

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

Нивелированием называется совокупность измерений на местности, в результате которых определяют превышения между точками местности с последующим вычислением их высот относительно принятой исходной поверхности. Такой исходной поверхностью обычно является *основная уровенная поверхность*, соответствующая среднему уровню воды морей и океанов в спокойном состоянии. В России абсолютные высоты точек земной поверхности определяются в Балтийской системе высот, т. е. относительно нуля Кронштадтского футштока (см. § 6).

Геометрическое нивелирование выполняют с помощью специальных геодезических приборов — *нивелиров*, обеспечивающих горизонтальное положение линии визирования в процессе измерений, и *нивелирных реек*. Нивелир представляет собой сочетание зрительной трубы с цилиндрическим уровнем либо оптическим компенсатором, которые служат для приведения визирной оси трубы в горизонтальное положение. Нивелирные рейки имеют вид деревянных брусков с делениями, оцифрованными снизу (от «пятки» рейки) вверх. Превышения между точками определяют по отсчетам на рейках, отвесно устанавливаемых в этих точках.

Различают два способа геометрического нивелирования: вперед и из середины.

Рис. 92. Схемы геометрического нивелирования:
а — нивелирование вперед; б — нивелирование из середины;
в — последовательное (сложное) нивелирование

При *нивелировании вперед* (рис. 92, а) нивелир устанавливают в точке A , отметка которой H_A известна, таким образом, чтобы окуляр зрительной трубы находился над этой точкой. В точке B отвесно устанавливают нивелирную рейку. С помощью рулетки или рейки измеряют высоту нивелира i , т. е. отвесное расстояние от центра окуляра до точки A , над которой установлен нивелир. Приводят визирную ось нивелира в горизонтальное положение и делают отсчет b по рейке. Как следует из рис. 92, а,

$$h = i - b, \quad (127)$$

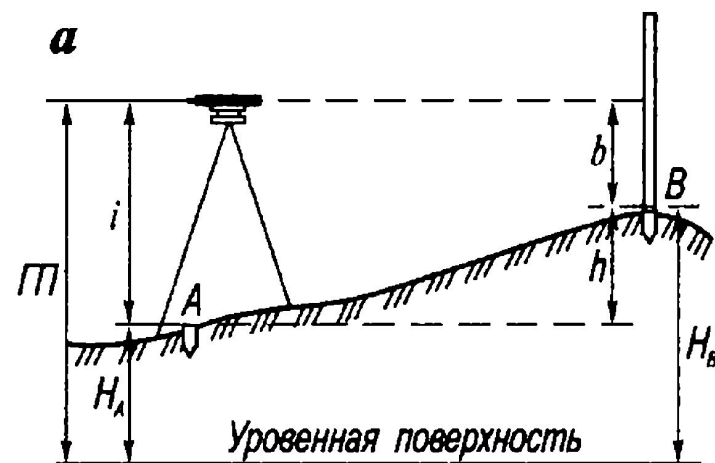
т. е. при нивелировании вперед превышение равно высоте прибора минус отсчет по рейке. Тогда высота точки B

$$H_B = H_A + h = H_A + i - b.$$

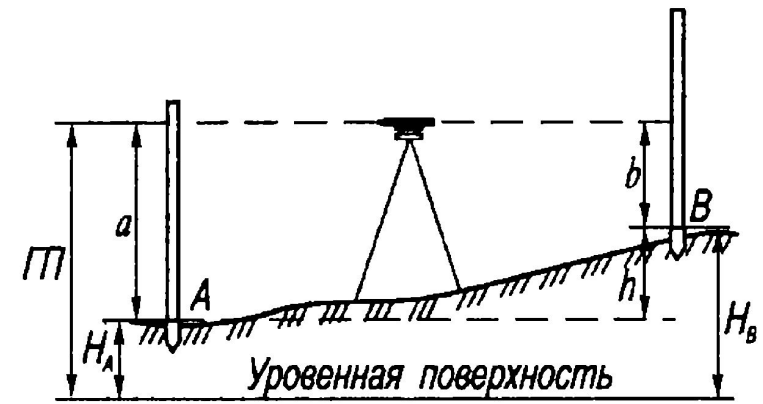
Величина $H_A + i = \Gamma\Pi$ представляет собой высоту визирного луча нивелира над уровнем поверхности и называется *горизонтом прибора*. Отсюда

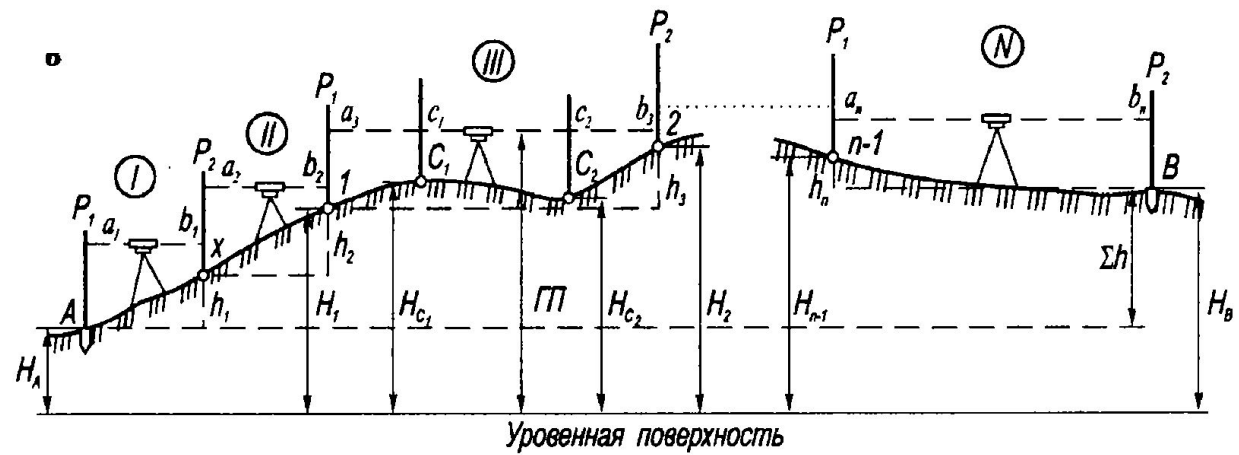
$$H_B = \Gamma\Pi - b, \quad (128)$$

т. е. высота точки равна горизонту прибора минус отсчет по рейке, установленной в этой точке.



б





Тогда превышение могло бы быть получено из выражения

$$h = (a_1 + MM_1) - (b_1 + NN_1),$$

где $MM_1 = k_1$, $NN_1 = k_2$ — поправки за кривизну Земли, вычисляемые по формуле

$$k = \frac{d^2}{2R}, \quad (132)$$

здесь d — длина визирного луча от нивелира до рейки; R — радиус Земли, равный 6371 км.

Однако вследствие *рефракции*, вызванной неоднородностью земной атмосферы по высоте, визирный луч за счет преломления в слоях атмосферы разной плотности пройдет по кривой $M_0 JN_0$, обращенной вогнутостью к поверхности Земли. Поэтому в отсчеты по рейкам следует ввести *поправки за рефракцию*, которые рассчитываются по приближенной формуле

$$r = \frac{d^2}{14R}. \quad (133)$$

Поправка в отсчет по рейке за совместное влияние кривизны Земли и рефракции будет

$$f = k - r = \frac{d^2}{2R} - \frac{d^2}{14R} = 0,43 \frac{d^2}{R}, \quad (134)$$

Тогда превышение точки B над точкой A запишется:

$$h = (a - f_a) - (b - f_b) \quad \text{или} \quad h = (a - b) - (f_a - f_b), \quad (135)$$

где f_a, f_b — поправки в отсчеты по рейкам за кривизну Земли и рефракцию; a, b — отсчеты по рейкам в точках A и B .

Если при нивелировании из середины нивелир установлен на равных расстояниях от реек, т. е. $d_a = d_b$, то $f_a = f_b$; тогда

$$h = a - b.$$

Следовательно, при нивелировании из середины влияние кривизны Земли и рефракции не сказывается на точности определения превышений; в этом заключается одно из основных преимуществ способа нивелирования из середины. При нивелировании вперед указанная поправка полностью войдет в превышение и ее следует учитывать, особенно при значительных расстояниях от нивелира до рейки.

