

## Лекции 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

### 4.1. Способы нивелирования.

Рельеф местности это совокупность неровностей поверхности земли; он является одной из важнейших характеристик местности. Знать рельеф - значит знать высоты всех точек местности. Высоту точки на местности определяют по превышению этой точки относительно другой точки, высота которой известна. Процесс измерения превышения одной точки относительно другой называется **нивелированием**.

Начальной точкой счета высот в нашей стране является нуль Кронштадтского футштока (горизонтальная черта на медной пластине, прикрепленной к устою одного из мостов Кронштадта). От этого нуля идут ходы нивелирования, пункты которых имеют Балтийской системе высот. Затем от этих пунктов с известными высотами прокладывают новые нивелирные ходы и так далее, пока не получится довольно густая сеть, каждая точка которой имеет известную высоту. Эта сеть называется *государственной сетью нивелирования*; она покрывает всю территорию страны. Иногда высоты точек определяют в условной системе высот, если поблизости нет пунктов государственной нивелирной сети.

Вследствие того, что измерение превышений выполняют различными приборами и разными способами, различают:

- **геометрическое нивелирование** (нивелирование горизонтальным лучом),

- **тригонометрическое нивелирование** (нивелирование наклонным лучом),

- **барометрическое нивелирование** (выполняют с помощью барометров, действие которых основано на известной зависимости между атмосферным давлением и высотой над уровнем моря),

- **гидростатическое нивелирование** (основано на свойстве свободной поверхности жидкости в сообщающихся сосудах всегда находится на одинаковом уровне независимо от высоты точек, на которых установлены эти сосуды),

- и некоторые другие (стереофотограмметрическое, аэро-радионивелирование, механическое).

## 4.2. Сущность геометрического нивелирования

**Геометрическое нивелирование** или нивелирование горизонтальным лучом выполняют специальным геодезическим прибором **нивелиром**. Отличительная особенность нивелира состоит в том, что визирная линия трубы во время работы приводится в горизонтальное положение. Нивелир представляет собой сочетание зрительной трубы либо с цилиндрическим уровнем, либо с компенсатором. И уровень, и компенсатор служат для приведения визирной оси зрительной трубы в горизонтальное положение.

Сущность геометрического нивелирования состоит в определении превышения одной точки над другой горизонтальным лучом нивелира по отсчетам по рейкам, отвесно устанавливаемым в точках, между которыми определяют превышение.

Различают два вида геометрического нивелирования: нивелирование *из середины* и нивелирование *вперед*.

При **нивелировании из середины** нивелир устанавливают посередине между точками А и В, а на точках А и В ставят рейки с делениями (рис. 2.1).

При движении от точки А к точке В рейка в точке А называется *задней*, рейка в точке В - *передней*. Сначала наводят трубу на заднюю рейку и берут отсчет *a*, затем наводят трубу на переднюю рейку и берут отсчет *b*. Превышение точки В относительно точки А получают по формуле:

$$h = a - b.$$

Если  $a > b$ , превышение положительное, если  $a < b$  - отрицательное. Высота точки В вычисляется по формуле:

$$H_B = H_A + h.$$

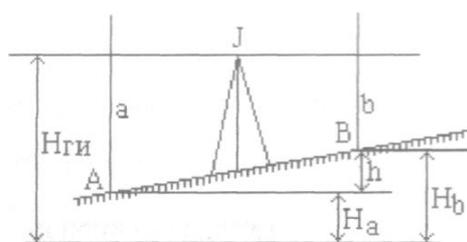


Рис.2.1. Нивелирование из середины

Высота визирного луча над уровнем моря называется **горизонтом прибора** и обозначается ГП:

$$\text{ГП} = H_A + a = H_B + b,$$

т.е. *горизонт прибора равен высоте точки плюс высота прибора, или высоте точки, на которой стоит рейка, плюс отсчет на нее.*

При **нивелировании вперед** нивелир устанавливают над точкой А так, чтобы окуляр трубы был на одной отвесной линии с точкой. На точку В ставят рейку. Измеряют высоту нивелира *i* над точкой А и берут отсчет *b* по рейке (рис. 2.2).

