



УДК 528.48

Автор:

Методические указания по по прикладной геодезии.  
Электронная книга, стр. 49 формата А4, 2022 г.

Методические указания составлены в соответствии с утверждённой программой дисциплины «Прикладная геодезия» для направления 21.03.03. рекомендованы кафедрой прикладной геодезии и методической комиссией факультета дистанционных форм обучения.

В методических указаниях приводится программа курса, задание для выполнения курсовой и даются сведения по изучению отдельных разделов курса «Прикладная геодезия».

## ВВЕДЕНИЕ

В курсе прикладной геодезии изучают состав и методы инженерно-геодезических изысканий для строительства, технику и технологию производства инженерно-геодезических разбивочных работ при строительстве всевозможных инженерных сооружений, методы и приборы геодезического обеспечения монтажа конструкций и технологического оборудования. Кроме того в прикладной геодезии изучаются методы наблюдений за осадками и деформациями сооружений и способы производства исполнительных съёмки.

Студенты осваивают следующие разделы курса:

- Опорные инженерно-геодезические сети.
- Инженерно-геодезические изыскания для строительства.
- Инженерно-геодезические разбивочные работы.

В завершении изучения обозначенных разделов и сдачи контрольных работ студенты разрабатывают Проект Производства Геодезических Работ (ППГР), который является курсовой на тему: «Разбивочные инженерно-геодезические сети».

Для успешного написания курсовой необходимо детально изучить следующие разделы курса: «Опорные инженерно-геодезические сети», «Спутниковые методы измерений в геодезии», «Построение опорных сетей методом полигонометрии» и «Инженерно-геодезические изыскания» по приведённой ниже программе и литературным источникам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян В.В. Прикладная геодезия: Геодезическое обеспечение строительного производства. М., «Амалданик», 2013.-432 с., ил.
2. Авакян В.В. Прикладная геодезия: технологии инженерно-геодезических работ. М., «Амалданик», 2012.-330 с., ил.
3. СП 47.13330.2012. (СП 11-104-97). Инженерно-геодезические изыскания для строительства.
4. СП 126.13330.2012. (СНиП 3.01.03-84). Геодезические работы в

строительстве

5. Левчук Г.П., Новак В.Е., Конусов В.Г. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. - М., Недра, 1981.
6. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений. Под ред. Г.П. Левчука. Учебник для вузов. М., Недра, 1983.
7. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и *GPS*. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02, ЦНИИГАиК, 2002 г.
8. Инструкция по топографической съёмке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500: ГКИНП-02-033-82. М., Недра, 1982.
9. Практикум по прикладной геодезии. Геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Авт. Ключин Е.Б. и др. М.:Недра, 1993. 368 с.
10. Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3.01.03-84). ЦНИИОМТП. М., Стройиздат, 1985
11. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и *GPS*. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03.

## **СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ**

### **1. Опорные инженерно-геодезические сети.**

Общие сведения и историческая справка. Классификация и технические характеристики геодезических сетей. Методы построения плановых опорных геодезических сетей. Построение опорных сетей спутниковыми методами. Системы координат и поверхность относимости в инженерно-геодезических работах. Высотные опорные инженерно-геодезические сети. Тригонометрическое нивелирование. Проектирование и оценка проектов высотных сетей. Системы счёта высот [1, 3, 7, 11].

### **2. Инженерно-геодезические изыскания для строительства.**

Состав и технические требования к инженерно-геодезическим изысканиям. Геодезическая основа изысканий и строительства. 5.3. Опорная геодезическая сеть. Планово-высотная съёмочная геодезическая сеть. Построение съёмочного обоснования спутниковыми методами. Крупномасштабные инженерно-топографические планы. Методы крупномасштабных топографических съёмок. Топографическая съёмка на основе лазерного сканирования. Топографическая съёмка с применением спутниковых технологий. Съёмка подземных коммуникаций [1, 3, 5, 7, 11].

### **3. Спутниковые методы измерений в геодезии.**

Системы координат в спутниковой геодезии. Спутниковые радионавигационные системы. Обработка результатов спутниковых измерений. Проектирование и построение спутниковых геодезических сетей. Закрепление пунктов спутниковой геодезической сети. Геодезическое спутниковое оборудование и полевые работы [1, 3, 7, 11].

### **4. Построение опорных сетей методом полигонометрии.**

Проектирование, оценка точности и закрепление пунктов полигонометрии. Приборы и производство угловых и линейных измерений. Привязка и координирование ственных знаков. Привязка полигонометрических ходов к пунктам геодезической сети. Определение и учёт элементов приведения. Предварительная обработка результатов измерений [1, 5].

## **КОРОТКО О СОДЕРЖАНИИ ПРОГРАММЫ**

### **1. Классификация и технические характеристики геодезических сетей**

Государственная геодезическая сеть (ГГС) представляет собой совокупность геодезических пунктов, расположенных равномерно по всей территории РФ и закрепленных на местности специальными центрами, обеспечивающими их сохранность и устойчивость в плане и по высоте в течение длительного времени.

ГГС включает в себя также пункты с постоянно действующими наземными станциями спутникового автономного определения координат на основе использования Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) с целью обеспечения возможностей определения координат потребителями в режиме, близком к реальному времени.

ГГС предназначена для решения следующих основных задач, имеющих хозяйственное, научное и оборонное значение:

- установление и распространение единой государственной системы геодезических координат на всей территории страны и поддержание ее на уровне современных и перспективных требований;
- геодезическое обеспечение картографирования территории России и акваторий окружающих ее морей;
- геодезическое обеспечение изучения земельных ресурсов и землепользования, кадастра, строительства, разведки и освоения природных ресурсов;
- обеспечение исходными геодезическими данными средств наземной, морской и аэрокосмической навигации, аэрокосмического мониторинга природной и техногенной сред;
- изучение поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени;
- изучение геодинамических явлений;
- метрологическое обеспечение высокоточных технических средств определения местоположения и ориентирования.

Развитие государственной системы координат для осуществления геодезической и картографической деятельности на территории РФ покажем на временном отрезке с 1990 по 2012 г.

*Структура и точность государственной геодезической сети РФ по состоянию на 1995 год представляется следующим образом.*

ГГС, созданная по состоянию на 1995 год, объединяет в одно целое:

- астрономо-геодезические пункты космической геодезической сети (далее - АГП КГС);
- доплеровскую геодезическую сеть (ДГС);
- астрономо-геодезическую сеть (АГС) 1 и 2 классов;
- геодезические сети сгущения (ГСС) 3 и 4 классов.

Пункты указанных построений совмещены или имеют между собой надежные геодезические связи.

Космическая геодезическая сеть представляет собой глобальное геодезическое построение. Координаты ее пунктов определены по доплеровским, фотографическим, дальномерным радиотехническим и лазерным наблюдениям искусственных спутников Земли (ИСЗ) системы геодезического измерительного комплекса (ГЕОИК). Точность взаимного положения пунктов при расстояниях между ними около 1... 1,5 тыс. км характеризуется средними квадратическими ошибками, равными 0,2...0,3 м.