Нивелиры и их классификация

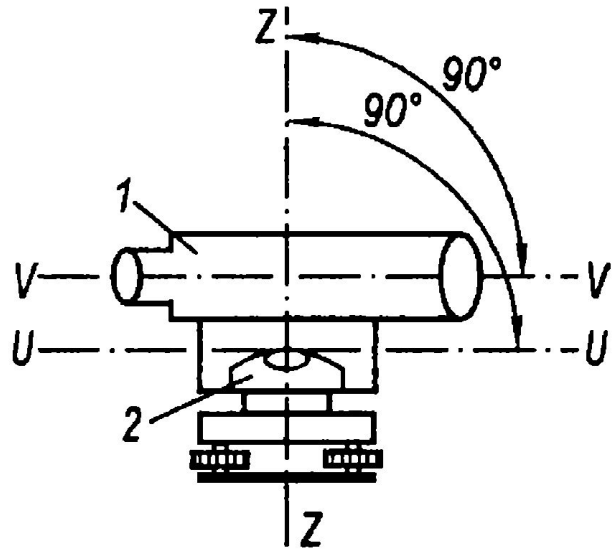


Рис. 94. Принципиальная схема нивелира с уровнем при зрительной трубе

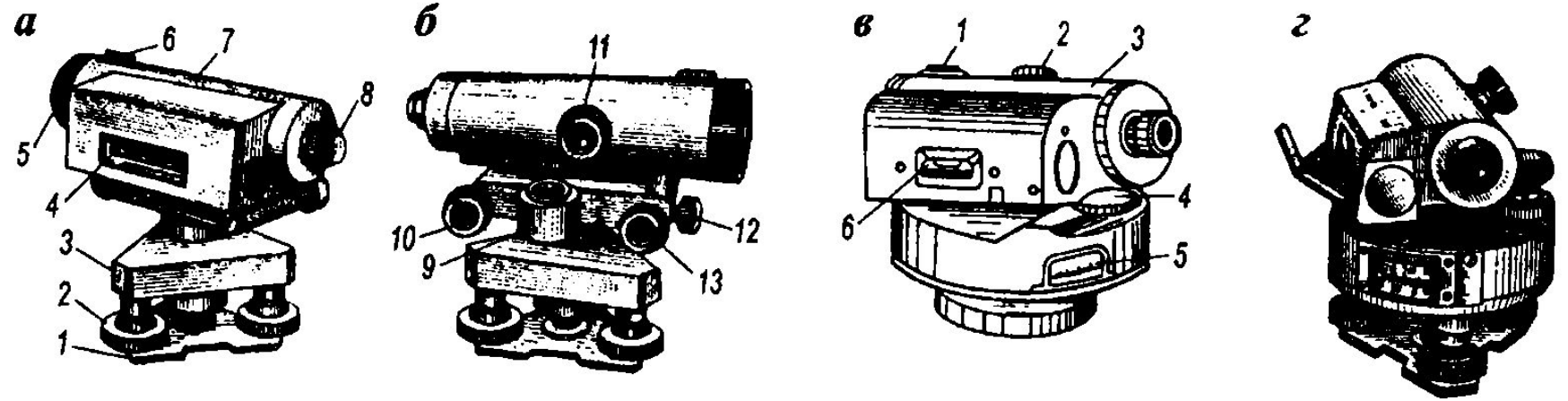


Рис. 97. Нивелиры с уровнем при зрительной трубе: точный нивелир Н-3: а — вид слева; б — вид справа; технические нивелиры: в — Н-10Л; г — 2Н-10Л

Нивелиры различаются по двум основным признакам: по точности и по способу приведения визирной оси в горизонтальное положение.

Согласно ГОСТу по *точности* нивелиры делятся на три типа:

1) Н-05 — *нивелир высокоточный* с оптическим микрометром для определения превышений с погрешностью не более 0,5 мм на 1 км двойного хода; предназначен для нивелирования I и II классов;

2) Н-3 — *нивелир точный* для определения превышений с погрешностью не более 3 мм на 1 км двойного хода; служит для нивелирования III и IV классов и при инженерно-геодезических изысканиях;

3) Н-10 — *нивелир технический* для определения превышений с точностью не более 10 мм на 1 км двойного хода; предназначен для нивелирования при обосновании топографических съемок, инженерно-геодезических изысканиях и в строительстве.

По способу установки визирной оси в горизонтальное положение различают два типа нивелиров:

1) нивелиры с уровнем при зрительной трубе (Н-05, Н-3, Н-10);

2) нивелиры с компенсатором (Н-05К, Н-3К, Н-10К).

*У нивелиров первого типа зрительная труба и цилиндрический уровень скреплены вместе и могут наклоняться на небольшой угол относительно подставки прибора с помощью элевационного винта; такая конструкция облегчает приведение визирной оси в горизонтальное положение по цилиндрическому уровню. **Главное условие**, предъявляемое к таким нивелирам, — взаимная параллельность визирной оси VV и оси цилиндрического уровня UU (рис. 94). При соблюдении этого условия визирная ось зрительной трубы 1 займет горизонтальное положение после установки пузырька цилиндрического уровня 2 в нуль-пункте.*

У нивелиров с компенсаторами (с самоустанавливающейся линией визирования) приближенная установка оси вращения прибора производится по круглому уровню; после этого в работу включается компенсатор, который автоматически приводит визирную ось в горизонтальное положение. *Главное условие*, предъявляемое к нивелирам данного типа, — *горизонтальность визирной оси в пределах углов стабилизации компенсатора ($\pm 8-25''$)*. Нивелиры с компенсаторами в последние годы получили широкое распространение в инженерно-геодезической практике, так как обеспечивают более высокую производительность труда, особенно при работе на неустойчивых грунтах.

Нивелирные рейки. Установка реек в отвесное положение

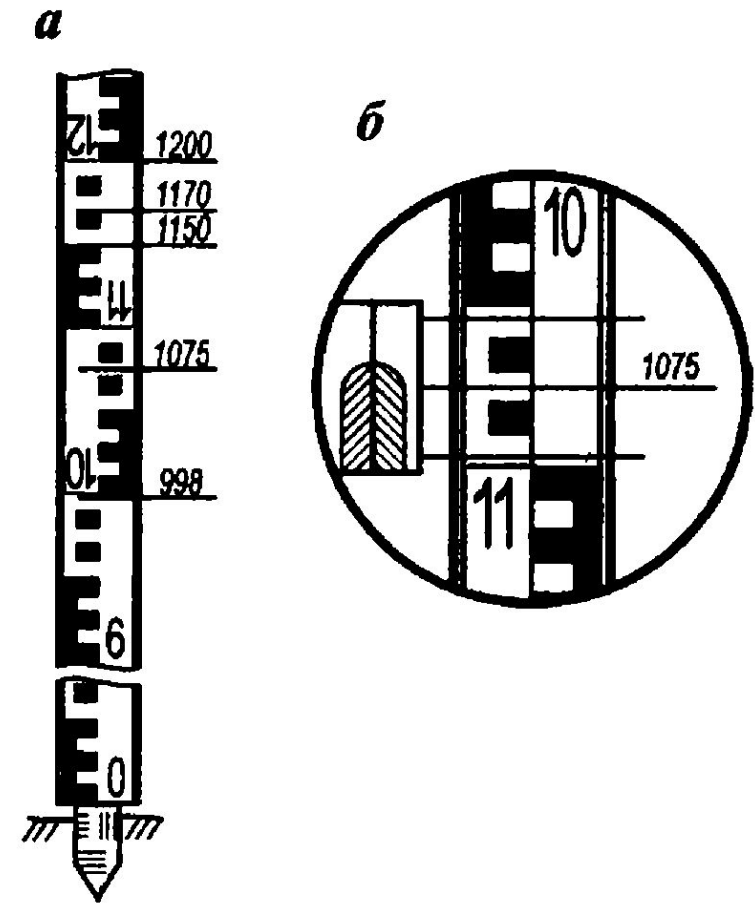


Рис. 96. Взятие отсчетов по рейке:
а — вид рейки; б — изображение рейки в поле зрения трубы

Поверки и юстировки нивелиров

1. Поверка круглого уровня. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира.

Круглый уровень устанавливают параллельно линии двух подъемных винтов и, действуя тремя подъемными винтами, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. Затем поворачивают верхнюю часть нивелира на 180° относительно исходного положения. Если после этого пузырек уровня остался в нуль-пункте, то условие выполнено. В противном случае, действуя исправительными винтами уровня, перемещают пузырек к нуль-пункту на половину дуги его отклонения. Затем подъемными винтами вновь выводят пузырек уровня в нуль-пункт и повторяют те же действия до выполнения условия.

2. Поверка сетки нитей. Горизонтальный штрих сетки нитей должен быть перпендикулярен, а вертикальный штрих – параллелен оси вращения нивелира.

Перпендикулярность горизонтального и вертикального штрихов сетки нитей гарантируется заводом-изготовителем. Поэтому поверка этого условия может быть выполнена различными способами.

I способ. На расстоянии 20–25 м от нивелира подвешивают отвес (рис. 99, а). По круглому уровню тщательно приводят ось вращения нивелира в отвесное положение. Зрительной трубой визируют на отвес и совмещают один из концов вертикального штриха сетки с нитью отвеса. Если другой конец вертикального штриха отходит от нити отвеса более чем на 0,5 мм, то проводят исправление положения сетки нитей.

II способ. Нивелир наводят на рейку так, чтобы ее изображение в трубе оказалось в левой части поля зрения (рис. 99, б, позиция 1), и берут отсчет по горизонтальной нити сетки. Поворотом нивелира переводят изображение рейки в правую часть поля зрения трубы (рис. 99, б, позиция 2) и вновь берут отсчет по рейке. Взятые отсчеты не должны различаться более чем на 1 мм.