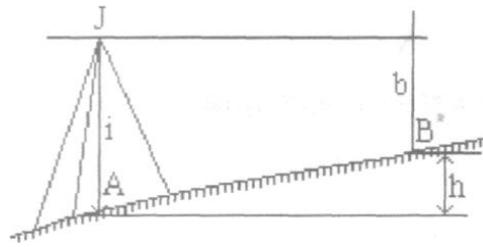


Рис.2.2. Нивелирование вперед

Превышение  $h$  подсчитывают по формуле:

$$h = i - b.$$

Высоту точки  $B$  можно вычислить:

$$H_B = \text{ГП} - b, \quad \text{где } \text{ГП} = H_A + a$$

*Т.е. высота точки равна горизонту прибора минус отсчет по рейке на этой точке.*

### 4.3. Нивелиры. Устройство и оси

В зависимости от устройств, применяемых для приведения визирной оси зрительной трубы в горизонтальное положение, нивелиры изготавливают двух видов - с цилиндрическим уровнем на зрительной трубе (рис.5) и с компенсатором углов наклона, т.е. без цилиндрического уровня.

Нивелиры бывают трех классов точности:

1) **высокоточные** (Н-05) для нивелирования I и II классов с погрешностью измерения превышения не более 0.5 мм на 1 км хода;

2) **точные** (Н-3) - для нивелирования III и IV классов, инженерно-геодезических изысканий с погрешностью измерения превышения 3 мм на 1 км хода;

3) **технические** (Н-10) - для топографических съемок и других видов инженерных работ с ошибкой измерения превышений 10 мм на 1 км хода.

Число в названии нивелира означает среднюю квадратическую погрешность в мм нивелирования на 1 км двойного хода. Для обозначения нивелиров с компенсатором к цифре добавляется буква К. У нивелиров Н-3 и Н-10 допускается наличие горизонтального лимба; в этом случае в шифре нивелира добавляется буква Л, например, Н-10Л.

Устройство нивелира с цилиндрическим уровнем Н-3 (рис. 2.4-а)

Основные части нивелира:

1 - **зрительная труба** состоит из объектива, окуляра сетки нитей; для получения резкого изображения предмета вращают *кремальеру*, перемещая тем самым внутри двояковогнутую линзу; для четкого изображения сетки нитей вращают окуляр; для предварительного визирования на предмет на трубе имеется мушка и целик;

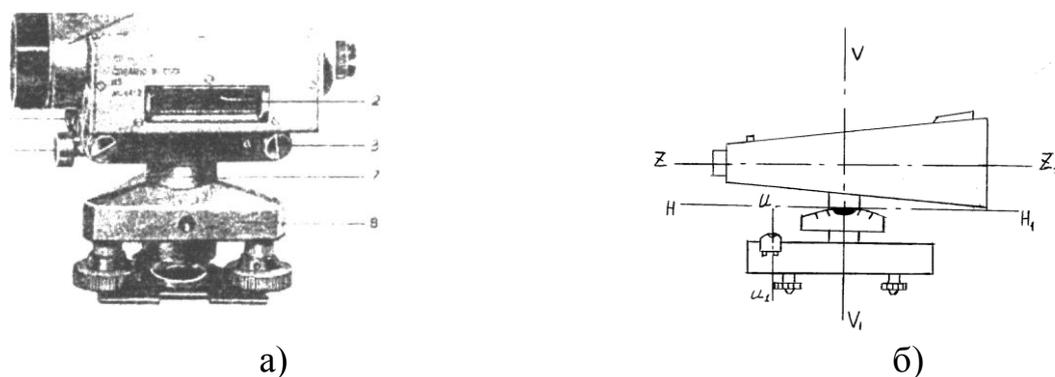


Рис.2.4. Устройство нивелира Н3

2 - **цилиндрический уровень** жестко скреплен со зрительной трубой и находится слева от зр. трубы, там же располагается и *призменное устройство*, с помощью которого изображение концов пузырька уровня передается в поле зрения трубы;