Из всего состава глобальной космической геодезической сети в ГГС по состоянию на 1995 год включены данные о 28 стационарных астрономо-геодезических пунктах, расположенных в границах АГС.

Астрономо-геодезическая сеть состоит из 164306 пунктов и включает в себя ряды триангуляции 1 класса, сети триангуляции и полигонометрии 1 и 2 классов, развитые в соответствии с «Основными положениями о построении государственной геодезической сети СССР», 1954 г и 1961 г, а также соответствующими инструкциями о построении ГГС.

Полученные из уравнивания средние квадратические ошибки измеренных углов на пунктах АГС 1 и 2 классов равны 0,74" и 1,06" соответственно.

Астрономо-геодезическая сеть 1 и 2 классов содержит 3,6 тысячи геодезических азимутов, определенных из астрономических наблюдений, и 2,8 тысячи базисных сторон, расположенных через 170...200 км.

Точность выполненных в АГС астрономических определений координат характеризуется следующими средними квадратическими ошибками:

- астрономической широты - 0,36",
- астрономической долготы - 0,043<sup>s</sup>.

Средние квадратические ошибки измерений астрономических азимутов и базисов, полученные по результатам уравнивания, соответственно равны 1,27" и 1:500 000.

Точность определения взаимного планового положения пунктов, полученных в результате выполненного в 1991 году общего уравнивания АГС как свободной сети, характеризуется в собственной системе координат средними квадратическими ошибками:

- 0,02...0,04 м для смежных пунктов,
- 0,25...0,80 м при расстояниях от 500 до 9 000 км.

Высоты квазигеоида над референц-эллипсоидом Красовского определены методом астрономо-гравиметрического нивелирования.

Сеть линий астрономо-гравиметрического нивелирования покрывает всю территорию страны и образует 909 замкнутых полигонов, включающих 2897 астрономических пунктов. При вычислениях превышений квазигеоида использованы данные гравиметрических съемок масштаба 1:1000000 и крупнее.

Точность определения превышений высот квазигеоида характеризуется средними квадратическими ошибками:

- 0,06...0,09 м при расстояниях 10...20 км,
- 0,3...0,5 м при расстоянии около 1000 км.

Геодезические сети сгущения 3 и 4 классов включают в себя около 300 тысяч пунктов. Эти сети созданы методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации в соответствии с «Основными положениями о построении государственной геодезической сети СССР», 1954 и 1961 г.г.

Плотность пунктов ГГС 1, 2, 3 и 4 классов, как правило, составляет не менее одного пункта на 50 кв. км.

Современная реконструкция и дальнейшее развитие ГГС РФ базируется на активном применении спутниковых технологий.

Так, по заданию Росреестра и Роскартографии в 2006-2010 гг. под руководством ЦНИИГАиК была разработана государственная геодезическая система



координат 2011 года (ГСК-2011). Итогом этих работ явилось введение ГСК-2011 и государственной общеземной геоцентрической системы координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), предназначенной для решения баллистических и навигационных задач, в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28.12.2012 г. №1463 «О единых государственных системах координат».

По уровню точности и принципам ориентации в теле Земли системы координат ГСК и ПЗ-90.11 соответствуют друг другу, а также международной системе координат ITRF.

Спутниковая геодезическая сеть будет включать в себя построения трёх уровней. Верхний уровень занимает фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС). На следующем уровне находится высокоточная спутниковая геодезическая сеть (ВГС), а третий уровень занимает спутниковая сеть 1 класса (СГС-1).

Таким образом, с учётом существующих плановых геодезических сетей, основу ГСК 2011 составляет ГГС, которая состоит из пунктов:

- фундаментальной астрономо–геодезической сети (ФАГС) – 50 пунктов, из них 33 открытого пользования;
- высокоточной геодезической сети (ВГС) – 300 пунктов;
- спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1) – 4500 пунктов;

Пункты указанных геодезических сетей, связанные между собой геодезическими измерениями, могут быть совмещены.

## **2. Плановые опорные геодезические сети**

Плановое положение пунктов опорной геодезической сети при инженерно-геодезических изысканиях для строительства следует определять методами триангуляции, полигонометрии, трилатерации, построения линейно-угловых сетей, а также на основе использования спутниковой геодезической аппаратуры (приёмники *GPS* и др.) и их сочетанием.

Известные способы триангуляции, трилатерации и полигонометрии, а также сочетания этих способов относятся к традиционным способам построения плановых опорных инженерно-геодезических сетей. Некоторые из этих способов, как например триангуляция сегодня утратили своё значение. Другие, как

полигонометрия, наоборот, в связи с широким внедрением электронных тахеометров, наиболее востребованы, а в сочетании со спутниковыми определениями в настоящее время составляют основу методов и схем построения и сгущения инженерно-геодезических сетей.

Технические требования к построению геодезической основы традиционными способами приведены в СП 47.13330.2012 (СП 11-104-97).

Для инженерных целей преимущественно развиваются Спутниковые Геодезические Сети Сгущения (СГСС), сети 4 класса, и 1 разряда. Плановые сети 2 разряда создаются в виде исключения на отдельных участках застроенных территорий.

Для площадей менее 1 км<sup>2</sup> опорные сети не предусмотрены, а только съёмочные сети. Высоты съёмочных сетей определяются техническим нивелированием независимо от площади съёмки.

В таблице 1. приведены характеристики точности классов построения инженерно-геодезических опорных сетей спутниковыми и классическими способами (*триангуляции, полигонометрии и трилатерации*).

Опорная геодезическая сеть должна проектироваться с учетом ее последующего использования при геодезическом обеспечении строительства и эксплуатации объекта.

**Характеристики точности классов построения опорных инженерно-геодезических сетей**

**Таблица 1.**

Вид сети	СКП определения координат относительно исходных пунктов, мм	СКП взаимного положения смежных пунктов в плане, мм	СКП взаимного положения смежных пунктов по высоте, мм
СГСС и сеть постоянно действующих базовых станций	20	20	25
Спутниковые сети, полигонометрия и пр. 4 класса	20	25	-
Спутниковые сети, полигонометрия и пр. 1 разряда	50	30	-

Плотность пунктов опорной геодезической сети при производстве инженерно-геодезических изысканий устанавливается в программе изысканий из расчета и определяется способом производства топографической съёмки.

Предельная погрешность взаимного планового положения смежных пунктов опорной геодезической сети не должна превышать удвоенных значений СКП.

Высотная привязка центров пунктов опорной геодезической сети должна производиться нивелированием II, III, IV классов или техническим (тригонометрическим) нивелированием с учетом типов заложенных центров, а также на основе использования спутниковой геодезической аппаратуры.

Технические характеристики и этапы построения опорной геодезической сети отражены в таблице 2.

