

Нивелирование. Общая часть

Нивелирные сети подразделяются на государственные и ведомственные (маркшейдерские, на строительных площадках и т.п.). Под государственной нивелирной сетью понимают систему размещенных на всей территории страны надежно закрепленных на местности геодезических пунктов (реперов), высоты которых определены в единой системе от одного исходного пункта, принятого за начало отсчета высот. Государственная нивелирная сеть предназначена для распространения единой системы высот на территорию всей страны, является высотной основой всех топографических съемок и инженерно-геодезических работ, выполняемых для удовлетворения потребностей народного хозяйства, науки и обороны страны.

Государственная нивелирная сеть строится по принципу «от общего к частному» и делится на четыре класса: I, II, III и IV. Нивелирная сеть I класса является главной высотной основой на территории страны и создается с наивысшей точностью при использовании наиболее точной измерительной техники и наиболее современных методов высокоточного нивелирования с одновременным выполнением гравиметрической съемки. Нивелирная сеть I класса является сгущением высокоточной нивелирной сети страны и относится к разряду точных. На основе нивелирной сети II класса создаются нивелирные сети III, а затем IV класса.

Государственные нивелирные сети I и II классов как наиболее точные предназначены, в первую очередь, для распространения единой системы высот на всей территории страны. Используются они также и в научных целях. Государственные нивелирные сети I и II классов служат основой для создания высотного обоснования топографических съемок и решения разнообразных инженерных задач на местности, требующих знания высот точек ее поверхности со сравнительно высокой точностью.

Нивелирные линии I и II классов прокладываются преимущественно по железным, шоссейным и улучшенным грунтовым дорогам, а при их отсутствии, особенно в труднодоступных районах – по берегам больших рек, тропам и зимникам. Во всех случаях стремятся к благоприятным для данного района грунтовым условиям, прокладке нивелирных ходов по наименее пересеченной местности с небольшими уклонами.

Нивелирная сеть I класса строится в виде замкнутых полигонов и отдельных линий большой протяженности. Нивелирная сеть II класса опирается на нивелирные линии I класса и создается в виде замкнутых полигонов, периметр которых колеблется от 400 до 800 км в обжитых и от 1000 до 2000 км в необжитых районах.

Нивелирные сети III и IV классов прокладывают внутри полигонов высшего класса как отдельными линиями, так и в виде систем линий с узловыми точками. Периметры полигонов нивелирования III класса, как правило, не должны превышать 150 км. Периметры полигонов и длины отдельных линий нивелирования IV класса допускаются не более 50 км.

За исходный уровень принят средний уровень Балтийского моря (нуль Кронштадтского футштока).

Превышения между наиболее удаленными друг от друга реперами нивелирной сети должны быть известны с погрешностью не более 30 мм.

Нивелирная сеть создается в виде отдельных ходов, системы ходов (полигонов) или в виде самостоятельной сети и привязывается не менее чем к двум исходным нивелирным знакам (реперам) высшего класса. Допускается производить привязку нивелирных ходов IV класса к реперам ранее проложенного нивелирования IV класса.

Периметры полигонов нивелирования в зависимости от районов работ не должны превышать величин, указанных в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Периметры полигонов нивелирования		
Класс нивелирования	Периметры нивелирных полигонов, км	
	застроенная территория	незастроенная территория
II	50	80
III	25	40
IV	8	12

При создании высотного обоснования крупномасштабных топографических съемок нивелирные сети III и IV классов прокладывают с расчетом обеспечения требуемой точности съемочного обоснования.

Основные технические требования к точности нивелирования должны быть в пределах, указанных в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Основные технические требования к точности нивелирования				
Класс нивелирования	Допустимые невязки в полигонах и ходах f_h , мм		Средняя квадратическая ошибка определения превышения, мм	
	при $n \leq 15$ на 1 км хода	при $n > 15$ на 1 км хода	на станции	в ходе длиной 1 км
II	$5\sqrt{L}$	$6\sqrt{L}$	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$
III	$10\sqrt{L}$	$2,5\sqrt{L}$	$\pm 1,5$	$\pm 4,0$
IV	$20\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	$\pm 3,0$	$\pm 8,0$

Обозначения: L – периметр полигона или длина хода, км;
 n – число станций в полигоне (ходе)

Предельные значения случайных и систематических средних квадратических ошибок нивелирования не должны превышать величин, приведенных в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Предельные значения случайных и систематических средних квадратических ошибок нивелирования

Класс нивелирования	Предельные средние квадратические ошибки, мм/км	
	случайная η	систематическая σ
II	2,0	0,20
III	5,0	-
IV	10,0	-

Примечание. В нивелировании IV класса ошибки вычисляются по невязкам ходов или полигонов.