3 - **элевационный винт** (предназначен для приведения визирной оси в горизонтальное положение);

**4 - круглый уровень** (для предварительного приведения прибора в рабочее положение);

**5,6- закрепительный и наводящий винты** зрительной трубы;  
**8 - подставка с тремя подъемными винтами** (для закрепления нивелира на штативе и приведения его в рабочее положение).

Оси нивелира (рис.2.4-б):

– ось цилиндрического уровня  $HH_1$  - касательная к внутренней поверхности ампулы в точке нуль-пункт;

– визирная ось зрительной трубы  $ZZ_1$  - прямая соединяющая центр объектива и перекрестье сетки нитей;

– ось круглого уровня  $UU_1$  - нормаль к сферической поверхности ампулы, проходящая через нуль-пункт;

– вертикальная ось вращения нивелира  $VV_1$ .

**Для установки нивелира в рабочее положение** его закрепляют на штативе становым винтом и вращением сначала двух, а затем третьего подъемных винтов приводят пузырек круглого уровня на середину. Отклонение пузырька от середины допускается в пределах второй окружности. Приближенное наведение на нивелирную рейку выполняют с помощью мушки. Более точное наведение осуществляют вращением наводящего винта зрительной трубы, которую перед отсчетом по рейке предварительно устанавливают по глазу (вращением окуляра) и по предмету (вращением кремальеры) для четкого изображения сетки нитей и делений на нивелирной рейке. Перед отсчетом по средней нити тщательно совмещают концы пузырька цилиндрического уровня в поле зрения трубы, медленно вращая элевационный винт.

#### 4.4. Поверки и юстировки нивелиров

**Поверками** называют действия, имеющие целью выявить, выполнены ли геометрические условия, предъявляемые к инструменту.

Каждая поверка теодолита состоит из трех частей. *Первая часть* – геометрическое условие, которое выражает требование, предъявляемое к взаимному расположению осей теодолита. *Вторая часть* – проверка этого условия. *Третья* – исправление выявленных нарушений геометрического условия. Исправление нарушенных условий называется *юстировкой* инструмента.

**1. Поверка круглого уровня.** *Ось круглого уровня должна быть параллельна вертикальной оси нивелира.*

Приводят пузырек круглого уровня в нуль-пункт с помощью трех подъемных винтов, затем поворачивают нивелир на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси. Если пузырек уровня остался на середине, то условие выполнено. Если же пузырек отклонился от центра, то исправительными винтами круглого уровня его перемещают на половину дуги отклонения, а подъемными винтами приводят в нуль-пункт. После этого нивелир снова поворачивают на  $180^\circ$  и в случае, если он вновь сойдет с нуля пункта, производят вторичное исправление.

**2. Поверка установки сетки нитей.** *Горизонтальная нить сетки нитей должна быть перпендикулярна к вертикальной оси нивелира, то есть быть горизонтальной.*

Эта поверка выполняется так:

- поставить рейку в 30 м от нивелира;
- навести трубу на рейку;

установить изображение рейки в центре сетки нитей: элевационным винтом привести пузырёк уровня в нуль-пункт; взять отсчёт по рейке  $b_0$ ;

– наводящим винтом трубы сместить изображение рейки влево, затем вправо; оба раза взять отсчёты по горизонтальной нити  $b_{л}$  и  $b_{п}$  соответственно. Если отсчёты  $b_{л}$  и  $b_{п}$  отличаются от  $b_0$  более, чем на 1 мм, сетку нитей нужно развернуть. Для исключения влияния наклона горизонтальной нити нужно всегда устанавливать изображение рейки точно в центре сетки нитей.

