рефракции.

Необходимо отметить, что данная составляющая погрешности превышения так же, как и влияние кривизны Земли, не имеет никакого отношения к калибруемому нивелиру.

3. Невыполнение главного условия нивелира

Если в нивелире не выполняется главное условие, т.е. после установки нивелира в рабочее положение визирный луч (4) займет не горизонтальное положение (рис. А.3), а будет отклонен от него на угол i , то отсчёты по рейкам будут равны Z_4 и Π_4 .

Разности отсчётов $(Z_4 - Z_1)$ и $(\Pi_4 - \Pi_1)$ характеризуют погрешность из-за невыполнения главного условия нивелира. Её величина может быть оценена по формуле:

$$u = i \frac{L}{\rho}, \quad (\text{A.10})$$

где $\rho = 206265''$; L — длина измерительного плеча.

При нивелировании из середины, при использовании симметричной схемы измерений, погрешности в отсчётах по рейкам из-за невыполнения главного условия нивелира будут одинаковыми и исключаться в разности отсчётов. При нивелировании вперёд превышение будет содержать систематическую погрешность, если визирная ось зрительной трубы не будет при измерениях совпадать с горизонтальной плоскостью.

Суммируя сказанное, сделаем следующий вывод: при нивелировании из середины влиянием кривизны Земли, рефракцией атмосферы, остаточным невыполнением главного условия нивелира, как систематическими погрешностями, можно пренебречь (при соблюдении требований, установленных методикой измерений).

Но, так как эта составляющая погрешности нивелирования напрямую относится к нивелиру, все же остановимся на ней немного подробнее.

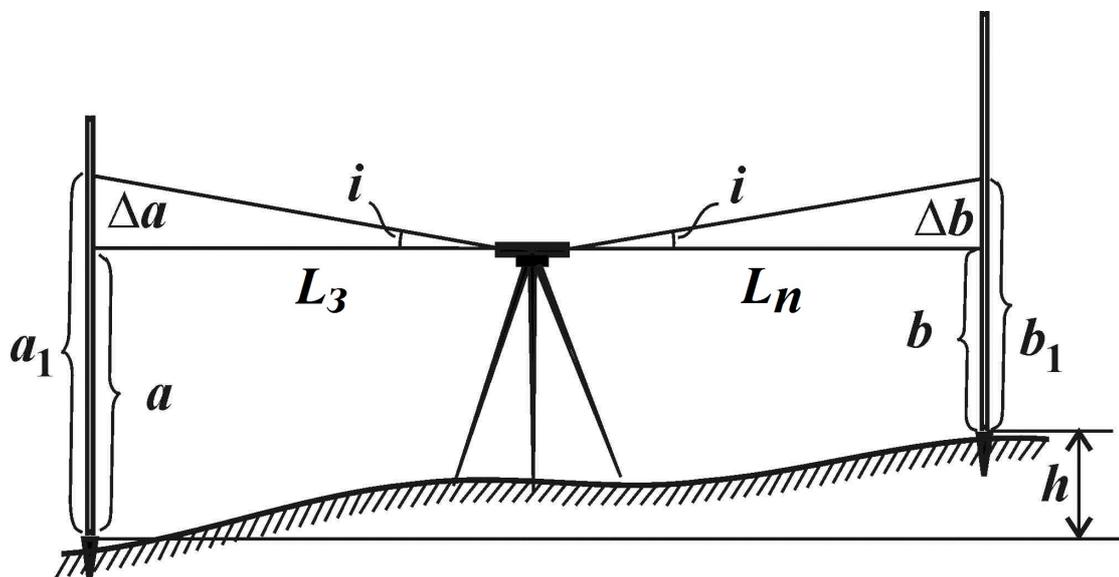


Рисунок А.4 — Геометрическое нивелирование на станции (плечи равны)

На рисунке А.4 мы видим, что нивелировка проводится методом "из середины", то есть соблюдается условие равенства плеч ($L_3 = L_n$). Очевидно, что вследствие наклона визирной оси на угол i , вместо верных отсчетов a и b будут прочтены отсчеты a_1 и b_1 . Вследствие равенства расстояний до реек ошибки в обоих отсчетах будут одинаковыми, $\Delta a = \Delta b$. Вычисленное при этом превышение будет равно:

$$h = a_1 - b_1 = (a + \Delta a) - (b + \Delta b) = a - b, \quad (\text{A.11})$$

То есть вычисленное превышение будет свободно от погрешности, вызванной несоблюдением главного условия нивелира.