***Требования к построению геодезической основы на площадках изысканий и строительства***

***Таблица 2.***

Плановая опорная и съёмочная сеть	СКП измерения углов, сек	Предельная погрешность угловых измерений	Предельная погрешность линейных измерений	Измерение сторон в сети трилатерации
4 класс	2	$5\sqrt{n}$	1/25000	1:100000
1 разряд	5	$10\sqrt{n}$	1/10000	1:50000
2 разряд	10	$20\sqrt{n}$	1/5000	1:20000

Методики линейных измерений длин базисных (выходных) сторон в триангуляции, а также измерения длин сторон в полигонометрии светодальномерами и электронными тахеометрами следует принимать исходя из требований к точности измерений и указаний фирм (предприятий) - изготовителей этих приборов.

Целесообразно совмещать центры плановой геодезической сети и реперы нивелирных линий.

Отдельный ход полигонометрии должен опираться на два исходных пункта и два исходных дирекционных угла. Построение висячих ходов полигонометрии не допускается.

**Характеристики точности измерений в высотных опорных сетях**

**Таблица 3**

Показатель	Точность измерения в ходах и сетях (полигонах) нивелирования (мм)			
	II класс	III класс	IV класс	Техническое (геометрическое или тригонометрическое)
Допустимые невязки в полигонах и по линиям нивелирования, мм		$10\sqrt{L}$	$20\sqrt{L}$	$50\sqrt{L}$ $10\sqrt{n}$ *
СКП измерения превышения на станции, мм, не более	0,30	0,65	3,0	8,0
СКП определения отметок пунктов нивелирной сети относительно исходных пунктов в самом слабом месте, мм	10	20	30	50
Примечание - $L$ - длина хода в км, $n$ - число станций на 1 км хода.				
* При числе станций на 1 км хода более 25.				

Высотная опорная геодезическая сеть на территории проведения инженерно-геодезических изысканий развивается в виде сетей нивелирования II, III и IV классов, а также технического нивелирования в зависимости от площади и характера объекта строительства. Характеристики точности высотных опорных сетей приведены в табл. 3.

Исходными для развития высотной опорной геодезической сети для изысканий и строительства являются пункты государственной нивелирной сети.

Нивелирная сеть должна создаваться в виде отдельных ходов, систем ходов (полигонов) или в виде самостоятельной сети и привязываться не менее чем к двум исходным нивелирным знакам (реперам), как правило, высшего класса.

Допускается производить привязку линий нивелирования опорной геодезической сети IV класса к реперам государственной нивелирной сети IV класса.

Геодезические сети сгущения 1 и 2 разрядов допускается уравнивать упрощенными способами. При этом результаты вычислений значений углов следует округлять до целых секунд, а величины длин линий и координат до 1 мм.

### 3. Плано-высотная съёмочная геодезическая сеть

Съёмочная геодезическая сеть строится в развитие опорной геодезической сети или в качестве самостоятельной геодезической основы на территориях площадью до 1 км<sup>2</sup>.

Плано-высотное положение пунктов (точек) съёмочной геодезической сети следует определять построением теодолитных ходов или развитием триангуляции, трилатерации, линейно-угловых сетей, на основе использования спутниковой геодезической аппаратуры (приемников *GPS* и др.), прямых, обратных и комбинированных засечек и их сочетанием, ходов технического или тригонометрического нивелирования или спутниковыми высотными определениями.

#### *СКП положения пунктов съёмочного обоснования относительно исходных пунктов*

*Таблица 4*

Масштаб топографической съёмки для создания инженерно-топографических планов и ИЦММ	СКП в определении координат пунктов (точек) съёмочной геодезической сети относительно пунктов опорной геодезической сети, м, не более	
	Застроенная территория, открытая местность на незастроенной территории	Незастроенная территория, закрытая растительностью
1:5000	0,50	0,75
1:2000	0,25	0,35
1:1000	0,10	0,15
1:500	0,08	0,10
1:200	0,05	-

СКП положения пунктов съёмочного обоснования относительно исходных пунктов опорной сети не должны превышать величин, приведённых в табл. 4.

Предельно допустимые погрешности не должны превышать удвоенных значений СКП. При техническом контроле невязки по редуцированным не уравненным измерениям при развитии съёмочной геодезической сети теодолитными ходами не должны превышать удвоенных предельно допустимых погрешностей.

СКП определения высот пунктов (точек) съёмочной геодезической сети относительно пунктов ближайших реперов (марок) опорной высотной сети не должны превышать на равнинной местности 0,05 м и в горных и предгорных районах  $1/5$  высоты сечения рельефа топографической съёмки.

Точки съёмочной геодезической сети должны закрепляться, как правило, временными знаками (металлические штыри, костыли, трубки, деревянные столбы и колья и др.).

На застроенной территории не менее чем пятая часть точек съёмочной геодезической сети должна закрепляться постоянными знаками типа «5 г.р.» и «6 г.р.».

Теодолитные ходы между пунктами опорной геодезической сети прокладываются в виде отдельных ходов с узловыми точками.

При развитии съёмочной геодезической сети полярным способом с применением электронных тахеометров длины полярных направлений допускается увеличивать до 1000 м. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных углов не должна превышать 15".

Отдельный теодолитный ход должен опираться на два исходных пункта и два исходных дирекционных угла.

При использовании для измерения сторон теодолитного хода светодальномеров и электронных тахеометров предельные длины сторон хода не устанавливаются, а количество сторон в ходе не должно превышать:

- при съёмке в масштабах 1:5000 и 1:2000 в открытой местности - 50 и в закрытой - 100;
- при съёмке в масштабе 1:1000 - 40 и 80 соответственно характеристике местности, а при съёмке в масштабе 1:500 - 20.

Измерение длин линий электронными тахеометрами и светодальномерами производится в соответствии с методикой, указанной фирмой-производителем прибора в руководстве по его эксплуатации.

Измерение углов в теодолитных ходах должно производиться теодолитами (типа 3Т5КП, Т15МКП и 4Т3ОП или им равноточными) одним приемом с перестановкой лимба между полуприемами (для теодолитов с двусторонней системой отсчета на величину, близкую к  $90^\circ$ , а для теодолитов с односторонней системой отсчета - в пределах  $5^\circ$ ). Расхождения значений угла между полуприемами не должны превышать  $45''$ .

Прямые засечки следует выполнять не менее чем с трех пунктов опорной геодезической сети так, чтобы углы между смежными направлениями на определяемой точке были не менее  $30^\circ$  и не более  $150^\circ$ .

Обратные засечки должны выполняться не менее чем по четырем пунктам опорной геодезической сети при условии, чтобы определяемая точка не находилась вблизи окружности, проходящей через три исходных пункта.

Комбинированные засечки должны строиться сочетанием прямых и обратных засечек с использованием не менее трех исходных пунктов.

При создании съемочной геодезической сети могут быть использованы: метод определения двух точек по двум исходным пунктам (Задача Ганзена) и линейные засечки с трех и более исходных пунктов.

Техническим (тригонометрическим) нивелированием должны определяться высоты точек съемочной сети, а также пунктов триангуляции (трилатерации) и полигонометрии, высоты которых не определены нивелированием III-IV классов.