Средние квадратические ошибки нивелирования вычисляются по формулам

$$\eta^2 = [1/4] \sum d^2 / r;$$

$$\sigma^2 = [1/4] \sum S^2 / L,$$

где n – число секций в сети; $d = h_{np} - h_{обр}$; h_{np} и $h_{обр}$ – превышения по секциям, полученные соответственно в прямом и обратном ходах, мм; r – длина секции, км; L – длина хода, км; S – накопление разностей $\sum d$ в ходе, мм.

Линии государственной нивелирной сети III и IV классов закрепляют на местности реперами не реже чем через 5 км (по трассе).

В труднодоступных районах на отдельных участках, где выбор местоположения реперов затруднен, расстояние между ними может быть увеличено до 7 км (по трассе).

На линиях нивелирования I, II, III и IV классов закладывают реперы следующих типов: вековые, фундаментальные, грунтовые, скальные, стенные и временные.

Каждый репер должен иметь свой индивидуальный номер, не повторяющийся на данной линии, а по возможности и на ближайших линиях нивелирования.

Вековые реперы обеспечивают сохранность главной высотной основы на продолжительное время, позволяют изучать современные вертикальные движения земной коры и колебания уровней морей и океанов, сохраняют полную независимость изучаемых явлений от экзогенных и техногенных процессов.

Фундаментальные реперы обеспечивают сохранность высотной основы на значительные сроки, позволяют изучать современные движения земной поверхности. Их закладывают на линиях нивелирования I, II классов не реже чем через 60 км, а также на узловых пунктах, вблизи морских, основных речных и озерных уречьях.

Грунтовые, скальные, стенные реперы обеспечивают сохранность и надежность высотной основы на длительные сроки и используются для закрепления нивелирных сетей I, II, III и IV классов.

Временные реперы обеспечивают сохранность высотной опоры в течение нескольких лет и служат высотной основой при топографических съемках. Временные реперы включают в ходовые линии нивелирования II, III и IV классов.

Местоположение реперов опознают на топографической карте масштаба 1:25000 и крупнее, а также на аэроснимках, которые затем прилагают к материалам нивелирования. По этой карте определяют геодезические координаты репера с ошибкой 0,25'.

На каждый репер составляют абрис и дают описание его местоположения. Кроме того, расположение реперов показывают на карте масштаба 1:100000, которую прилагают к материалам нивелирования.

Координаты фундаментальных реперов определяют геодезическими приборами с ошибкой не более 1 м.

3.2. Организация работ

Организация работ по нивелированию включает следующие этапы:

1. Составление проекта.
2. Рекогносцировка.
3. Закладка нивелирных знаков.
4. Поверки и исследования приборов.
5. Производство полевых работ.
6. Вычислительная обработка результатов полевых измерений.
7. Систематизация и оформление материалов.
8. Составление каталога высот пунктов.

3.3. Полевые работы по нивелированию III класса

При проложении ходов нивелирования III класса должны соблюдаться следующие требования:

– длины ходов не должны превышать 10 км между узловыми реперами на застроенной и 15 км на незастроенной территориях, между реперами высшего класса соответственно – 15 и 20 км;

– линии нивелирования III класса, как правило, прокладывают параллельно друг другу и связывают между собой ходами не реже чем через 5 км на застроенной и 8 км – на незастроенной территориях;

– нивелирные знаки закладываются на улицах и проездах плотно застроенной части города не реже чем через 0,3 км, в слабо застроенной части города или населенного пункта расстояние допускается увеличить до 0,8 км, на незастроенной территории реперы следует закладывать на расстоянии от 0,5 до 2,0 км;

– нивелирные знаки следует совмещать со стенными знаками полигонометрии.

При сгущении нивелирной сети II класса нивелирование III класса следует производить в виде отдельных ходов или системы ходов и полигонов, опирающихся на реперы нивелирования высших классов.