Но в реальности, зачастую, по разным причинам невозможно выдержать равенство плеч, что проиллюстрировано на рис. А.5.

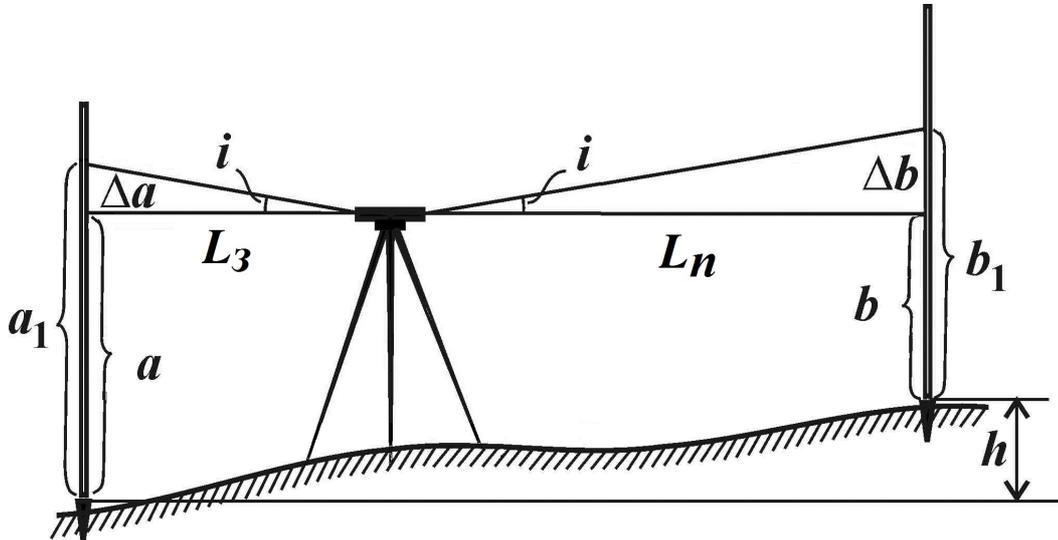


Рисунок А.5 — Геометрическое нивелирование на станции (плечи не равны)

Очевидно, что в данном случае $\Delta a \neq \Delta b$, а значит отклонения в отсчетах по рейкам невозможно полностью исключить из расчетов и значение превышения между точками не будет свободным от влияния невыполнения главного условия нивелира. Тем не менее в инструкциях по нивелированию, в частности в ГКИНП 03-010-03, а так же в методике поверки МИ БГЕИ 07-90 регламентируется значение угла i ограниченное $10''$. Очевидно, что чем меньше это значение, тем меньше будет значение погрешности нивелирования на станции, а следовательно и на 1 км двойного хода. Значение погрешности нивелирования также минимизируется программой измерений, в которой предусматривается четное количество станций и чередование неравенства плеч. Так же очевидно, что знание конкретного значения угла i и разницы в длине плеч на станции позволит нивелировщику вычислить поправку к вычисленному значению превышения между точками, при условии, конечно, если значение угла i будет стабильным во времени.

4. Погрешность установки зрительной трубы

Данная погрешность обусловлена неточностью установки пузырька цилиндрического уровня в нульпункте (для нивелиров с уровнем при трубе), а также недостаточной чувствительностью уровня к малым перемещениям трубы элевационным винтом. Здесь же следует указать и на недостаточную чувствительность компенсатора у нивелиров с компенсатором (систематическая погрешность недокомпенсации).

Погрешность установки зрительной трубы может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta_T = \frac{m_\tau}{\rho} L, \quad (\text{A.12})$$

где m_τ – погрешность установки пузырька уровня при трубе в нульпункт; $\rho = 206265''$;
 L — длина измерительного плеча.

Погрешность нивелирования на станции, обусловленная погрешностью установки зрительной трубы рассчитывается по формуле:

$$\Delta h_T = \sqrt{2} \Delta_T, \quad (A.12)$$

5. Погрешность отсчёта по рейке

Погрешность отсчета по рейке определяется недостаточной разрешающей способностью зрительной трубы нивелира и может быть вычислена по формуле:

$$m_{mp} = \frac{60'' \cdot L}{\rho \cdot \Gamma^X}, \quad (A.13)$$

где Γ^X — увеличение зрительной трубы; L — длина измерительного плеча; $\rho = 206265''$;

6. Погрешность в отсчёте из-за наклона рейки

На рис. А.6 изображено влияние наклона рейки на погрешность отсчета.