Ходы технического нивелирования должны прокладываться, как правило, между реперами (марками) нивелирования II-IV классов в виде отдельных ходов или систем ходов (полигонов).

Допускаются замкнутые ходы технического нивелирования, опирающиеся на один исходный репер (ходы, прокладываемые в прямом и обратном направлениях).

Допустимые длины ходов технического нивелирования в зависимости от высоты сечения рельефа топографической съемки должны приниматься по таблице 5.

Техническое нивелирование следует выполнять нивелирами (типа 3Н-5Л, 2Н-10КЛ или им равноточными), а также теодолитами с компенсаторами (типа

Т15МКП и др.) или уровнем при трубе, с отсчетом по средней нити по двум сторонам рейки.

**Пределные длины ходов технического нивелирования**

**Таблица 5.**

Ходы технического нивелирования	Пределная длина хода, км, при высоте сечения рельефа, м		
	0,25	0,5	1 и более
Между двумя исходными реперами (марками)	2	8	16
Между исходным пунктом и узловым точкой	1,5	6	12
Между двумя узловыми точками	1	4	8

Расхождения между значениями превышений, полученными на станции по двум сторонам реек, не должен быть более 5 мм.

Расстояние от инструмента до мест установки реек должны быть по возможности равными и не превышать 150 м.

Невязка хода технического нивелирования или полигона не должна превышать величины  $50\sqrt{L}$  мм, где  $L$  - длина хода, км.

При числе станций на 1 км хода более 25 невязка хода нивелирования или полигона не должна превышать величины  $10\sqrt{n}$  мм, где  $n$  - число станций в ходе.

Тригонометрическое нивелирование следует применять для определения высот точек съемочной геодезической сети при топографических съемках с высотой сечения рельефа через 2 и 5 м, а на всхолмленной и пересеченной местности - через 1 м.

В качестве исходных для тригонометрического нивелирования должны использоваться пункты, высоты которых определены методом геометрического нивелирования. В горных районах допускается использовать в качестве исходных пункты государственной или опорной геодезической сети, высоты которых определены тригонометрическим нивелированием/



Длина ходов тригонометрического нивелирования не должна превышать при топографических съемках с высотой сечения рельефа через 1, 2 и 5 м соответственно 2, 6 и 12 км.

Тригонометрическое нивелирование точек съемочной сети должно производиться в прямом и обратном направлениях с измерением вертикальных углов теодолитом по средней нити одним приемом при двух положениях вертикального круга. Колебание «места нуля» на станции не должно превышать 1'. Высоты инструмента и визирных целей следует измерять с точностью до 1 см.

Расхождение между прямым и обратным превышениями для одной и той же линии при тригонометрическом нивелировании не должно быть более  $0,04S$ , м, где  $S$  - длина линии, выраженная в сотнях метров.

Допустимые невязки в ходах и замкнутых полигонах тригонометрического нивелирования не должны превышать величины  $0,04 \frac{L}{\sqrt{n}}$ , см, где  $L$  - длина хода в метрах, а  $n$  - число линий в ходе или полигоне.

Геодезические пункты, закрепленные постоянными знаками (грунтовыми и стенными реперами, марками и др.), и долговременно закрепленные точки съемочных сетей подлежат учету и сдаче для наблюдения за их сохранностью заказчику и органам архитектуры и градостроительства в установленном порядке.

#### **4. Построение съёмочного обоснования спутниковыми методами**

В случае, если на объекте предполагается проведения съёмки ситуации и рельефа с применением спутниковой технологии, создание геодезических сетей сгущения, съёмочного обоснования и его сгущения не требуется, поскольку методы спутниковых определений по дальности и точности принципиально обеспечивают возможность проведения съёмочных работ непосредственно на основе государственной геодезической и нивелирной сети, имеющей соответствующую плотность. При этом на пунктах этой сети должны отсутствовать факторы, понижающие точность спутниковых определений.

В качестве исходных пунктов, от которых развивается съёмочное обоснование (далее – исходных пунктов) следует использовать все пункты геодезиче-

ской основы, находящиеся в пределах объекта и ближайшие к объекту за его пределами. Количество исходных пунктов с известными плановыми координатами должно быть менее 4, и не менее 5 пунктов с известными высотами, так чтобы обеспечить приведение съёмочного обоснования в систему координат и высот пунктов геодезической основы.

Плотность и расположение пунктов съёмочного обоснования устанавливаются в техническом проекте в зависимости от выбранного метода ведения съёмки ситуации и рельефа.

Плановые координаты и высоты пунктов съёмочного обоснования с применением глобальных навигационных спутниковых систем определяют построением съёмочных сетей или методом висячих пунктов.

Предельные погрешности положения пунктов планового съёмочного обоснования, в том числе плановых опознаков, относительно пунктов государственной геодезической сети не должны превышать на открытой местности и на застроенной территории 0,2 мм в масштабе карты или плана и 0,3 мм – при крупномасштабной съёмке на местности, закрытой древесной и кустарниковой растительностью.

Пункты съёмочного обоснования закрепляют на местности долговременными знаками с таким расчётом, чтобы на каждом съёмочном планшете, имелось не менее трёх точек при съёмке в масштабе 1:5000 и двух точек при съёмке в масштабе 1:2000. Плотность закрепления пунктов съёмочного обоснования при съёмке в масштабах 1:1000 и 1:500 определяется техническим проектом.

На территории населённых пунктов и промышленных площадок все точки съёмочного обоснования (в том числе планово-высотные опознаки) закрепляют знаками долговременного закрепления. Типы знаков долговременного и временного закрепления показаны на рис. 3.

Проектирование съёмочного обоснования должно производиться с учётом требований Инструкции [7, 8] в зависимости от масштаба и метода предстоящей съёмки. При этом должны быть также учтены специальные требования к геодезическим сетям проектных и других организаций. Проектированию предшествуют следующие работы:

- сбор и анализ сведений и материалов обо всех ранее выполненных геодезических работах на объекте съёмки;

- изучение района предстоящих работ по имеющимся картам наиболее крупного масштаба и литературным источникам;
- изучение материалов проведённого специального обследования района работ, включающее обследование и инструментальный поиск геодезических знаков ранее выполненных работ;
- выбора наиболее целесообразного варианта развития геодезических построений с учётом перспективы развития территорий.