3. Проверка главного геометрического условия. У нивелиров с цилиндрическим уровнем (Н-3, Н-10) ось цилиндрического уровня должна быть параллельна визирной оси зрительной трубы.

У нивелиров с компенсаторами (Н-3К, Н-10К) визирная ось зрительной трубы должна быть горизонтальной в пределах работы компенсатора.

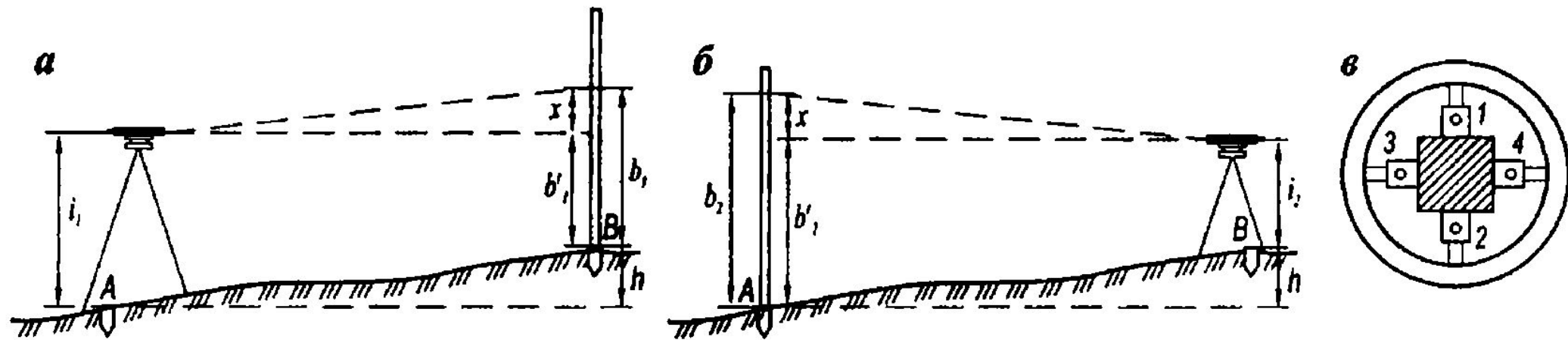


Рис. 100. Схема проверки главного геометрического условия:

а, б — взаимное положение нивелира и рейки;

в — юстировочные винты цилиндрического уровня нивелира Н-3

Поверка нивелиров с цилиндрическими уровнями выполняется двойным нивелированием «вперед» одной и той же линии длиной 40 — 60 м с разных ее концов. Для этого концы линии АВ (рис. 100) закрепляют на местности кольями. Нивелир располагают над точкой А (рис. 100, а), производят предварительную установку нивелира по круглому уровню и измеряют высоту прибора i с точностью до миллиметра. В точке В отвесно устанавливают рейку, с помощью элевационного винта приводят пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт и делают отсчет b_1 по рейке.

Если визирная ось и ось цилиндрического уровня непараллельны, то вместо правильного отсчета b'_1 по рейке будет взят отсчет b_1 , содержащий погрешность x . Тогда превышение точки В над точкой А будет

$$h = i_1 - b'_1 = i_1 - (b_1 - x). \quad (136)$$

Затем меняют местами нивелир и рейку (рис. 100, б), измеряют высоту прибора i_2 и берут отсчет по рейке b_2 . Отсчет b_2 будет ошибочным на ту же величину x , тогда

$$h = b'_2 - i_2 = b_2 - x - i_2. \quad (137)$$

Решая уравнения (136) и (137) относительно x , получают

$$m_h = m_{\text{взгл}} \sqrt{2}. \quad (138)$$

Основные источники погрешностей геометрического нивелирования

На точность геометрического нивелирования основное влияние оказывают погрешности прибора, личные погрешности наблюдателя и погрешности, обусловленные влиянием внешних условий. Как известно, при нивелировании из середины превышения между точками

$$h = a - b,$$

где a , b — отсчеты (взгляды) соответственно по задней и передней рейкам.

Если m_a и m_b — средние квадратические погрешности взглядов по рейкам, то погрешность в превышении будет

$$m_h = \sqrt{m_a^2 + m_b^2}. \quad (139)$$

Принимая $m_a = m_b = m_{взгл}$, имеем

$$m_h = m_{взгл} \sqrt{2}. \quad (140)$$

На точность взятия отсчетов по рейке влияет ряд факторов, важнейшими из которых являются следующие.

1. Погрешность приведения визирной оси зрительной трубы в горизонтальное положение, вызванная неточностью установки пузырька уровня в нуль-пункт и его недостаточной чувствительностью, определяется из соотношения

$$m_{ур} = \frac{m_{уст} \cdot d}{\rho}, \quad (141)$$

где $m_{уст}$ — погрешность установки пузырька уровня в нуль-пункт, принимаемая $m_{уст} = 0,4\tau$ (τ — цена деления уровня); d — расстояние от нивелира до рейки.

При $\tau = 20''$, $d = 100$ м погрешность

$$m_{ур} = \frac{2'' \times 100\,000 \text{ мм}}{206\,265''} \approx 1 \text{ мм.}$$

2. Погрешность собственно отсчета по рейке, определяемая по формуле проф. А.С. Чеботарева

$$m_{o,p} = 0,156 \frac{d}{\Gamma} + 0,040t, \quad (142)$$

где d — расстояние от нивелира до рейки, м; Γ — увеличение зрительной трубы; t — цена деления рейки, мм.

При $d = 100$ м, $\Gamma = 30^{\times}$ и $t = 10$ мм

$$m_{o,p} = 0,156 \times \frac{100}{30} + 0,040 \times 10 \approx 0,9 \text{ мм.}$$

3. Погрешность отсчета, зависящая от разрешающей способности зрительной трубы:

$$m_{p,m} = \frac{60''}{\Gamma \rho''} \cdot d. \quad (143)$$

$$\text{При } d = 100 \text{ м и } \Gamma = 30^{\times} \quad m_{p,m} = \frac{60'' \times 100 \text{ 000 мм}}{30^{\times} \times 206 \text{ 265}''} \approx 1 \text{ мм.}$$

Предельная погрешность определения превышения (предельная высотная невязка) на 1 км хода составит

$$f_h = 3m_{\text{км}} = 17 \text{ мм},$$

а при длине хода $L_{\text{км}}$ $f_h = 17 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}$,

что соответствует требованиям нивелирования IV класса.

В приведенном выше расчете не учтено влияние на точность определения превышений таких погрешностей, как наклон реек, невыполнение главного геометрического условия в нивелире, остаточное влияние кривизны Земли и рефракции, влияние внешних условий и др. Технической инструкцией по нивелированию установлен несколько больший допуск, составляющий для нивелирования IV класса

$$f_{h_{\text{доп}}} = 20 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}, \quad (146)$$

где $f_{h_{\text{доп}}}$ — допустимая высотная невязка нивелирного хода IV класса.

Аналогично можно рассчитать точность нивелирования III класса и технического нивелирования.

Нивелирование на станции

2

2. Визируют на черную сторону рейки P_2 и, выполнив те же действия, берут отсчеты b'_q, b''_q .

3. По сигналу наблюдателя реечники поворачивают рейки красной стороной, после чего наблюдатель производит отсчеты сначала по передней P_2 , а затем по задней рейке P_1 , но только по среднему штриху ($b_{кр}, a_{кр}$).

Результаты измерений заносят в журнал установленной формы. На каждой станции выполняют вычисления и контроль наблюдений, для чего:

а) по отсчетам по дальномерным штрихам подсчитывают расстояние от нивелира до реек:

$$d_3 = (a'_q - a''_q) \cdot 100, \quad d_n = (b'_q - b''_q) \cdot 100,$$

сравнивают их с результатами непосредственного измерения тросом (бечевой) и вычисляют неравенство плеч $\Delta d = d_3 - d_n$;

Высотная невязка в нивелирном ходе, опирающемся на два исходных пункта, определяется из выражения:

$$f_h = \sum h - (H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}), \quad (147)$$

где $\sum h$ — сумма средних превышений в ходе, определенных из нивелирования в прямом и обратном направлениях; $H_{\text{кон}}$, $H_{\text{нач}}$ — отметки, соответственно, конечного и начального пунктов хода.

Согласно инструкции допустимая высотная невязка в нивелирных ходах III класса не должна превышать величины

$$f_{h_{\text{дон}}} = 10 \text{ мм} \sqrt{L}, \quad (148)$$

где L — длина хода, км.

Если фактическая невязка не превышает допустимую, т. е. $f_h \leq f_{h_{\text{дон}}}$, то проводят уравнивание нивелирной сети одним из строгих способов, основанных на принципе метода наименьших квадратов. По исправленным превышениям вычисляют отметки постоянных и временных реперов и значения их заносят в каталог высот пунктов нивелирования.

Техническое нивелирование

Техническое нивелирование производится с целью создания высотного обоснования топографических съемок масштабов 1:500 — 1:5000, а также при изысканиях, проектировании и строительстве различного рода инженерных сооружений.