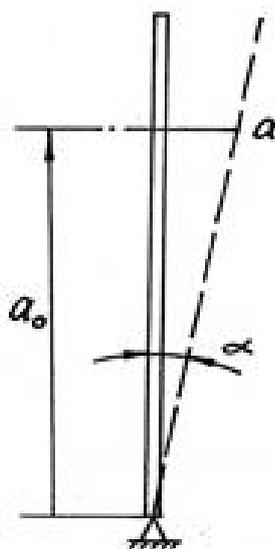


Рисунок А.6 — Влияние наклона рейки на точность отсчета

Из рис. А.6 очевидно, что чем больше наклон рейки, тем больше будет и погрешность отсчёта. Предположим, что рейка отклонилась от вертикального положения на угол α . Визирный луч находится на высоте a_0 , соответствующей вертикальному положению рейки. Из-за наклона по рейке читается отсчёт a . Погрешность из-за наклона рейки может быть получена по формуле:

$$\Delta_H = a_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{\rho^2}} - 1 \right), \quad (A.14)$$

а превышения на станции – по формуле:

$$\Delta h_H = \sqrt{2} \cdot a_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{\rho^2}} - 1 \right), \quad (\text{A.15})$$

Предположим, что $\alpha = 1^\circ$ ($\rho = 57,3^\circ$), $a_0 = 2000$ мм. Тогда $\Delta h_H = 0,43$ мм. Для частичного устранения погрешности, возникающей из-за наклона рейки, при техническом нивелировании и нивелировании средней точности при больших отсчётах по рейке, реечник выполняет качание рейкой в направлении наблюдателя с переходом через вертикальное положение. Наблюдатель при этом фиксирует минимальный отсчет.

При точном и высокоточном нивелировании используют нивелирные рейки, снабжённые круглым или цилиндрическим уровнем. В этом случае реечник удерживает рейку или закрепляет её с помощью рейкодержателя в вертикальном положении по показанию уровня.

7. Погрешность в дециметровых делениях рейки

Используемые при техническом нивелировании нивелирные рейки могут иметь погрешности в дециметровых делениях шкал до 0,7 мм, что допускается технической инструкцией. Для превышения, определяемого по различным дециметровым диапазонам, погрешность может составить $\Delta h_d = 1$ мм для реек, используемых для технического нивелирования.

8. Погрешность округления отсчёта

Эта погрешность оценивается как 0,1 часть наименьшего деления рейки. То есть, если используется рейка с сантиметровыми делениями, то погрешность округления составит 1 мм, а для измеренного превышения $\Delta h_o = 1,41$ мм. Для высокоточных нивелиров типа Н-05 данная погрешность будет намного меньше из-за наличия у нивелира микроскопа микрометра и для превышения на станции будет равна 0,01 - 0,02 мм.

Таким образом, резюмируя сказанное выше, погрешность нивелирования на станции может быть вычислена по формуле:

$$m_h = \sqrt{k^2 + f^2 + u^2 + \Delta h_T^2 + m_{mp}^2 + \Delta h_H^2 + \Delta h_o^2 + \Delta h_o^2}, \quad (\text{A.16})$$

где k — влияние кривизны Земли; f — влияние атмосферной рефракции; u — влияние, обусловленное невыполнением главного условия нивелира; Δh_T — влияние погрешности установки зрительной трубы; m_{mp} — влияние погрешности отсчета по рейке, обусловленное пределом разрешения зрительной трубы; Δh_H — влияние, обусловленное наклоном рейки; Δh_o — влияние погрешности дециметровых делений; Δh_o — влияние погрешности округления отсчета.

Погрешность же нивелирования на 1 километр двойного хода вычисляется по формуле:

$$m_H = \sqrt{N} \cdot m_h, \quad (\text{A.17})$$

где N — количество станций в нивелирном ходу.

Практически все современные методики поверки нивелиров, разрабатываемые различными организациями, регламентируют при первичной и периодической поверках, а так же при поверке нивелира после ремонта обязательное экспериментальное определение средней квадратической погрешности нивелирования на 1 километр двойного хода. При этом методики требуют, чтобы измерения производились на высотном стенде в соответствии с

ГОСТ 10528, а регламентируемое количество промеренных нивелирных ходов при этом зачастую указывается в этих методиках числом не менее десяти.

Подобный бездумный и формальный подход к созданию методик поверки приводит к значительному увеличению трудоемкости определения метрологических характеристик нивелиров, а зачастую и к невозможности определения оных, при том, что подавляющая часть факторов, влияющих на значение СКП нивелирования, производимого на высотном стенде не имеют никакого отношения к самому нивелиру и просто исключаются из результатов измерений методом проведения этих измерений. Это утверждение очень легко доказать, если внимательно и вдумчиво прочитать ГОСТ 10528.