Эту поверку можно выполнить с помощью отвеса. Для этого в 20 м от нивелира подвешивают отвес, наводят на него трубу и проверяют совпадение вертикальной нити сетки с нитью отвеса.

**3. Поверка главного геометрического условия.** *Визирная ось зрительной трубы должна быть параллельна оси цилиндрического уровня.*

Поверка может быть выполнена одним из двух перечисленных способов.

Поверка выполняется двойным нивелированием из середины и вперед.

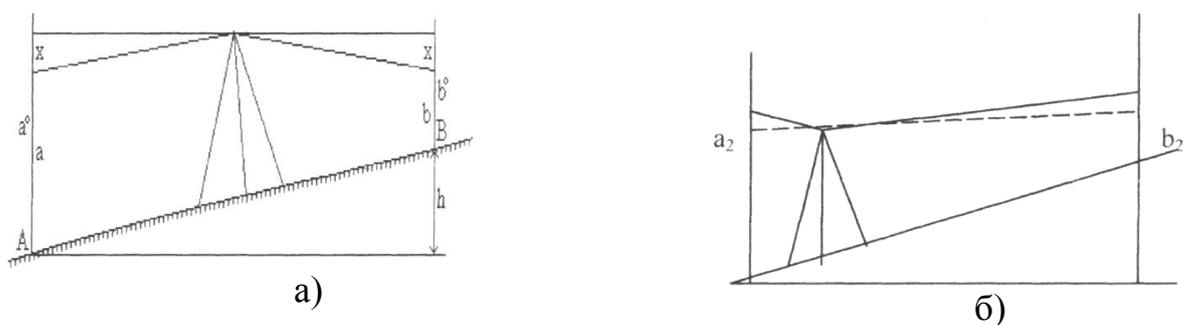


Рис. 2.7. Двойное нивелирование из середины и вперед

Нивелир устанавливают точно посередине между рейками (рис.2.7-а). С помощью круглого уровня прибор приводят в рабочее положение. Затем последовательно визируют на рейку в точке А берут отсчет  $a_1$  и рейку в точке В берут отсчет  $b_1$ .

Затем вычисляют превышение по формуле.

$$h_1 = a_1 - b_1$$

Оно будет правильным, так как оба отсчета искажены на одну и ту же величину  $x$ .

Затем нивелир переносят к одной из реек и устанавливают на расстоянии 2,5 м (рис.2.7-б). Приводят в рабочее положение по круглому уровню, а затем берут отсчеты  $a_2$  и  $b_2$ . Вычисляют превышение

$$h_2 = a_2 - b_2.$$

После этого определяют ошибку  $x$

$$x = h_2 - h_1.$$

Если величина  $x$  не превышает 5 мм. То главное геометрическое условие выполнено. В противном случае выполняют юстировку:

– вычисляют правильный отсчет по рейке в точке В

$$b'_2 = a_2 - h_1$$

– исправление нивелира аналогично с 1-ым способом.

#### 4.5. Работа и контроль на станции при техническом нивелировании

Определение высот точек съемочной геодезической сети производится путем проложения ходов технического нивелирования. На небольшой территории может быть проложена система замкнутых ходов (полигонов) в условной системе высот. На значительных территориях высоты пунктов получают путем проложения одиночных ходов или полигонов в системе государственной нивелирной сети.

Для технического нивелирования используют нивелиры Н-10, Н-3 и рейки РН-3, РН-10. Отсчеты по рейке берут по средней нити.

*Работу на станции* выполняют в следующей последовательности:

1. На крайние точки А и В нивелируемой линии устанавливают рейки и примерно на равном удалении от них - нивелир. Неравенство плеч на станции не должно превышать 10 м.

2. Нивелир приводят в рабочее положение, наводят трубу на заднюю рейку и берут отсчет по черной  $a_{ч}$ , а затем по красной  $a_{к}$  ее стороне.

3. Наводят трубу на переднюю рейку и берут отсчеты сначала по черной, а затем по красной стороне  $b_{ч}$  и  $b_{к}$ .