Нивелирные ходы, прокладываемые для определения высот пунктов съемочного обоснования, должны опираться на пункты высшего класса. В исключительных случаях разрешается прокладывать висячие ходы, опирающиеся на твердую точку; при этом ходы прокладываются в прямом и обратном направлениях. Максимальная длина хода принимается в зависимости от характера рельефа местности, масштаба съемки и высоты сечения рельефа; так, например, предельная длина хода между двумя пунктами высшего класса при высоте сечения рельефа $h \geq 1$ м составляет 16 км, висячего хода — 4 км.

Техническое нивелирование для создания высотного обоснования съемок выполняется способом из середины техническими нивелирами с использованием двухсторонних шашечных реек. Расстояние от нивелира до реек допускается до 150 м, неравенство плеч — не более 10 м, а их накопление в секции — до 50 м. Отсчеты по рейкам берутся только по средней нити. Разность значений превышения на станции, определенных по черной и красным сторонам реек, не должна превышать 5 мм.

Допустимая высотная невязка ходов и полигонов технического нивелирования определяется по формулам:

$$f_{\text{ход}} = 50 \text{ мм} \sqrt{L} \quad (149)$$

или

$$f_{\text{ход}} = 10 \text{ мм} \sqrt{n}, \quad (150)$$

где n — число станций.

Формула (150) применяется при нивелировании в гористой местности, когда число станций $n \geq 25$ на 1 км хода.

Техническое нивелирование, выполняемое с целью обеспечения строительства сооружений линейного типа (железных или шоссейных дорог, трубопроводов, линий электропередач, каналов и т. д.), называется *продольным*. Для получения детального топографического плана на участке строительства крупных объектов при решении вопросов, связанных с вертикальной планировкой территории и подсчетом объемов земляных масс, выполняют *нивелирование поверхности (площади)*. В случае, когда техническое нивелирование предназначается для решения конкретных инженерных задач, его точность регламентируется ведомственными инструкциями.

Продольное инженерно-техническое нивелирование

Основные этапы работ. Проектирование трассы. Инженерно-техническое нивелирование, выполняемое для обеспечения строительства линейных объектов, ведется по предварительно намеченной линии, представляющей собой ось будущего сооружения и называемой *трассой*. Весь цикл работ по его производству складывается из составления проекта, полевых и камеральных работ. *Полевые работы* включают рекогносцировку местности, разбивку пикетажа, поперечников и кривых, съемку полосы местности вдоль трассы, нивелирование трассы и поперечников. *Камеральные работы* состоят из обработки журналов нивелирования и составления профилей трассы и поперечников. *Профиль* служит в дальнейшем основой для проектирования сооружения согласно заданным техническим условиям.

Проектирование трассы выполняют по топографическим картам и планам либо аэрофотоснимкам. В зависимости от характера рельефа местности различают трассирование линейного сооружения **по заданному направлению и по заданному уклону**. Трассирование по заданному направлению выполняют в равнинных и слабопересеченных районах, где естественные уклоны не превышают допустимых. В условиях холмистой и гористой местности, где уклоны значительно превышают допустимые значения, трассы проектируют по заданному уклону (см. § 27).

Разнообразие видов линейных сооружений, их эксплуатационные и конструктивные особенности обуславливают некоторые различия в производстве инженерно-геодезических работ в каждом конкретном случае. Наиболее типичной является программа геодезических измерений при дорожных изысканиях, рассматриваемая далее.

Рекогносцировка и разбивка пикетажа на трассе. Съемка полосы местности вдоль трассы. Направление и основные точки трассы устанавливаются в соответствии с ее проектом, намеченным на карте. В процессе рекогносцировки уточняют проектное положение трассы на местности и закрепляют точки поворота трассы деревянными столбами. При этом стремятся иметь минимальное число углов поворота; стороны трассы должны быть по возможности длинными, проходить по местности с небольшими уклонами, твердым грунтом и наименьшим количеством препятствий.

Плановой основой продольного нивелирования служит теодолитный ход, прокладываемый по трассе, в который включают все вынесенные в натуру основные точки трассы (начало и конец трассы, вершины углов поворота и др.). В процессе проложения теодолитного хода производят вешение линий между вершинами углов (ВУ) поворота трассы, измеряют горизонтальные углы, длины сторон и разбивают пикетаж (рис. 102).

Горизонтальные углы (правые или левые по ходу) в вершинах углов поворота трассы измеряют техническим теодолитом одним приемом. *Углом поворота трассы φ* (рис. 102, б) считается угол между продолжением предыдущего направления и новым направлением трассы. Как видно из рис. 102, б, в приведенном случае $\varphi = 180^\circ - \beta_{\text{лев}}$ или $\varphi = \beta_{\text{пр}} - 180^\circ$.

Измерение длин сторон и разбивку пикетажа производят 20-метровой мерной лентой в одном направлении с контролем по нитяному дальномеру.

Разбивка пикетажа заключается в откладывании по трассе горизонтальных отрезков по 100 м, начиная от начального пункта трассы (см. рис. 102, а). При углах наклона скатов местности $\nu > 3^\circ$ в откладываемые наклонные отрезки $D = 100$ м вводят поправки за наклон ΔD_n (со знаком «плюс»); углы наклона измеряют эклиметром. Концы каждого из отрезков, называемых *пикетами*, закрепляют деревянными кольями, забиваемыми вровень с землей; при нивелировании на эти колья устанавливают рейки. Рядом забивают *сторожок*, на котором подписывают номер пикета (например, *ПКО, ПК1* и т. д.). Начало трассы обозначают *ПКО*, в результате чего номер пикета обозначит расстояние в сотнях метров от начала трассы.

Характерные точки перегиба скатов, а также места пересечения трассы с различными естественными препятствиями (овраги, реки и т. п.) и инженерными сооружениями (дороги, подземные и наземные коммуникации) отмечают «плюсовыми» точками, которые обозначают на местности сторожками. Их положение на трассе определяется номером предыдущего (младшего) пикета плюс расстояние от этого пикета до «плюсовой» точки (например, ПК1 + 65,3).

В характерных местах рельефа перпендикулярно к направлению трассы с помощью эскера и мерной ленты разбивают *поперечники*, длина которых зависит от ширины сооружения. На поперечнике закрепляют кольями его концы, точку пересечения с осью трассы и точки перегиба скатов вправо и влево от оси трассы. На сторожках подписывают пикетные обозначения точек поперечников (например, $\frac{ПК0+87,2}{Л25}$).

Через каждые 1,5–2 км трассы закладывают временные реперы, а через 15–25 км вне зоны влияния будущих земляных работ — грунтовые реперы постоянного типа.

Одновременно с разбивкой пикетажа по обеим сторонам от оси трассы производят контурную съемку полосы местности шириной 100–200 м. Обычно в полосе шириной до 25 м влево и вправо от трассы съемку ситуации выполняют способом ординат с использованием мерной ленты, эккера и вех; съемка полосы от 25 до 50–100 м в обе стороны от трассы выполняется глазомерно.

Данные по разбивке пикетажа и результаты съемки ситуации заносят в *пикетажную книжку*, которая ведется в определенном масштабе (1:1000–1:5000) на листах миллиметровой бумаги (рис. 102, в). На каждой станции пикетажной книжки проводится ось трассы, показываются расположения пикетов, плюсовых точек на поперечниках, вершин углов поворота и их обозначения с элементами кривых, характерных точек ситуации, даются необходимые размеры, полученные в результате съемки, с пояснительными записями; повороты трассы показывают стрелками.

Разбивка закруглений на трассе. Прямолинейные участки дороги в углах поворотов сопрягаются плавными кривыми, из которых наиболее простой является *круговая кривая* (рис. 103, а).

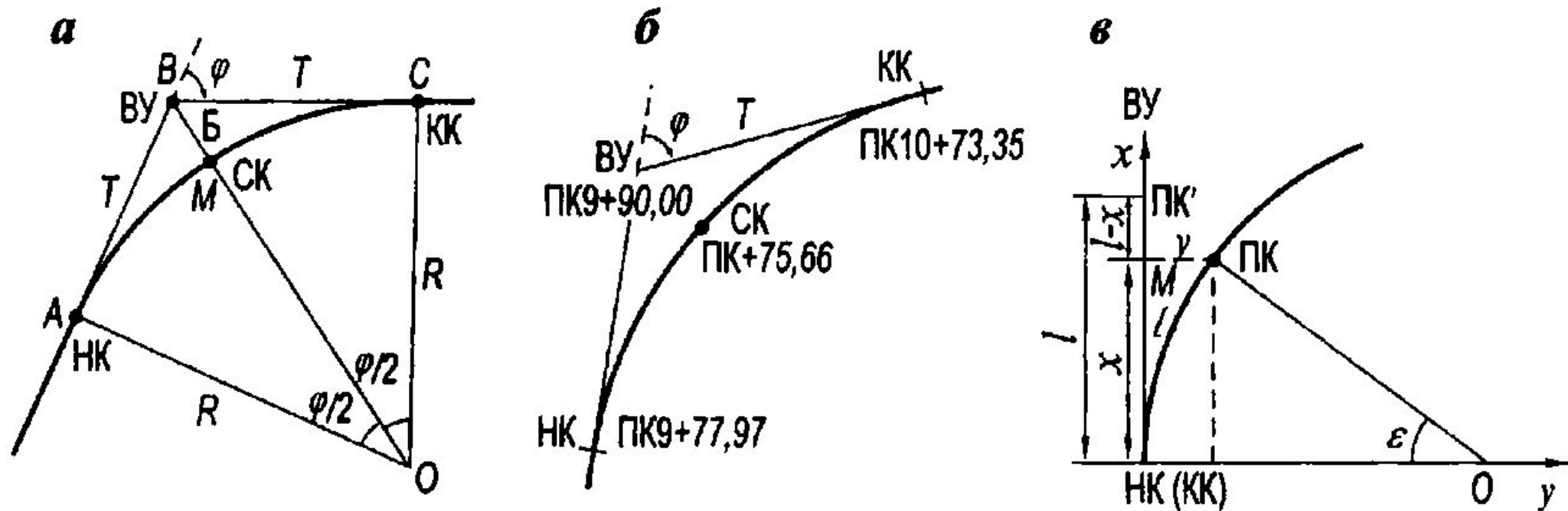


Рис. 103. Схема разбивки закруглений:

а — схема разбивки кривой в главных точках; б — пикетажное обозначение главных точек кривой; в — схема выноса пикетов на кривую

Разбивка кривой в главных точках. Разбивка ее на местности заключается в определении планового положения трех главных точек: начала кривой (НК), середины кривой (СК) и конца кривой (КК). Положение этих точек определяют по **основным элементам кривой**, к которым относятся: угол поворота трассы φ , радиус кривой R , тангенс T — длина касательной $AB = BC$, кривая K — длина дуги AMC , домер D и биссектриса B — отрезок BM .

Угол поворота трассы рассчитывается по измеренному горизонтальному углу в точке поворота; величина радиуса кривой назначается исходя из условий местности и технических параметров и нормативов. По углу поворота φ и радиусу R рассчитывают элементы T , K , B , и D . Из рис. 103, а следует:

$$T = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}; \quad (151)$$

$$K = \cup AMC = \frac{\varphi^\circ}{180^\circ} \cdot \pi R; \quad (152)$$

$$B = OB - OM = \frac{R}{\cos \frac{\varphi}{2}} - R = R(\sec \frac{\varphi}{2} - 1) = 2R \frac{\sin^2 \frac{\varphi}{4}}{\cos \frac{\varphi}{2}}; \quad (153)$$

$$D = 2T - K. \quad (154)$$

После закрепления на местности главных точек кривой производят вынос пикетов на кривую.

Вынос пикетов на кривую. При разбивке трассы на участках закруглений пикеты временно закрепляют на тангенсах, а затем переносят на кривую. Задачу по выносу пикетов на кривую решают способом прямоугольных координат; при этом начало координат условно располагают в точках НК и КК, за оси абсцисс принимают направление тангенсов, а за оси ординат — направление по радиусам из точек НК и КК к центру кривой O (рис. 103, в).

Сначала устанавливают, в какой половине кривой находится выносимый пикет. Для этого находят длину дуги l между пикетом и НК. Если $l < 1/2K$, то пикет находится в первой половине кривой, а при $l > 1/2K$ — во второй. Определяют центральный угол ε , стягивающий дугу l , по формуле

$$\varepsilon = \frac{180^\circ}{\pi R} \cdot l. \quad (155)$$

Вычисляют прямоугольные координаты пикета: (156)

$$x = R \sin \varepsilon; \quad y = R - R \cos \varepsilon = 2R \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}.$$

Нивелирование трассы. Для определения высот точек трассы (пикетных, плюсовых, точек поперечников) по трассе прокладывают нивелирный ход, в который включают все постоянные и временные реперы. Абсолютная отметка нулевого пикета находится из привязки к пунктам нивелирной сети.

Нивелирование выполняется техническим нивелиром способом из середины. Расстояние от нивелира до реек принимается в среднем равным 100 м, при особо благоприятных условиях (в равнинной местности и хороших погодных условиях) — до 150 м, при неблагоприятных — 50 м и менее.

На каждой станции две точки пикетажа являются *связующими*, а остальные (плюсовые и точки поперечника) — обычно *промежуточными*. Длинные поперечники в условиях сложного рельефа нивелируют отдельными ходами. При расстояниях от нивелира до реек $l = 50$ м связующими служат все пикетные точки (ПК 0, 1, 2, 3, ...), при $l = 100$ м — пикетные точки с четными номерами (ПК 0, 2, 4, ...), при $l = 150$ м — каждая третья пикетная точка (ПК 0, 3, 6, ...). При сложном рельефе связующими могут быть также плюсовые точки.

Для исключения грубых и ослабления влияния случайных погрешностей нивелирование производят с контролем хода, осуществляемым одним из следующих способов.

1. Нивелирование трассы двумя нивелирами. При этом одним нивелиром нивелируют все связующие и промежуточные точки, а вторым — только связующие, от которых зависит правильность передачи отметок по трассе. Данный способ обеспечивает надежный контроль нивелирования путем сличения превышений между одноименными связующими точками; их разность не должна превышать 10 мм.

2. Нивелирование трассы одним нивелиром в прямом и обратном направлениях (двойное нивелирование). В этом случае в прямом ходе нивелируют все связующие и промежуточные точки, а в обратном — только связующие. Как и в первом способе, разница в превышениях между одноименными связующими точками, определенных из прямого и обратного ходов, не должна превышать 10 мм.

№ станции	№ пикетов	Отсчеты по рейке			Превышения h , мм		Средние превышения h_{cp} , мм		Горизонт прибора ГП, м	Абсолютная отметка H , м	Профильная отметка $H_{проф}$, м
		задний a	передний b	промежуточный c	+	-	+	-			
1	0	1035(1) 5722(4)			1201			-1	164,849	163,815	13,82
	1		2236(2) 6925(3)		1203			1202		162,612	12,61
	+22 +68			0652(5) 2730(6)						164,849 162,119	14,20 12,12
2	1	1326 6013				1212		-1		162,612	
	2		2538 7222			1209		1210		161,401	11,40
3	2	0816 5503				413		-1	162,217	161,401	
	3		1229 5913			410		412		160,988	10,99
	+28 +67			1923 1639						160,294 160,578	10,29 10,58
4	3	2615 7302			1403			-1	163,602	160,988	
	4		1212 5903		1399			1401		162,388	12,39
	Л25			2513						161,089	11,09
	Л16			2076						161,526	11,53
	+45 П10 П25			1732 2039 2716						161,870 161,563 160,866	11,87 11,56 10,89
5	4	2705 7390			2077			-1		162,388	
	x_i		0628 5315		2075			2076		164,463	
6	x_i	2765 7455			1761			-1		164,463	
	5		1004 5691		1764			1762		166,224	16,22
.....											
Постраничный контроль		$\Sigma=50647$	$\Sigma=45816$								
		$\frac{\Sigma a - \Sigma b}{2} = +2416$			$\frac{\Sigma h}{2} = +2416$	$\Sigma h_{cp} = +2415$				$\Sigma h_{пр} = +2415$ $\Sigma h_{кр} = -2403$ $f_h = +12 \text{ мм}; n=12$ $f_{h_{\text{теор}}} = 50\sqrt{1,0} = 50 \text{ мм}$ $\delta_h = -\frac{+12 \text{ мм}}{12} = -1 \text{ мм}$	

Обработка журналов нивелирования

Обработку журналов нивелирования начинают с проверки всех записей и вычислений, выполненных в поле. С целью выявления возможных погрешностей в вычислениях на каждой странице журнала выполняют *постраничный контроль*. Он заключается в подсчете сумм отсчетов на связующие точки по задней (Σa) и передней (Σb) рейкам, а также сумм превышений по черной и красной сторонам реек и средних превышений на станциях (табл. 11); при этом должно соблюдаться равенство

$$\frac{\Sigma a - \Sigma b}{2} = \frac{\Sigma h}{2} = \Sigma h_{cp}$$

Расхождения в 1 – 2 мм могут возникнуть за счет округления значений средних превышений до целого числа миллиметров. Отсчеты по рейкам на промежуточных точках в постраничном контроле не участвуют. Невязка представляет собой разность суммы измеренных средних превышений Σh_{cp} и известного (теоретического) превышения между конечной и начальной точками хода, т. е.

$$f_h = \Sigma h_{cp} - \Sigma h_0 \tag{157}$$

При этом возможны следующие случаи.

1. *Нивелирный ход проложен между двумя реперами.* В этом случае фактическая высотная невязка хода

$$f_h = \sum h_{cp} - (H_{кон} - H_{нач}),$$

где $(H_{кон} - H_{нач}) = h_0$ — известное превышение между конечной и начальной точками хода.

2. *Замкнутый нивелирный ход.* Поскольку ход начинается и заканчивается на одной и той же точке, то известное превышение $h_0 = 0$. Тогда

$$f_h = \sum h_{cp}.$$

3. *Висячий нивелирный ход,* опирающийся на одну твердую точку.