Для нивелирования III класса следует использовать нивелиры, удовлетворяющие следующим требованиям:

- увеличение зрительной трубы не менее 30^x;
- цена деления цилиндрического контактного уровня не более 30" на 2 мм;
- погрешность самоустановки линии визирования у нивелиров с компенсатором не более 0,5 угл. с.

Перед началом полевых работ нивелиры должны исследоваться и проверяться по следующей программе:

- определение коэффициента дальномера;

- поверка установочного круглого уровня;
- поверка плавности вращения верхней части нивелира;
- определение угла i нивелира, т.е. угла между визирной линией и горизонтальной плоскостью;
- определение средней квадратической ошибки самоустановки линии визирования и ошибки недокомпенсации у нивелиров с компенсаторами.

Во время выполнения полевых работ у нивелиров необходимо проверять:

- установочный уровень – ежедневно перед началом наблюдений;
- угол i нивелира; в начале работы первые семь дней – каждый день, в дальнейшем, убедившись в постоянстве юстировки – не реже одного раза в пятнадцать дней.

Рейки для нивелирования III класса используются двухсторонние трехметровые шашечные с сантиметровыми делениями типа РН-3, а также штриховые инварные типа РН-05. Рейки должны быть снабжены круглыми уровнями.

С целью установления пригодности реек для нивелирования они должны исследоваться и проверяться на компараторе или при помощи контрольной линейки в начале и конце полевых работ.

Случайные ошибки дециметровых и метровых интервалов реек не должны превышать 0,5 мм.

Нивелирование III класса выполняется в прямом и обратном направлениях. При переходе от нивелирования в прямом направлении к обратному рейки следует менять местами.

Способ нивелирования III класса зависит от применяемых нивелиров. Предпочтение следует отдавать нивелирам с плоскопараллельной пластинкой и инварным рейкам. Измерения в этом случае выполняются способом «совмещения». При работе с нивелирами без плоскопараллельной пластинки измерения следует выполнять способом «средней нити» – отсчеты по трем нитям по черной стороне рейки и отсчет по средней нити по красной стороне рейки.

Оптимальное расстояние от нивелира до реек – 75 м. При отсутствии колебаний изображения реек и увеличении трубы не менее $35\times$ длину визирного луча допускается увеличивать до 100 м.

Высота визирного луча над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,3 м. Расстояние от нивелира до реек измеряют тонким тросом или дальномером, при этом неравенство расстояний на станции допускают не более 2 м, а их накопление по секции не более 5 м. При работе на станции нивелир защищают от солнечных лучей зонтом. Рейки следует устанавливать по уровню на костыли или башмаки. На участках с рыхлым или заболоченным грунтом рейки устанавливают на забитые деревянные колья с вбитыми в их торцы гвоздями.

При перерывах нивелирование заканчивают на постоянном репере. Разрешается заканчивать нивелирование на трех костылях (кольях), забитых в дно ямы глубиной 0,3 м. После перерыва выполняют нивелирование на последней станции, а при необходимости – и на предпоследней.

Расхождения между значениями превышения до и после перерыва должны быть не более 3 мм. В обработку принимают наблюдения, выполненные как до, так и после перерыва. При больших расхождениях нивелирование по секции выполняют заново от постоянного репера.

На каждой станции выполняют контроль наблюдений. При наблюдении способом «совмещения» расхождения между превышениями, полученные по основной и дополнительной шкалам реек, должны быть не более 1,5 мм (30 делений барабана).

При нивелировании способом «средней нити» разность превышений, полученная по черным и красным сторонам реек, не должна превышать 3 мм.

При расхождениях, превышающих указанные допуски, наблюдения на станции повторяют, предварительно изменив положение нивелира по высоте не менее чем на 3 см. Разность между превышениями по секции, полученная из прямого и обратного ходов, не должна превышать $10\sqrt{L}$, мм, где L – длина секции в километрах.

Если расхождение получилось больше допустимого, то нивелирование по секции повторяют в одном из направлений.

Явно неудовлетворительное значение превышения исключают. Оставшиеся два значения принимают в обработку, если они не расходятся между собой больше чем на $10\sqrt{L}$ мм и получены из нивелирования в противоположных направлениях.