4. Если кроме крайних точек А и В необходимо определить высоты  $D_1, D_2, D_n$  промежуточных точек, то заднюю рейку последовательно устанавливают на эти точки и берут отсчеты  $d_1, d_2, \dots, d_n$  по черной стороне. При выполнении ответственных работ отсчеты на промежуточных точках производят по обеим сторонам рейки. При использовании уровневых нивелиров перед каждым отсчетом пузырек приводят в нуль-пункт;

5. Для контроля вычисляют *разность нулей (пяток)*

передней  $c_{п} = a_{к} - a_{ч}$

и задней  $c_{з} = b_{к} - b_{ч}$  реек.

Расхождение разности нулей по абсолютной величине не должно превышать 5 мм;

6. На каждой станции вычисляют значения превышений, определяемых по черным и красным сторонам реек:

$$h_{ч} = a_{ч} - b_{ч},$$

$$h_{к} = a_{к} - b_{к}.$$

Измерения считают выполненными правильно, если  $|h_{ч} - h_{к}| < 5$  мм;

Высоту передней точки вычисляют по формуле

$$H_B = H_A + h.$$

Высоты промежуточных точек удобно вычислять через горизонт прибора (ГП) (рис. 2.8). ГП – высота визирного луча над исходной уровенной поверхностью.

$$ГП = H_A + a = H_B + b.$$

Высоты промежуточных точек определяют по формуле:

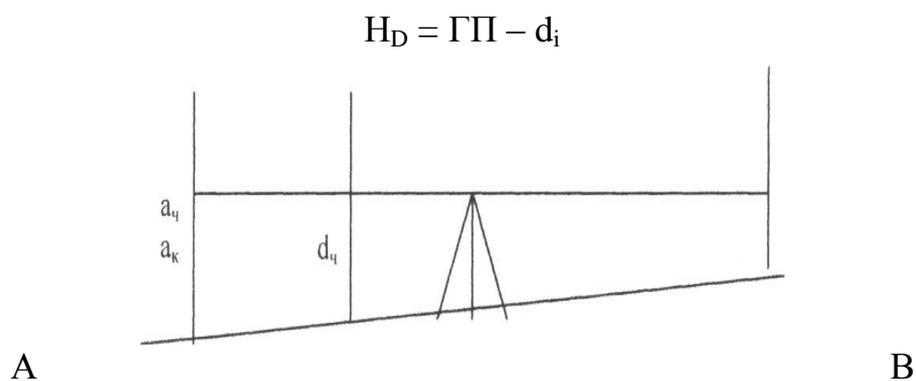


Рис.2.8. Определение высоты промежуточной точки

Случайные и систематические погрешности при нивелировании возникают вследствие недостаточной точности нивелира и реек, неполной юстировки нивелира, влияния внешней среды и нарушения методики измерений.

Для уменьшения приборных погрешностей превышения рекомендуется измерять способом из середины по двум сторонам реек, а рейки удерживать отвесно на устойчивых предметах (нивелирных башмаках, костылях или вбитых в землю кольях). Предельные расстояния от нивелира до реек ограничивают 100-120 м, погрешности измерений превышений на станции в этом случае не превысят 5 мм.

#### 4.6. Уравнивание нивелирных ходов и полигонов

При техническом нивелировании предельная погрешность измерения превышения на 1 км хода не должна превышать 50 мм.

Одиночные нивелирные ходы по конструкции могут быть

– *замкнутыми*, начинающиеся и заканчивающиеся в одной точке, с высотной привязкой к одному исходному пункту не обязательно включенному в ход),

– *разомкнутыми* (начинающимися и заканчивающимися на точках исходными высотами),

– *висячим* высотной привязкой одному исходному пункту или без высотной привязки).