**Рекомендации по применению методов построения  
съёмочного обоснования**

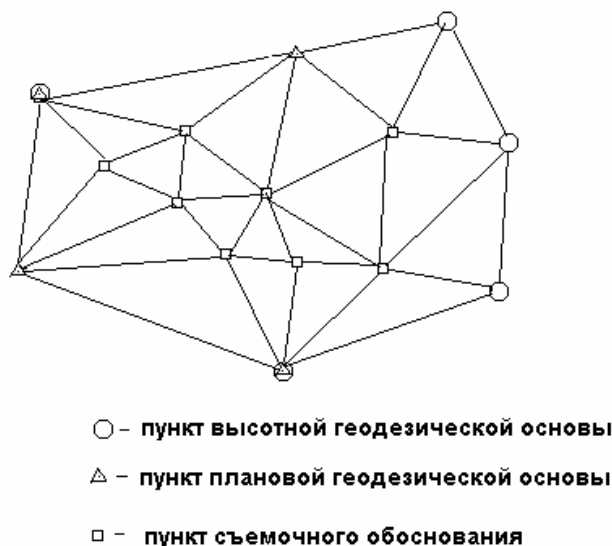
**Таблица 6.**

Масштаб съёмки; высота сечения рельефа	Плановое обоснование		Планово-высотное или вы- сотное обоснование	
	Метод развития съёмочного обоснования с использованием спутниковой технологии	Метод спутни- ковых опреде- лений	Метод разви- тия съёмочного обоснования с использовани- ем спутнико- вой технологии	Метод спут- никовых оп- ределений
1:10 000, 1:5 000; 1 м	лучевой	быстрый ста- тический или реокупация	сетевой	быстрый статический или реокупация
1:2 000, 1:1 000, 1:500; 1 м и более	сетевой	быстрый ста- тический или реокупация	сетевой	быстрый статический или реокупация
1:5000; 0,5 м	лучевой	быстрый ста- тический или реокупация	сетевой	статический
1:2 000, 1:1 000, 1:500; 0,5 м	сетевой	быстрый ста- тический или реокупация	сетевой	статический

Графическую часть проекта съёмочного обоснования составляют, как правило, на картах масштаба 1:50 000 – при проектировании съёмки масштаба 1:10

000, и на картах масштаба 1:10 000 и 1:25 000 – при проектировании съёмки крупных масштабов.

В процессе проектировочных работ необходимо выполнить общие требования по проектированию, изложенные ранее в разделе 2.



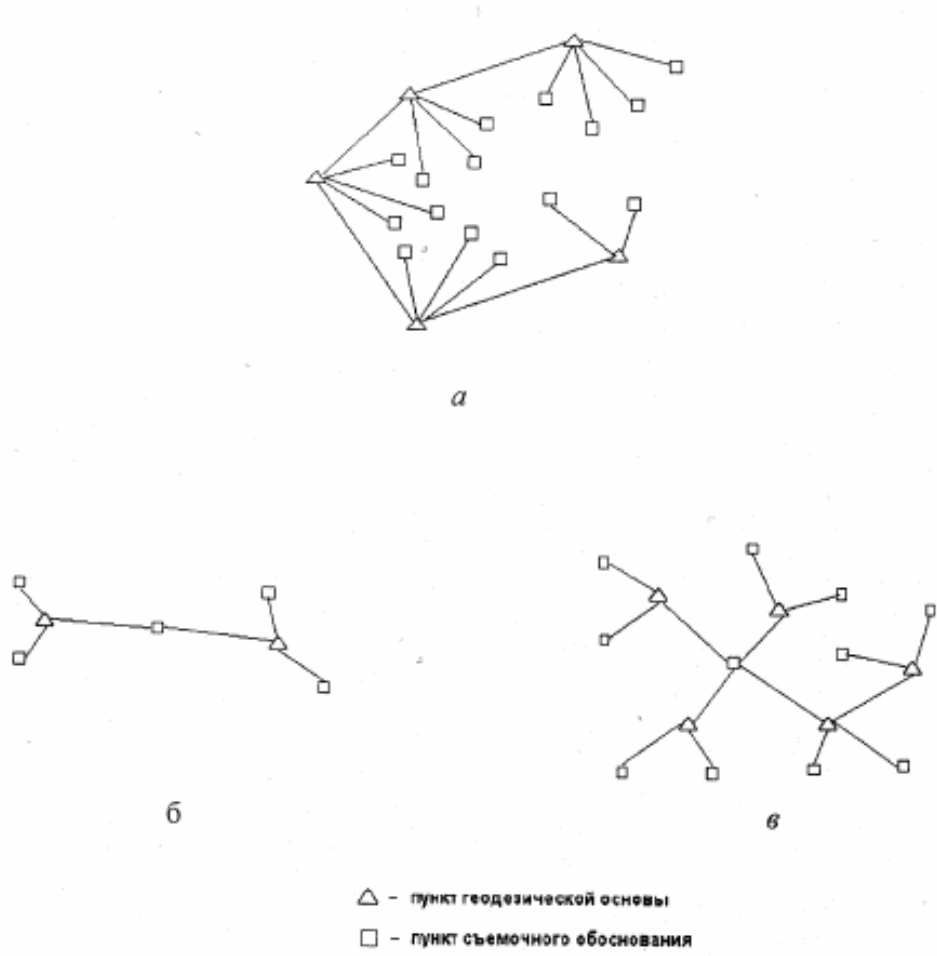
***Рис.1. Схемы построения съёмочного обоснования сетевым методом***

При создании съёмочного обоснования с применением спутниковой аппаратуры следует придерживаться ряда нижеследующих специфических требований:

- Следует определить тип и эксплуатационные характеристики спутниковой аппаратуры, которую надлежит использовать для производства работ.
- В соответствии с заданным масштабом съёмки и высотой сечения рельефа необходимо выбрать метод спутниковых определений и метод развития съёмочного обоснования (таблица 6).
- По материалам топографо-геодезической изученности объекта работ следует выбрать пункты геодезической основы для развития съёмочного обоснования. Геодезическая основа, используемая для развития съёмочного обоснования и съёмки ситуации и рельефа посредством спутниковых опреде-

лений, должна удовлетворять требованиям по беспрепятственному и помехоустойчивому прохождению радиосигналов.

- Необходимо составить проект съёмочного обоснования в соответствии с требованиями нормативных актов и Инструкции [7, 8], удовлетворив требования по беспрепятственному и помехоустойчивому прохождению радиосигналов.



**Рис. 2. Схемы построения съёмочного обоснования  
лучевым методом**

- Подготовить рабочую программу полевых работ по развитию съёмочного обоснования с применением спутниковой технологии в соответствии с общими рекомендациями [7] и с обоснованием выбора метода построения сети. Для развития съёмочного обоснования с использованием спутниковой технологии, в зависимости от проектируемого масштаба съёмки и высоты се-

чения рельефа, следует применять один из двух методов – *сетевой* (рис. 1) или метод *определения висячих пунктов* (рис. 2), иначе *лучевой*.

При проектировании съёмочного обоснования для съёмки конкретного объекта в требуемом масштабе с заданной высотой сечения рельефа необходимо выбрать метод спутниковых определений – статический, быстрый статический или метод реокупации.

Указания по выбору метода развития съёмочного обоснования и метода спутниковых определений в зависимости от масштаба съёмки и высоты сечения рельефа содержатся в табл.б.

Метод развития съёмочного обоснования *определением висячих пунктов (лучевым методом)* рекомендовано применять при подготовке съёмочной геодезической основы относительно мелких масштабов с высотами сечения рельефа 1 м, 2 м и более, то есть в тех случаях, когда не требуется получение материалов высокой точности.