В обработку включают три значения превышения тогда, когда первоначальные расходятся между собой не более чем на $15\sqrt{L}$ мм, а повторное отличается от каждого из первоначальных не более чем на $10\sqrt{L}$ мм. Если первоначальные и повторное значения превышений не удовлетворяют перечисленным требованиям, то первоначальные исключают и выполняют еще одно повторное нивелирование в противоположном направлении. Разность значений превышений из прямого и обратного ходов на линии или в полигоне должна быть не более $10\sqrt{L}$ мм.

Вычисления превышений на станциях выполняются до 0,1 мм, а превышения между постоянными знаками (реперами) и средние превышения из прямого и обратного ходов – с округлением до 1 мм.

В превышения по секциям следует вводить поправки за среднюю длину метра комплекта реек.

В результате нивелирования III класса должны быть представлены следующие материалы:

- ведомость обследования марок и реперов;
- схема ходов нивелирования;
- полевые журналы нивелирования;
- материалы исследования нивелиров и компарирования реек;
- ведомость превышений;
- материалы вычислений и оценки точности;
- абрисы нивелирных знаков;
- каталог высот нивелирных знаков;
- акты сдачи нивелирных знаков (наблюдение за сохранностью);
- пояснительная записка.

Примечание. Результаты выполненных геодезических измерений могут быть представлены в виде данных, полученных с регистрирующих устройств или других носителей информации.

3.4. Порядок работы на станции

1. Нивелир приводят в рабочее положение по установочному уровню.
2. Наводят визирную трубу на черную сторону задней рейки и приводят пузырек цилиндрического уровня элевационным винтом в нульпункт.
3. Берут отсчеты по трем нитям.
4. Наводят трубу на черную сторону передней рейки, приводят цилиндрический уровень элевационным винтом в нульпункт, производят отсчеты по трем нитям.
5. Поворачивают рейку на передней точке красной стороной к нивелиру и производят отсчет по средней нити.
6. Поворачивают визирную трубу на заднюю рейку.
7. Приводят пузырек цилиндрического уровня элевационным винтом в нульпункт и производят отсчет по средней нити.
8. Рассчитывают расстояния по дальномерным нитям от прибора до каждой рейки.
9. Вычисляют превышения, полученные по дальномерным нитям и по средней нити по черным и красным сторонам реек.
10. Разность отсчетов по черной и красной сторонам дает расхождение нулей пятков, которое не должно превышать 3 мм.
11. Расхождение между превышениями, полученными по средней нити по черной и красной сторонам реек, не должно превышать 3 мм.
12. Расхождения между превышениями, полученными по средней нити, и одним превышением, полученным по дальномерным нитям, не должны превышать 3 мм.

Записи отсчетов производятся в журнале (табл. 1).

Таблица 1

Пример заполнения журнала нивелирования III класса.

№№ станций №№ реек	Наблюдения по дальномерным нитям		Контрольное превышение	Наблюдение по средней нити			Среднее превышение мм
	задняя рейка	передняя рейка		задняя рейка	передняя рейка	превышение	
1	1603 (2)	2128 (5)	-525 (11)	1405 (1)	1933 (4)	-528 (14)	-528 (19)
1-2	1206 (3)	1738 (6)	-532 (12)	6188 (8)	6616 (7)	-428 (15)	
	397 (9)	390 (10)	+7/+7 (13)	4783 (16)	4683 (17)	-100 (18)	
Конт-рольные вычисления	397 (20)	390 (21)	-525 (22) -532 (23)	7593 (24) 8549 (28) -956 (29)	8549 (25)	-956 (26) -100 -1056 (30) -528 (31)	-528 (27)

В журнале на каждой станции должен выполняться следующий контроль:

1. Расхождения между полусуммой отсчетов по дальномерным штрихам на черной стороне каждой рейки $[(2) + (3)] / 2$ и $[(5) + (6)] / 2$ и отсчетами по среднему штриху той же рейки (1) и (4) не должны превышать 3 мм. Этот контроль делается в уме и нигде не записывается.
2. Определяется высота визирного луча по отсчетам по среднему штриху по черным сторонам реек – записи (1) и (4).

3. Вычисление неравенства плеч как $(9) - (10) = 7$ мм (в примере).

4. Расхождения в превышениях, полученных по черным (14) и красным (15) сторонам реек, с учетом разности пяток не должны превышать 3 мм.