Если нивелирование хода выполнялось двумя нивелирами, то сумма превышений $\sum h_I$ для первого нивелира должна равняться сумме превышений $\sum h_{II}$ для второго нивелира. Следовательно,

$$f_h = \sum h_I - \sum h_{II}. \quad (158)$$

При нивелировании хода в прямом и обратном направлениях сумма превышений прямого хода $\sum h_{пр}$ должна равняться сумме превышений обратного хода $\sum h_{обр}$ по абсолютной величине, но с противоположным знаком. Тогда

$$f_h = \sum h_{пр} + \sum h_{обр} . \quad (159)$$

В рассмотренном выше примере (см. табл. 11) $\sum h_{пр} = +2415$ мм, $\sum h_{обр} = -2403$ мм; $f_h = +12$ мм.

Как уже отмечалось ранее, фактическая высотная невязка хода технического нивелирования не должна превышать *допустимую*, определяемую по формулам (149) или (150):

$$f_{h_{\text{доп}}} = 50 \text{ мм} \sqrt{L}, \text{ или } f_{h_{\text{доп}}} = 10 \text{ мм} \sqrt{n},$$

где L — длина хода, км; n — число станций в ходе.

После увязки нивелирного хода и определения отметок связующих точек вычисляют отметки *промежуточных* точек через горизонт прибора ГП (см. рис. 92, в, с. 202). Для этого на станции дважды вычисляют ГП относительно задней и передней связующих точек и из двух значений берут среднее:

$$ГП' = H_z + a_v; \quad ГП'' = H_n + b_v; \quad ГП = \frac{ГП' + ГП''}{2},$$

где H_z и H_n — отметки задней и передней связующих точек; a_v , b_v — отсчеты по черным сторонам реек, установленных на задней и передней связующих точках.

В рассмотренном примере (см. табл. 11) на станции 1:

$$ГП' = 163,815 + 1,035 = 164,850 \text{ м};$$

$$ГП = 164,849 \text{ м}.$$

$$ГП'' = 162,612 + 2,236 = 164,848 \text{ м};$$

Отметки промежуточных точек получают вычислением отсчетов по черной стороне рейки, установленной на соответствующей промежуточной точке, из отметки ГП, т. е.

$$H_{\text{пром}} = ГП - c.$$

Например, отметки промежуточных точек ПК0 + 22 и ПК0 + 68:

$$H_{\text{ПК0}+22} = 164,849 - 0,652 = 164,197 \text{ м},$$

$$H_{\text{ПК0}+68} = 164,849 - 2,730 = 162,119 \text{ м}.$$

Аналогичным образом вычисляют отметки точек поперечных профилей.

Построение продольного профиля проводится в следующем порядке (рис. 104).

1. Выбирают *условный горизонт (УГ)* с таким расчетом, чтобы профиль трассы в самой низкой своей точке располагался на 5 — 7 см выше линии условного горизонта; при этом отметка УГ должна быть кратной 10 м.

2. Ниже линии УГ строят *сетку профиля*, в отдельных графах которой размещают фактические и проектные данные по профилю. Для определенного типа сооружений установлено стандартное содержание и расположение линий и граф сетки, назначение которых определяется подписями.

3. На линии УГ откладывают пикеты и плюсовые точки в соответствующем горизонтальном масштабе. На перпендикулярах в этих точках откладывают в вертикальном масштабе *профильные отметки*, определяемые как разности абсолютных отметок точек и условного горизонта (см. табл. 11), т. е.

$$H_{\text{проф}} = H_{\text{абс}} - \text{УГ}. \quad (161)$$

Соединив концы перпендикуляров, получают *фактический (черный) профиль* трассы.

4. При проектировании на профиле строят *проектную линию*, которая в будущем после выполнения инженерных работ заменит собой фактический профиль трассы. На рис. 104 проектная линия показана пунктиром. Проектную линию выбирают с учетом минимума земляных работ по выемке и насыпке грунта. При этом выбранный проектный уклон не должен превышать (либо быть менее) заданной величины, устанавливаемой согласно техническим требованиям для данного типа сооружений.

Рассчитывают проектный уклон трассы (либо отдельных ее участков) по формуле

$$i = \frac{h}{d} = \frac{H_{\kappa}^{np} - H_0^{np}}{d}, \quad (162)$$

где h — превышение концов красной линии; d — горизонтальная длина этой линии; H_{κ}^{np} , H_0^{np} — проектные отметки начала и конца проектной линии, которые берутся графически с профиля.

5. Вычисляют проектные отметки точек трассы по формуле

$$H_n^{np} = H_0^{np} + id_n, \quad (163)$$

где H_0^{np} — проектная отметка начальной точки трассы (участка трассы); d_n — горизонтальное расстояние от начальной до n -й точки трассы; i — проектный уклон линии.

6. Рассчитывают рабочие отметки точек трассы как разность проектной (красной) и фактической отметок соответствующей точки, т. е.

$$h_i^{rab} = H_i^{np} - H_i^{\phi}. \quad (164)$$

Рабочие отметки определяют высоту насыпи (знак «плюс») либо глубину выемки (знак «минус») грунта в данной точке трассы и являются основными показателями для производства земляных работ. Их значения выписывают красной тушью под профильной линией, если требуется выемка грунта, или над линией, если требуется насыпка грунта.

Нивелирование поверхности

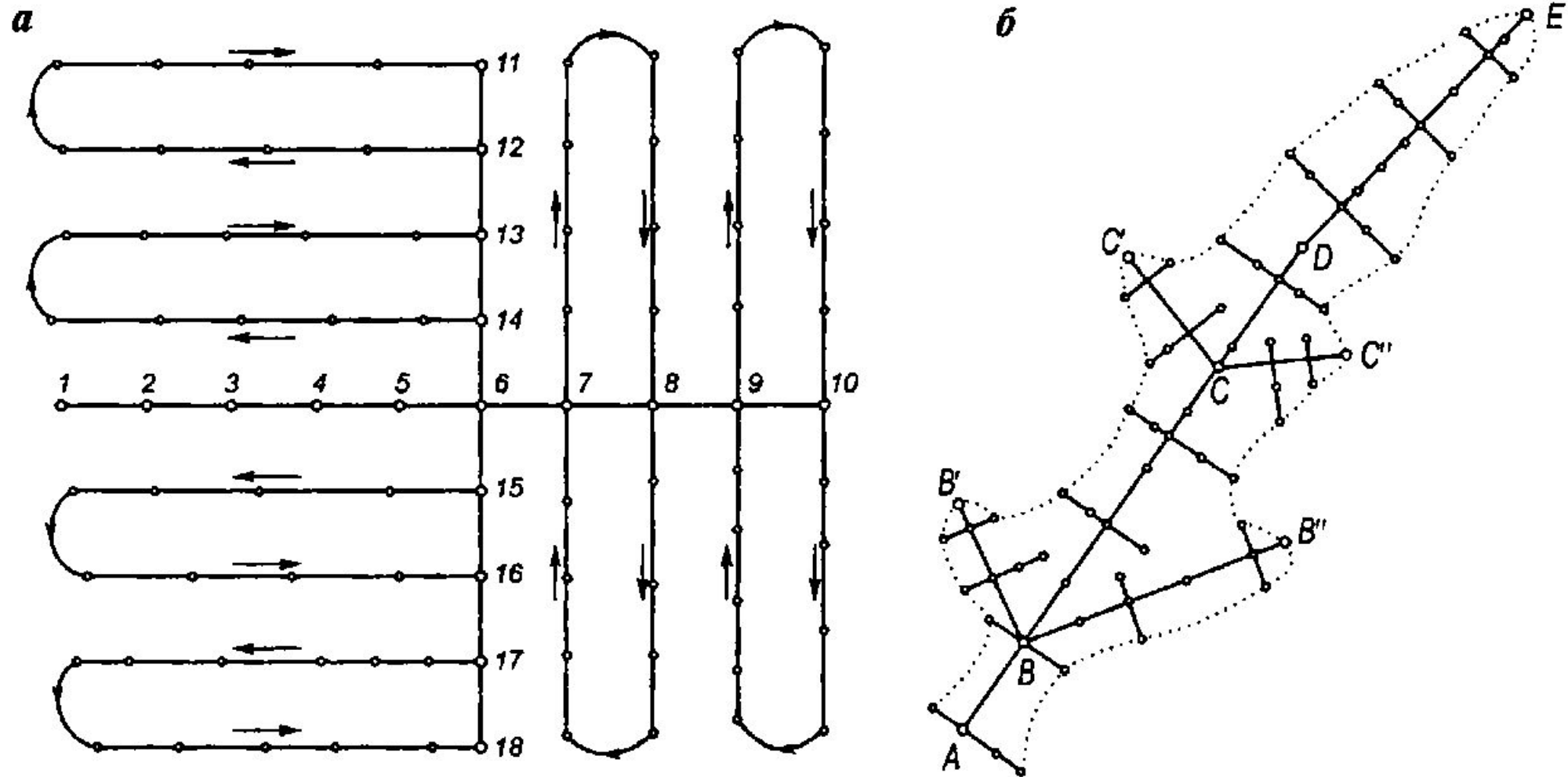


Рис. 106. Схемы нивелирования поверхности:
а — способ параллельных линий; б — способ магистралей с поперечниками

Способ параллельных линий используют при съемке равнинной или слегка всхолмленной местности, заросшей лесом или кустарником.