Начнем с того, что, в соответствии с требованиями ГОСТ, полевой стенд для испытаний нивелиров должен включать в себя нивелирную сеть, образующую на местности фигуру в виде прямоугольника с размерами сторон $a \approx 100$ м и $b \approx 30$ м, вершины которого закреплены реперами. На каждом репере неподвижно и вертикально устанавливают нивелирные станции. Станцию II (рис. А.7) располагают в центре фигуры, станции I и III - на продольной оси примерно в 10 м по обе стороны от станции II. Станции IV и V (рис. А.8) располагают примерно в 50 м по обе стороны от станции II.

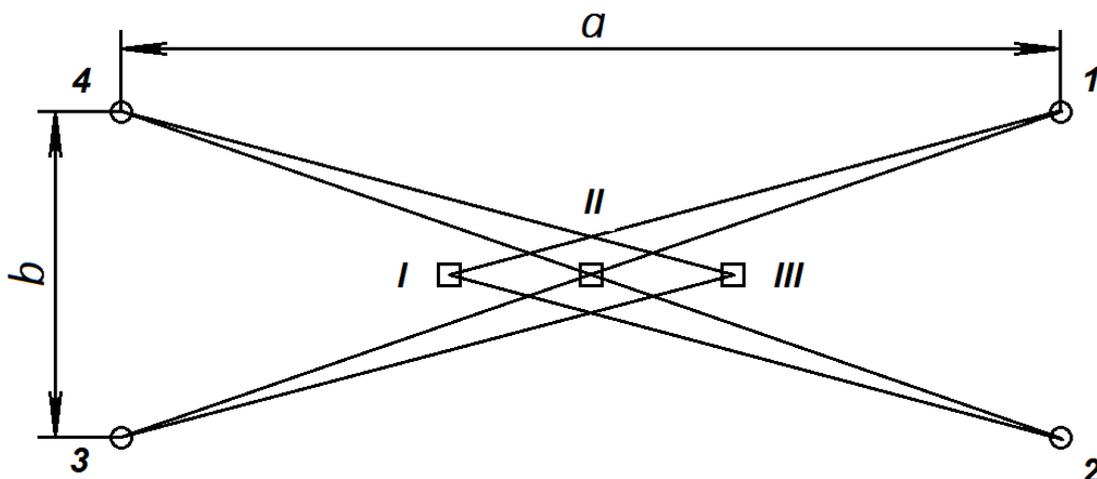


Рисунок А.7 — Схема полевого стенда (часть 1)

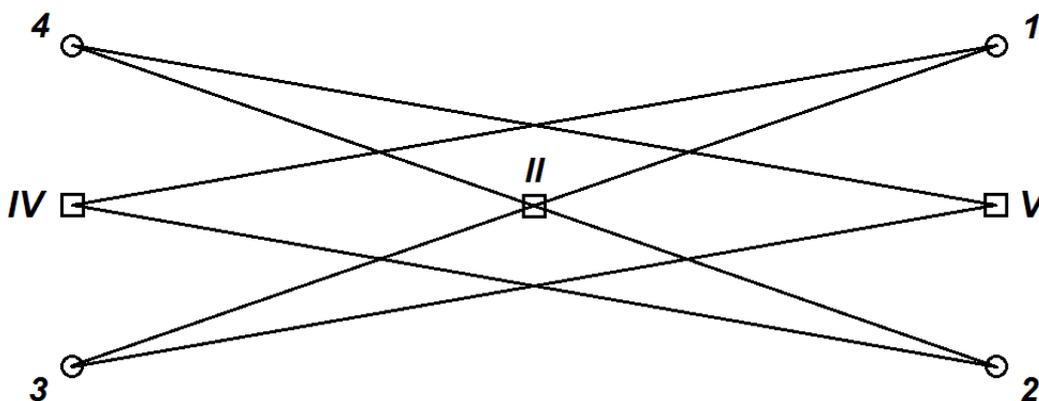


Рисунок А.8 — Схема полевого стенда (часть 2)

Со станций I, II, III и станций II, IV, V прокладывают два замкнутых нивелирных хода, нивелируя точки в последовательности 1-2-3-4-1 и набирая прямой ход длиной около 1 км.

Затем в обратных ходах осуществляют нивелирование точек в последовательности 1-4-3-2-1.