Метод развития съёмочного обоснования *построением сети* рекомендован к применению для получения наиболее точных плановых координат и высот пунктов, необходимых при производстве съёмок наиболее крупных масштабов со всеми регламентированными значениями высоты сечения рельефа (от 0,5 м до 5 м).

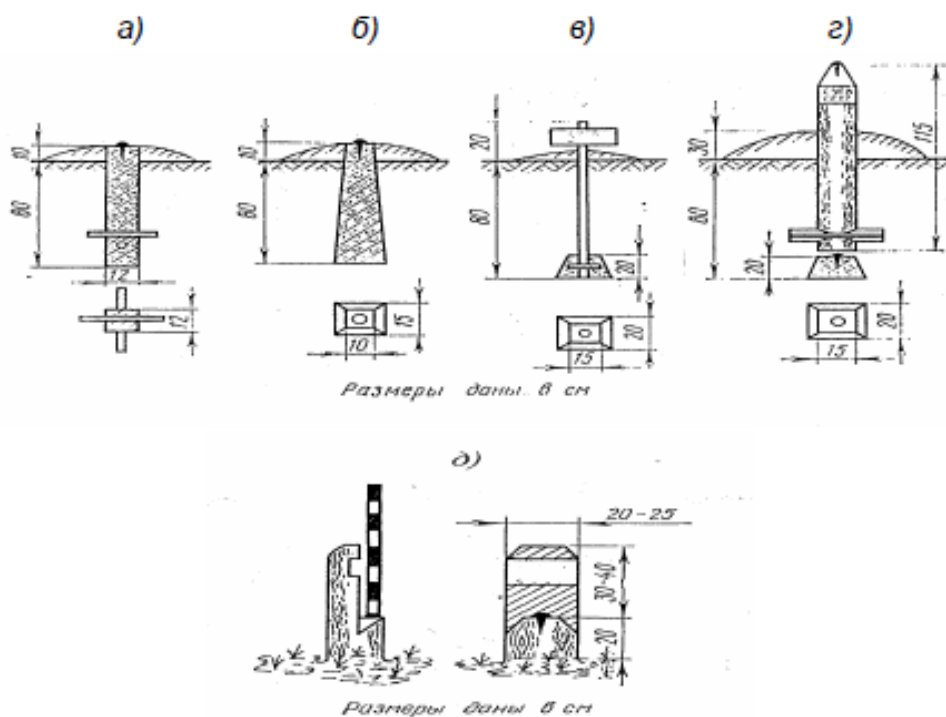
*Быстрый статический* метод спутниковых определений при производстве работ по развитию съёмочного обоснования является основным. Он позволяет производить определение плановых координат пунктов и их высоты с достаточной точностью и высокой оперативностью для большей части масштабного ряда и высот сечения рельефа.

*Метод реокупации* заменяет быстрый статический метод в тех случаях, когда по условиям проведения работ выгодно осуществить два кратковременных приёма наблюдений спутников, разнесённых во времени, вместо одного длительного приёма.

*Статический метод* спутниковых определений из-за сравнительно невысокой оперативности выполнения работ может быть применён в тех случаях, когда при высоте сечения рельефа 0,5 м для получения высотной съёмочной основы и технически и экономически целесообразно проводить не нивелирные работы, а спутниковые определения.

В случае применения 2-х приёмников для наблюдений спутников выполнение отмеченных указаний не вызывает затруднений. Однако, если на объекте планируют использование более 2-х приёмников, и проектируют ведение работ сеансами, включающими наблюдения на 3-х и более пунктах, то при составлении программы полевых работ необходимо намечать для каждого сеанса в качестве независимо определяемых такие линии, ломаная из соединения которых не пересекает сама себя в точках соединения линий и не замыкается.

При планировании развития съёмочного обоснования методом определения висячих пунктов необходимо запроектировать определение линий от каждого пункта съёмочного обоснования до ближайшего к нему пункта геодезической основы, а также между соседними пунктами геодезической основы (как показано на рис. 2 а). Если это целесообразно, необходимо запроектировать определение линий от пунктов съёмочного обоснования до нескольких ближайших пунктов геодезической основы (рис. 2 б, в), получая, таким образом, засечки. При этом во всех случаях геодезическое построение должно включать необходимое количество пунктов геодезической основы.



**Рис. 3. Типы знаков долговременного закрепления**

*Рекогносцировку и закрепление пунктов съёмочного обоснования* на местности проводят в соответствии с указаниями раздела 6 инструкции [7]. При этом, учитывают особенности спутниковой технологии, в процессе рекогносцировки, а также решают ещё и следующие задачи:

В процессе рекогносцировки необходимо вести журнал, в котором для каждого пункта должны фиксироваться азимуты и высоты границ нахождения препятствий, если высота препятствий над горизонтом более  $15^\circ$ . При этом высота препятствий над горизонтом должна определяться с учётом вероятной высоты расположения антенны приёмника.

Пункты съёмочного обоснования должны быть закреплены на местности знаками, обеспечивающими долговременную сохранность пунктов и временными знаками, с расчётом на сохранность точек на время съёмочных работ (рис 3, рис. 4).

При закреплении пунктов съёмочного обоснования знаками долговременного типа руководствуются следующим.

В качестве знаков долговременного закрепления применяют:

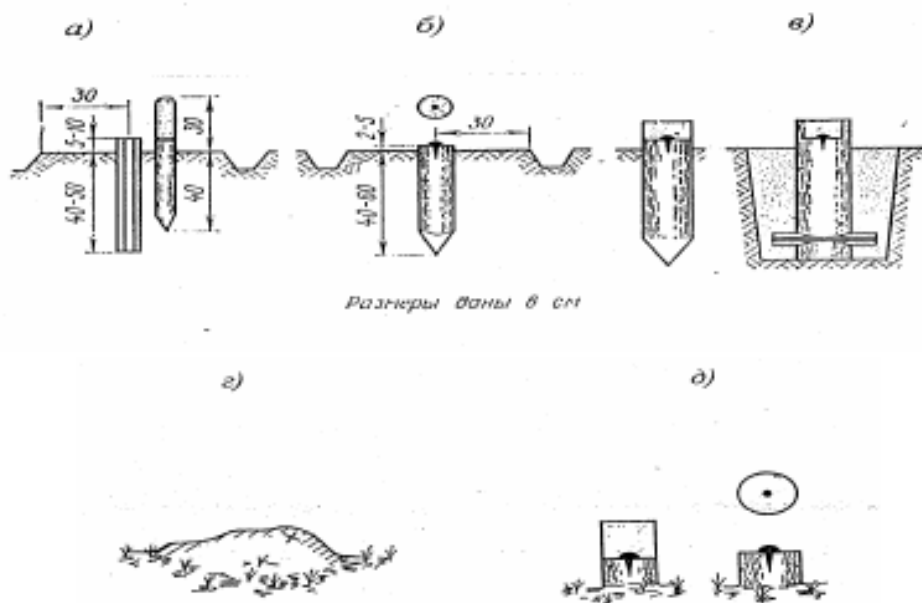
- бетонные пилоны и монолиты (рис. 3 а, б) сечением  $12 \times 12$  или  $15 \times 15$  см, в верхний конец которого заделан кованый гвоздь, а в нижнюю часть для лучшего скрепления с грунтом могут быть вделаны два металлических штыря;
- стальная труба, отрезок рельса или уголкового стального профиля (рис. 3 в) или деревянный столб (рис. 3 г) с железобетонным якорем внизу и металлической пластиной для надписи сверху;
- это может быть пень свежесрубленного хвойного дерева (рис. 5.4 д) (используют в залесённых районах) диаметром в верхней части не менее 20 см, обработанный в виде столба, с вырезом для надписи и полочкой с забитым в неё кованым гвоздём;
- марка, штырь, болт, закреплённые цементным раствором в бетонных конструкциях различных сооружений, участки земли с твёрдым покрытием или скалы.