При этом обычно посередине снимаемого участка прокладывают основной (магистральный) ход либо два взаимно перпендикулярных основных хода (рис. 106, а), которые привязываются к пунктам плано-высотной сети. Перпендикулярно к линиям основных ходов разбивают параллельные съемочные ходы, по которым в характерных точках закрепляют пикеты. Длины съемочных ходов, как правило, не превышают 1500 м. Расстояния между съемочными ходами и между пикетами зависят от назначения съемки и требуемой точности и обычно составляют 50 — 100 м.

Точки основных ходов нивелируют по программе IV класса, а съемочные ходы — одиночными ходами технической точности, опирающимися на точки основных ходов (см. рис. 106, а). Результаты нивелирования заносят в журнал либо на схему. При обработке результатов измерений сначала уравнивают и вычисляют отметки точек основных нивелирных ходов, а затем — точек съемочных ходов.

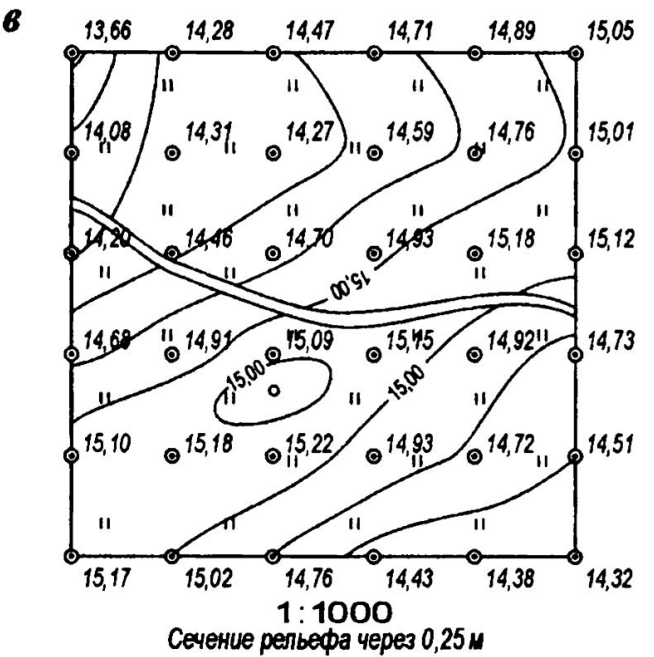
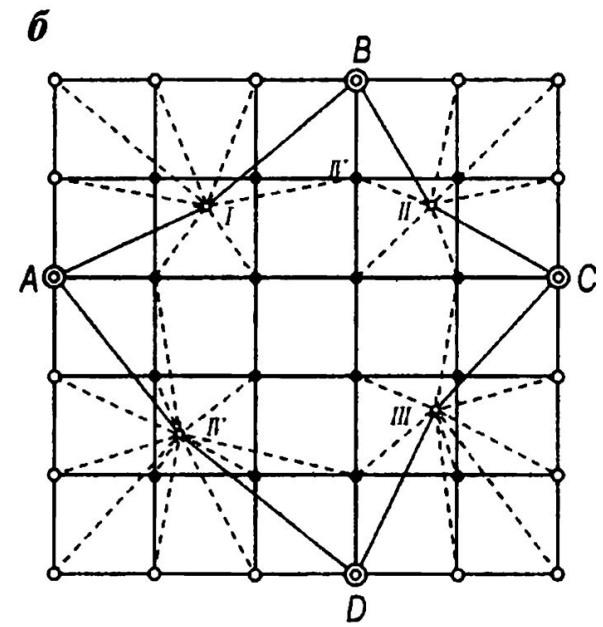
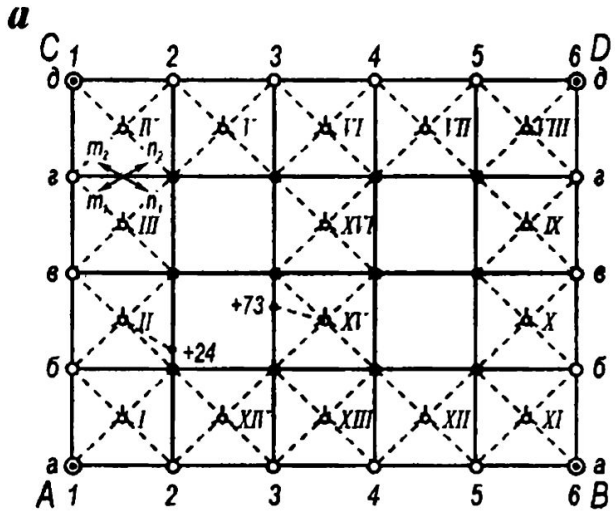
Способ магистралей с поперечниками применяют в условиях пересеченной местности при изысканиях сооружений линейного типа (каналов, дорог, траншей и т. п.). По характерным линиям рельефа (например, по линии тальвега лощины или балки) прокладывают основной магистральный теодолитный ход $ABCDEF$ (рис. 106, б) и разбивают пикетаж.

При необходимости от основной магистрали разбивают дополнительные магистрали по ответвлениям BB' и CC' и т. д. Конечные точки A и E магистрали привязывают к пунктам планово-высотной сети. В результате обработки измерений получают плановое положение точек магистрали. Перпендикулярно к магистральным линиям разбивают поперечники, густота и протяженность которых зависит от характера местности. Одновременно с разбивкой пикетажа от линий магистралей и поперечников ведется съемка ситуации с составлением абриса.

Нивелирование основной магистрали и ее поперечников проводят так же, как и нивелирование трассы. Нивелирование пикетов по дополнительным магистралям выполняют одиночными ходами, прокладываемыми от точек основной магистрали.

Способ нивелирования по квадратам применяют: при топографической съемке открытых участков местности со спокойным рельефом в крупных масштабах (1:500 – 1:5000) с малой (0,1 – 0,5 м) высотой сечения рельефа в целях составления проекта вертикальной планировки и подсчета объемов земляных работ. С учетом характера рельефа, требуемой точности его изображения, сложности и назначения строящегося сооружения разбивают сети квадратов со сторонами от 10 до 100 м.

При разбивке сетки квадратов сначала обычно строят наружный полигон в виде квадрата или прямоугольника (рис. 107, а). Для этого вдоль границы снимаемого участка на местности закрепляют опорную линию AB и на ней откладывают мерной лентой длины сторон квадратов ($A-2, 2-3, \dots, 5-B$). Затем в точках A и B последовательно устанавливают теодолит и восстанавливают перпендикуляры AC и BD к линии AB . Для контроля измеряют длину линии CD , которая не должна отличаться от длины линии AB более чем на 1:2000 ее длины. На перпендикулярах и линии CD также откладывают длины сторон квадратов. Вершины полигона $ABDC$ и точки на его сторонах закрепляют грунтовыми реперами.



Разбивка квадратов внутри полигона выполняется по створам линий 1-1, 2-2, ..., 6-6. Контроль разбивки выполняется вешением точек по перпендикулярным створам *a-a*, *б-б*, *в-в*. Вершины квадрата (пикеты) закрепляют колышками. При необходимости на сторонах квадратов в точках перегиба рельефа местности закрепляют плюсовые точки. При длинах сторон наружного полигона до 300 м разбивку квадратов удобно выполнять длинными тросами, размеченными через расстояния, равные длине стороны квадрата.

Одновременно с разбивкой пикетов производится съемка ситуации линейными промерами от сторон квадратов до характерных точек контуров и местных предметов. Результаты съемок заносят в абрис, на котором также показывают стрелками направление скатов.

Перед началом нивелирования на листе плотной бумаги вычерчивают схему квадратов, которая является одновременно и полевым журналом нивелирования. Порядок нивелирования квадратов зависит от их размеров и условий местности. При длине стороны квадратов 100 м и более каждый квадрат нивелируется отдельно (см. рис. 107, а). В этом случае сначала прокладывают замкнутый ход по наружным квадратам, а затем — по внутренним. На каждой точке отсчеты берут только по черной стороне рейки. Результаты измерений заносят на схему.

Правильность отсчетов по рейкам контролируется суммой накрест лежащих отсчетов по общей стороне, взятых с двух соседних станций. Например, значения превышения между точками *г1* и *г2* (см. рис. 107, а), определенных со смежных станций *III* и *IV*, должны быть равны, т. е.

$$m_1 - n_1 = m_2 - n_2,$$

отсюда

$$m_1 + n_2 = m_2 + n_1.$$

Расхождение сумм не должно превышать 10 мм.