После проложения нивелирных ходов получают невязки в прямом и в обратном $f_{обр}$ ходах и вычисляют среднюю квадратическую погрешность измерения превышений на 1 км двойного хода. Под невязкой хода понимают отклонение измеренной нивелиром суммы превышений от теоретического значения, равного нулю.

Как видно из приведенных выше схем, на всех пяти станциях нивелирования строго соблюдается условие равенства плеч, а это значит, что большая часть из влияющих на погрешность нивелирования факторов исключается из результатов измерения превышений на полевом стенде. Более подробно этот факт описан в табл. А.1.

Таблица А.1 — Факторы, влияющие на точность нивелирования

Влияющий фактор по формуле (А16)	Отношение к калибруемому нивелиру	Возможность исключения из бюджета погрешности нивелирования
k	не относится	Исключается из результатов измерений вследствие равенства измерительных плеч на полевом стенде.
f	не относится	Исключается из результатов измерений вследствие равенства измерительных плеч на полевом стенде.
u	относится	Исключается из результатов измерений вследствие равенства измерительных плеч на полевом стенде.
Δh_T	относится	Не исключается из результатов измерений, но может быть рассчитан теоретически, как фактор, зависящий от конструктивных показателей нивелира. Практически определяется для нивелиров с уровнем при первичной поверке (калибровке), а так же после ремонта, в случае замены уровня при трубе нивелира. Определяется во всех случаях для нивелиров с компенсатором, как систематическая погрешность компенсатора и погрешность установки визирной оси.
$m_{тр}$	относится	Не исключается, но вычисляется теоретически, как зависимость от кратности увеличения трубы нивелира и величины измерительного плеча.
Δh_H	не относится	Исключается из результатов измерений путем установки нивелирных реек на пунктах полевого стенда в вертикальное положение с помощью рейкодержателей и уровней на рейках.
Δh_δ	не относится	Не исключается, но минимизируется путем поверки (калибровки) нивелирных реек.
Δh_o	частично к высокоточным нивелирам с микроскопом-микрометром	Не исключается, но является фактором, вычисляемым теоретически в зависимости от наличия микроскопа-микрометра (для высокоточных нивелиров) и по показателю, зависящему от применяемой при нивелировании рейки.

Таким образом мы видим, что при нивелировании на полевом стенде влияющими на значение СКП нивелирования являются только погрешность установки визирной трубы,

погрешность отсчета по рейке и погрешность из-за округления отсчета. При этом в условиях реального нивелирования очень тяжело соблюсти равенство измерительных плеч, а это значит, что на качество нивелирования будет оказывать существенное влияние невыполнение главного условия нивелира, которое должно в обязательном порядке контролироваться при калибровке нивелира.

Важно также отметить, что использование полевого высотного стенда в зимний период сильно затруднено, если вообще возможно. Размещение же высотного стенда в помещении не представляется возможным из-за его больших габаритов (100x30 м). А ведь калибровка (поверка) нивелиров проводится в основном в период между полевыми сезонами, то есть в осенне-зимний период.

Все вышесказанное подтверждает абсолютную несостоятельность подавляющего большинства методик поверки нивелиров и говорит о том, что авторы этих методик при их написании проявили формалистический, бездумный подход к вопросу определения метрологических характеристик нивелиров.

Кроме того необходимо отметить тот факт, что в большинстве современных методик при периодической поверке уделяется неоправданно пристальное внимание такому параметру, как погрешность измерения горизонтальных углов нивелирами с угломерным лимбом. Дело все в том, что данная функция, имеющаяся у большинства современных нивелиров, является дополнительной и предназначается лишь для удобства поиска проектных нивелирных реперов и точность измерения углов этим ориентирным приспособлением не может рассматриваться в качестве метрологической характеристики нивелира, так как его прямым предназначением является определение превышений между точками земной поверхности. Углы же на местности измеряются совершенно иными средствами измерений — теодолитами и тахеометрами.

Поэтому при калибровке нивелира необходимо и достаточно определять следующие его метрологические характеристики:

- а) правильность установки сетки нитей (разворот сетки нитей);
- б) угол между визирной осью нивелира и горизонтальной плоскостью (угол i);
- в) диапазон работы компенсатора нивелира (для нивелиров с компенсатором);
- г) систематическая погрешность компенсатора нивелира (для нивелиров с компенсатором);
- д) погрешность установки визирной оси (для нивелиров с компенсатором);
- е) цена деления микроскопа-микрометра (для высокоточных нивелиров);
- ж) коэффициент нитяного дальномера;

Все эти характеристики нивелира могут быть определены в лабораторных условиях без применения полевого стенда и порядок их определения приведен в данной методике калибровки.