Ходы прокладывают между реперами с известными высотами (реперами нивелирования 1, 2, 3, 4 классов); допустимая длина хода зависит от его формы. Так, длина разомкнутого (рис. 2.9-а) или замкнутого (рис. 2.9-б) хода может достигать 16 км; длина висячего хода (рис. 2.9-в) не должна превышать 8 км.

В разомкнутом и замкнутом ходах нивелирование выполняют один раз, в висячем ходе – два раза: в прямом и обратном направлениях. При проектировании ходов следует выбирать наиболее удобные для нивелирования пути: дороги, просеки в лесу, берега рек, участки небольшим уклоном и твердым грунтом.

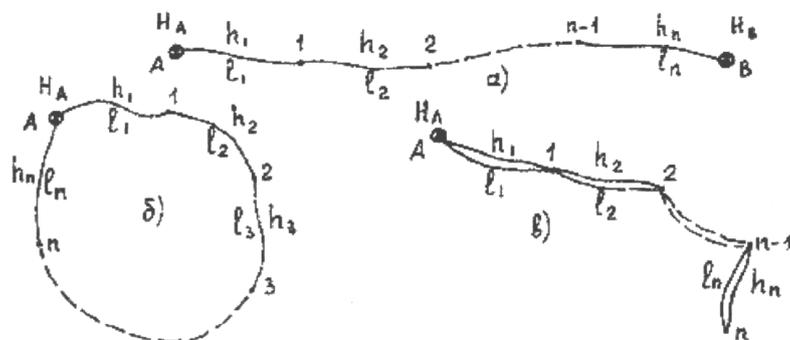


Рис. 2.9. Одиночные нивелирные ходы: а) разомкнутый; б) замкнутый; в) висячий

Обозначим в разомкнутом нивелирном ходе:

$n$  – количество станций в ходе (количество измеренных превышений),

$h_i$  – превышение по  $i$ -той станции,

$L$  – длина хода,

$H_H$  – высота исходного репера в начале хода,

$H_K$  – высота исходного репера в конце хода.

Сумма превышений в нивелирном ходе должна быть равна разности высот конечного и начального исходных реперов. Такую сумму превышений называют теоретической суммой.

$$\sum h = H_K - H_H.$$

Сумма измеренных превышений в общем случае не равна теоретической сумме. Тогда невязка в разомкнутом ходе:

$$f_h = \sum h_{np} - \sum h_T.$$

В замкнутом ходе (полигоне) теоретическая сумма превышений (по аналогии с суммой приращений координат) равна нулю ( $\sum h_T = 0$ ), отсюда

$$f_h = \sum h_{np},$$

т.е. невязка в сумме превышений замкнутого хода равна алгебраической сумме измеренных превышений.

Для висячих ходов невязка в превышениях определяется по формуле:

$$f_h = \sum h_{np} - \sum h_{обр}$$

Значение допустимой невязки в превышениях по Инструкции равно:

$$f_{дон} = 50 \text{ мм} \sqrt{L, \text{ км}}$$

При значительных углах наклона местности, когда число станций на 1 км хода превышает 25, допустимую невязку подсчитывают по формуле

$$f_{дон} = 10 \text{ мм} \sqrt{n},$$

где  $n$  – число станций в ходе.

При допустимых невязках ( $f_h < f_{дон}$ ) производят уравнивание превышений. Суть которого состоит в распределении невязок поровну в превышения каждой станции или на сумму превышений каждого километра хода со знаком, обратным знаку невязки. Сумма поправок должна быть равна невязке с обратным знаком

$$\sum V_{hi} = -f_h.$$

По исправленным превышениям  $h_{испр} = h_i + V_{hi}$  вычисляют высоты точек хода. Заключительным контролем правильности вычислений является получение в конце хода высоты конечного исходного репера.

После завершения полевых работ производят вычислительную обработку результатов нивелирования. В журналах проверяют все полевые записи и вычисления. Составляют схему высотного обоснования на которую наносят исходные данные (номера и высоты реперов) и результаты нивелирования (длины ходов, число станций, значения превышений, полученные невязки).