Бетонные пилоны и монолиты знаков (рис. 3 а – г) закладывают на глубину 80 см.

Знаки долговременного типа должны быть окопаны канавой в виде квадрата со стороной 1,5 м, глубиной 0,3 м, шириной 0,2 м в нижней части и 0,5 м в



верхней части. Вокруг знака должна быть сделана насыпь грунта высотой 0,10 м. В районах болот, залесённой местности и многолетней мерзлоты насыпь заменяют срубом (1,0 × 1,0 × 0,3 м), заполненным грунтом. При этом знак не окапывают.



**Рис. 4. Типы знаков временного закрепления пунктов съёмочного обоснования**

Во всех случаях знаки долговременного типа устанавливают в местах, обеспечивающих их сохранность, технику безопасности и удобство использования при топографической съёмке, изысканиях и строительстве, а также при последующей эксплуатации построенного объекта. Не разрешается производить закладку долговременных знаков на пахотных землях и болотах, проезжей части дорог, вблизи размываемых бровок русел рек и берегов водохранилищ и в других местах, где может нарушиться сохранность знака и где сам знак может явиться помехой хозяйственной деятельности.

При закреплении пунктов съёмочного обоснования временными знаками необходимо придерживаться следующих рекомендаций.

Временными знаками могут служить металлические трубы (уголковая сталь), забитые в грунт на 0,4 – 0,6 м, с установленными рядом сторожками (рис.

4 а), деревянные колья диаметром 5 – 8 см и деревянные столбы (рис. 4 б, в), либо нанесённый краской крест на валуне (рис. 4 з), пни деревьев (рис. 4 д).

Временные знаки окапывают канавой по окружности диаметром 0,8 м

Центр временного знака обозначают гвоздём, вбитым в верхний срез кола (столба) или насечкой на металле. В залесённой местности для облегчения нахождения знака в случае необходимости делают отметки на деревьях краской.

Каждому знаку съёмочного обоснования присваивают порядковый номер с таким расчётом, чтобы на объекте не было знаков с одинаковыми номерами.

При включении в состав съёмочного обоснования знаков, принадлежащих ранее созданным геодезическим построениям, номера этих знаков изменять не разрешается.

На долговременных знаках масляной краской, а на временных – пикетажным карандашом – пишут: сокращённое название организации, проводящей работу, номер закреплённого пункта (точки) и год установки знака.

*Подготовительные работы* при применении спутниковой аппаратуры для построения съёмочного обоснования складываются из следующего:

- подготовка аппаратуры к работе осуществляется в соответствии с требованиями эксплуатационной документации;
- осуществляется проверка готовности аппаратуры и исполнителей к осуществлению работ по рабочей программе полевых работ, предусмотренной проектом;
- проводятся операции по прогнозированию спутникового созвездия.

Выполнение требований эксплуатационной документации по подготовке аппаратуры к работе при развитии съёмочного обоснования должно вестись в соответствии с инструкциями по эксплуатации аппаратуры (или заменяющими их документами, входящими в комплект аппаратуры).

Одним из этапов подготовки к проведению спутниковых определений является *прогнозирование спутникового созвездия*. Цель его – определение дат, моментов и интервалов времени, в которые параметры конфигурации спутникового созвездия оптимальны для спутниковых определений.

Исходными данными для прогнозирования спутникового созвездия являются координаты объекта работ и эфемеридная информация о спутниках. В случае, если в районе расположения пунктов геодезической основы, съёмочного обос-

нования или топографических съёмок имеются предметы или сооружения, препятствующие прохождению радиосигналов от спутников, то в качестве исходной информации при прогнозировании необходимо использовать также значения высот и азимутов границ нахождения препятствий.

В качестве исходных координат объекта работ используют географические координаты, взятые с точностью до 1°.

Эфемеридную информацию в виде файла, называемого в эксплуатационной документации альманахом, получают либо из специально для этого выполняемых спутниковых определений, либо используют эфемеридную информацию, образовавшуюся в процессе каких-либо ранее выполненных спутниковых определений. В любом случае спутниковые определения для получения альманаха должны быть выполнены в дату, отстоящую не более чем на 30 суток от даты, на которую выполняют прогнозирование. Если для получения альманаха специально проводят спутниковые определения, то их выполняют одним приёмником, в течение 5 минут, руководствуясь эксплуатационной документацией.

Для объекта работ или его части, где препятствия прохождению радиосигналов, передаваемых спутниками, отсутствуют, прогнозирование выполняют сразу для всех пунктов и снимаемых участков объекта.

В случае, если на объекте работ имеются препятствия, прогнозирование должно быть выполнено с учётом этого обстоятельства. Оно должно быть осуществлено в отдельности для каждого пункта, если выполняют подготовку к производству работ по развитию съёмочного обоснования, или в отдельности для каждого участка съёмки, в пределах которого условия прохождения радиосигналов можно принять одинаковыми, если производят подготовку к выполнению съёмки. При этом используют высоту и азимут объектов, препятствующих прохождению радиосигналов от спутников.

Прогнозирование спутникового созвездия выполняют на ЭВМ с помощью программного пакета, входящего в комплект спутниковой аппаратуры, как описано в прилагаемой эксплуатационной документации.

При прогнозировании для каждого пункта геодезической основы или съёмочного обоснования или участка съёмки в функции времени суток получают график числа доступных для наблюдения спутников и график значений *PDOP* (*GDOP*), на каждую дату предстоящих работ. Данная информация выводится на

дисплей ЭВМ или может быть напечатана как в графической форме, так и в форме таблиц. Кроме того, может быть составлена диаграмма видимых положений спутников на небесной сфере в некоторый задаваемый интервал времени.

При выборе значения интервала регистрации необходимо руководствоваться эксплуатационной документацией используемого типа приёмника с учётом применяемого метода спутниковых определений. Значение интервала регистрации должно *быть одинаковым для всех приёмников*, используемых в сеансе.