5. Разности высот нулей реек (16) и (17) не должны отличаться от определенных при испытаниях более чем на 3 мм.

6. Полусумма контрольных превышений на станции $[(11) + (12)] / 2$ не должна отличаться от среднего превышения (19), полученного по отсчетам по средней нити, более чем на 3 мм.

Внизу страницы выполняются контрольные вычисления. Они заключаются в следующем:

1. Суммируют все (9), $\Sigma(9) = (20)$; суммируют все (10), $\Sigma(10) = (21)$.

2. Суммируют все (11), $\Sigma(11) = (22)$; суммируют все (12), $\Sigma(12) = (23)$.

3. Суммируют (1) и (8), $\Sigma(1) + \Sigma(8) = (24)$.

4. Суммируют (4) и (7), $\Sigma(4) + \Sigma(7) = (25)$.

5. Суммируют (14) и (15), $\Sigma(14) + \Sigma(15) = (26)$.

6. Суммируют (19), $\Sigma(19) = (27)$.

Контролем вычислений по странице служат равенства:

$(21) - (20) \equiv \Sigma(13)$ – накопление разности плеч по странице;

$(29) \equiv (26)$ [$(28) = (25)$; $(24) - (28) = (29)$];

$(31) \equiv (27)$ [$(30) = (26) + (\text{разность пяток})$; $(31) = (30) / 2$].

3.5. Полевые работы по нивелированию IV класса

Нивелирование IV класса выполняют нивелирами, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

– увеличение трубы не менее 25^{\times} ;

– цена деления цилиндрического контактного уровня не более 30" на 2 мм;

– погрешность самоустановки линии визирования у нивелиров с компенсатором не более 0,5 угл. с.

Перед началом и во время выполнения полевых работ нивелиры исследуются и поверяются согласно требованиям инструкции.

Нивелирование выполняется в одном направлении.

Оптимальная длина плеча – до 100 м.

При увеличении зрительной трубы не менее 35^{\times} можно допускать длину плеча до 150 м.

Неравенство плеч на станции – до 5 м.

Накопление неравенств длин плеч по секциям – до 10 м.

Высота визирного луча не менее 0,2 м.

Перерыв в работе осуществляется так же, как и при нивелировании III класса, но расхождения между превышениями допускаются до 5 мм.

Привязка к маркам осуществляется так же, как и при нивелировании III класса.

Работа на станции проводится в следующем порядке:

1. Приводят нивелир в рабочее положение по установочному уровню.

2. Визируют на заднюю рейку, установленную к нивелиру черной стороной.

3. Приводят элевационным винтом ось цилиндрического уровня в горизонтальное положение.
4. Производят отсчеты по верхней и средней нитям сетки.
5. Визируют на черную сторону передней рейки.
6. Производят действия, описанные в пунктах 3 и 4.
7. Производят отсчет по красной стороне передней рейки, используя только среднюю нить.
8. Визируют на красную сторону задней рейки.
9. Приводят пузырек цилиндрического уровня элевационным винтом в нульпункт и производят отсчет по средней нити.

По набранным отсчетам вычисляют:

1. Разность пятков обеих реек (допускают колебания не более 5 мм от определенного значения при исследовании реек).
2. Половину длин плеч, полученную по верхней и средней нитям (неравенство плеч допускают до 2,5 м).
3. Превышения по черной и красной сторонам реек (расхождение не более 5 мм).

3.6. Особые случаи нивелирования

Особые случаи нивелирования возникают при преодолении нивелирным ходом различных естественных преград.

Выгодное время наблюдений – пасмурные, облачные дни и начало работ – 3 часа после восхода солнца. Окончание работ – за 3 часа до захода солнца.

Превышение через препятствие шириной до 200 м определяют двумя приемами с изменением высоты прибора на 3 – 4 см. При этом расхождения в превышениях допускают до 4 мм при нивелировании по программе III класса и до 7 мм – IV класса.

Нивелирование через значительные водные препятствия можно выполнять и зимой по льду.

Нивелирование IV класса можно выполнять по урезам воды. На обоих берегах устраивают отводные канавки, в которых забивают колья на уровне уреза воды, нивелирование производится при предположении, что поверхность воды в спокойном состоянии горизонтальна.