При камеральной обработке сначала выполняют увязку высот по наружному полигону. Далее, принимая высоты пунктов полигонов за твердые, увязывают высоты внутренних пикетов как точек ходов, проложенных между пунктами наружного полигона.

Рис. 107. Нивелирование поверхности по квадратам:
 а — схема разбивки сетки и нивелирования поверхности по каждому квадрату;
 б — схема нивелирования сетки квадратов на основе опорного полигона;
 в — план нивелирования поверхности

При небольших (10 – 20 м) размерах сторон квадратов с одной станции нивелируют несколько квадратов. Для этого станции выбирают с таким расчетом, чтобы из связующих точек образовался замкнутый опорный полигон $ABCD$ (рис. 107, б). На одну из связующих точек передается отметка от ближайшего репера. Все остальные вершины квадратов нивелируются как промежуточные точки. Полевой контроль измерений выполняют аналогично с предыдущим случаем. Высотная невязка в замкнутом опорном ходе нивелирования должна удовлетворять условию

$$f_h = \sum h \leq 10 \text{ мм} \sqrt{n},$$

где $\sum h$ — сумма превышений связующих точек; n — число станций.

Распределение высотной невязки, вычисление исправленных превышений и высот связующих точек производят так же, как и в ходе продольного технического нивелирования. Высоты промежуточных точек на каждой станции рассчитывают через горизонт прибора.

После вычислительной обработки результатов нивелирования составляют топографический план участка местности в выбранном масштабе (см. рис. 107, в). На план наносят границы участка, вершины квадратов, плюсовые точки и ситуацию. Возле каждой пикетной и плюсовой точки подписывают ее отметку с округлением до 1 см и, пользуясь методом графической интерполяции, проводят горизонтали с заданной высотой сечения рельефа. План вычерчивают тушью в соответствии с условными знаками.

Понятие о лазерных и цифровых нивелирах

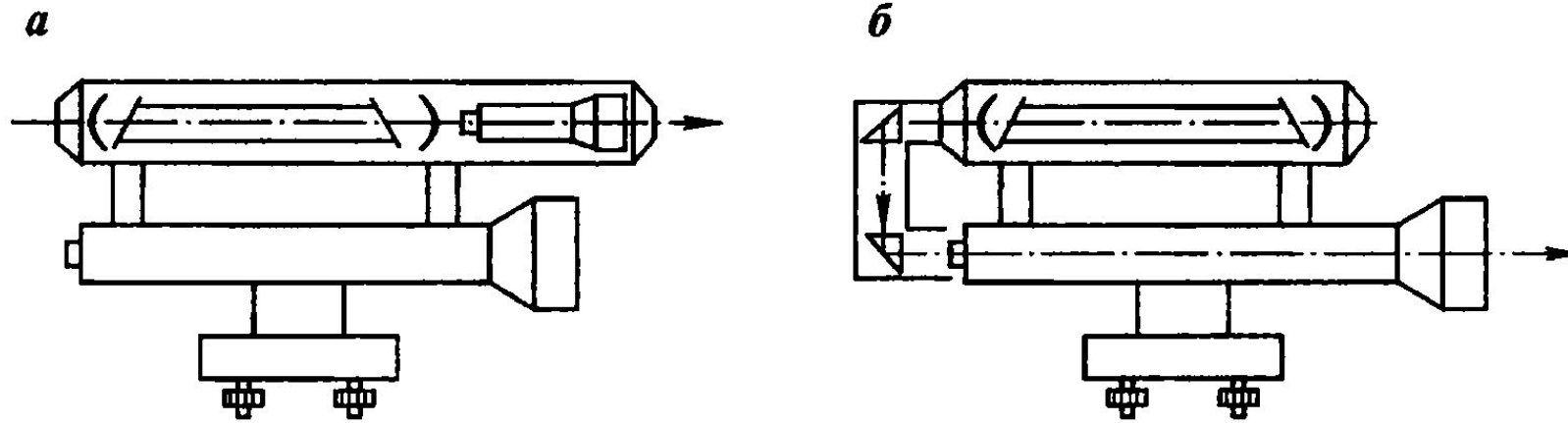


Рис. 108. Схемы лазерных насадок к нивелирам:
а — с параллельным излучателем; б — с призмным вводом светового пучка

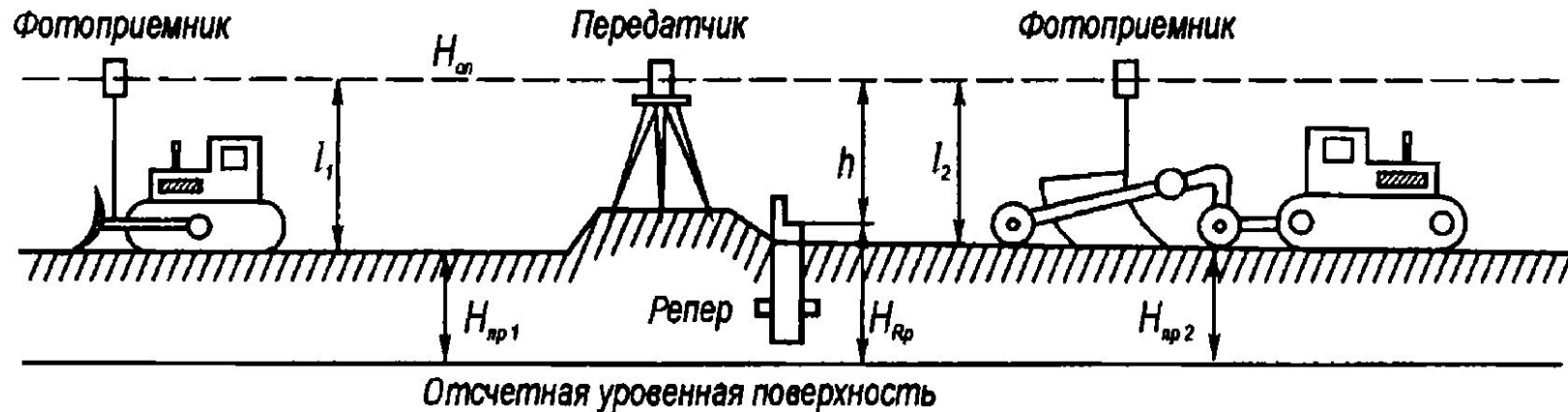


Рис. 109. Схема геодезического контроля планировки с помощью системы СКП-1

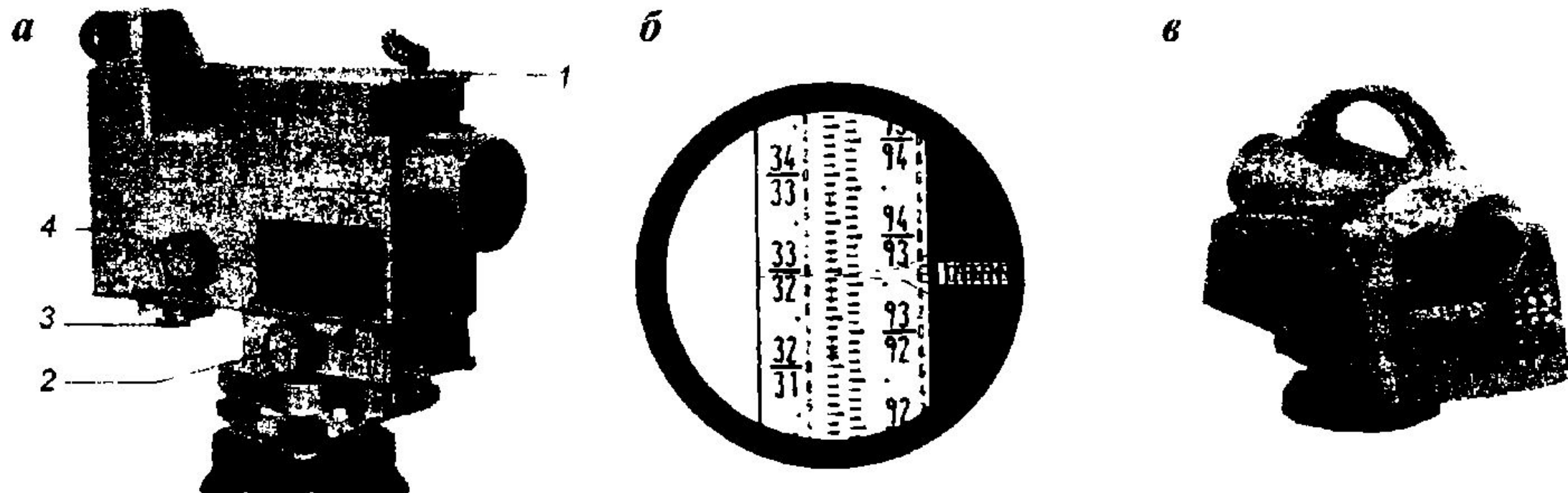


Рис. 110. Цифровые нивелиры: а — ReNi 002А (общий вид): 1 — круглый уровень; 2 — наводящий винт; 3 — рычаг переключения компенсатора; 4 — микрометрический винт; б — отсчет по рейке; в — DiNi (общий вид)