Высоту антенны необходимо определять на каждом пункте и пикете. При этом следует руководствоваться эксплуатационной документацией комплекта приёмника. Во избежание ошибок, рекомендуется производить измерения в метрической мере и в дюймах.

При работе со спутниковой аппаратурой необходимо соблюдать следующие правила:

Следить за индицируемым на дисплее значением свободного объёма запоминающего устройства приёмника и вовремя принимать меры по передаче накопившейся информации в ЭВМ.

Во избежание утраты данных спутниковые определения, по окончании каждого рабочего дня копировать полученные данные на дискету (РС-карту).

Всегда отражать в полевом журнале (или его электронном аналоге) ход выполнения работ: время начала и конца приёма, инициализации, потери связи и т. п.

Не допускать образования толстого снежного покрова на поверхности антенны приёмника и её обледенения.

Беречь антенну от попадания разряда молнии.

По окончании рабочего дня упаковывать комплект спутниковой аппаратуры в транспортировочные ящики во избежание механических повреждений или воздействия метеофакторов.

Состав комплекта аппаратуры и оборудования, необходимого для выполнения полевых работ, зависит от метода спутниковых определений, способов и технологических приёмов выполнения работ и других обстоятельств.

*Общие указания по выполнению спутниковых определений.* В продолжение приёма необходимо непрерывно наблюдать как за базовой, так и подвижной станциями не менее 4 спутников одновременно; при применении динамических

методов, и особенно кинематического метода, рекомендуется наблюдать не менее, чем 5 спутников. Состав спутников в продолжение приёма может меняться.

При применении любого из методов спутниковых определений для осуществления приёма на каждом пункте необходимо выполнить следующие операции, руководствуясь эксплуатационной документацией применяемого типа приёмника

- Провести развёртывание аппаратуры, установить приёмник на пункте и определить высоту антенны.
- Подготовить приёмник к работе, как указано в эксплуатационной документации.
- Установить режим регистрации данных наблюдения спутников.
- Пользуясь клавиатурой, ввести в запоминающее устройство: значение номера пункта, значение высоты антенны и вспомогательную информацию: время начала и конца приёма, потерь связи и др.
- Провести приём наблюдений спутников в течение времени, указанного в рабочей программе полевых работ для применяемого метода спутниковых определений.
- Выключить режим регистрации данных и выполнить свёртывание аппаратуры.

В заключение работ на объекте следует выполнить вычислительную обработку данных наблюдений спутников.

Вычислительная обработка производится по следующим этапам:

- 1) предварительная обработка – разрешение неоднозначностей фазовых псевдодальностей до наблюдаемых спутников, получение координат определяемых точек в системе координат глобальной навигационной спутниковой системы и оценка точности;
- 2) трансформация координат в принятую систему координат;
- 3) уравнивание геодезических построений и оценка точности.

В качестве программного обеспечения для производства вычислительной обработки следует использовать программные пакеты, прилагаемые к спутниковой аппаратуре, применявшейся для производства полевых работ. Примерами таких наиболее распространённых программных пакетов являются: *BL-L1* (Зем-

лемер Л1), *SKI (WILD GPS System200, Leica SR-9400, Leica SR-9500), GPSurvey (Trimble 4000SSE, Trimble 4000SSi), PRISM (Ashtech Z-12, Ashtech Z-Surveyor)*.

В результате проведения вычислительной обработки должен быть составлен каталог координат и высот пунктов сети обоснования.

# КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

## Инженерно-геодезические изыскания для строительства промышленного комплекса

*Исходными данными* для написания курсового проекта являются:

- Топографическая карта масштаба 1:25000.
- Выделенный на карте участок строительства.

**Задание к курсовому проекту.** 1. На топографической карте масштаба 1:25000 разработать проект планово-высотной геодезической сети для производства топографической съёмки масштаба 1:1000 с сечением рельефа 1,0 м.

2. На выделенном участке запроектировать разбивочную сеть строительной площадки.

3. Выполнить оценку точности проектов сетей, составить пояснительную записку, отобразив весь процесс предстоящих работ.

### СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

#### **1. Геодезические работы при изыскании участка строительства.**

1.1. Сведения о территории участка строительства.

1.2. Топографо-геодезическая обеспеченность участка работ.

#### **2. Проектирование и оценка проекта плановой геодезической основы.**

2.1. Назначение и требования к точности построения обоснования.

2.2. Проектирование и оценка проекта спутниковой сети.

2.3. Проектирование и оценка проекта сети полигонометрии.

2.4. Построение планово-высотной съёмочной сети.

#### **3. Методика спутниковых измерений, приборы.**

#### **4. Угловые и линейные измерения в полигонометрии, приборы.**

#### **5. Производство топографических съёмок.**

5.1. Съёмка на основе глобальных навигационных спутниковых систем.

5.2. Стереотопографическая съёмка.

5.3. Тахеометрическая съёмка участка.

#### **6. Проектирование и оценка точности проекта разбивочной сети**

## ЭТО ВАЖНО

**Курсовой проект пишется** на одной стороне листа писчей бумаги стандартного формата (210x297 мм) *в рукописном исполнении* и брошюруется. Объём не более 30 страниц.

***Запрещается копирование и вставка текста, формул, рисунков из любых источников***

Обязательной составной частью курсового проекта являются собственно проект планово-высотного обоснования на топографической карте. Кроме того к проекту прикладывается: а) схема планово-высотного геодезического обоснования – графический документ, копия проекта на кальке; б) проект разбивочной сети строительной площадки на листе писчей бумаги.

При оформлении курсового проекта следует руководствоваться «Общими требованиями и правилами оформления» - ГОСТ 7.32-081.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

### **1. Геодезические работы при изыскании участка строительства.**

Выделенный (если нет участка, выделить самому 10-15 км<sup>2</sup>) на топографической карте участок предполагается застроить частично жилыми кварталами рабочего посёлка, а часть участка (1 – 2 км<sup>2</sup>) следует выделить под строительство промышленного комплекса.

#### *1.1. Сведения о территории участка строительства.*

Кратко приводятся сведения об участке с позиций условий производства геодезических работ: площадь участка, характер рельефа, разброс высот, ситуация с растительностью, застроенность и пр. Климат и физико-географические условия приводятся согласно району проживания студента.

#### *1.2. Топографо-геодезическая обеспеченность участка работ.*

Здесь оцениваются геодезические пункты, изображённые на карте, их класс (предположительно), количество, высоты сигналов, система координат.

Необходимо привести данные по съёмке: масштаб, высота сечения рельефа, год съёмки.

### **2. Проектирование и оценка проекта плановой геодезической основы.**



### *2.1. Назначение и требования к точности построения обоснования.*

Создаваемое на участке планово-высотное геодезическое обоснование по густоте пунктов и по точности должно соответствовать масштабу предстоящей съёмки 1:1000 с сечением рельефа 1,0 м.

Требуемая густота пунктов обоснования, сгущения и съёмочной сети устанавливается по инструкции [8], согласно пунктам 2.21 и 2.22 и разделу 10.

При расчётах точности планового обоснования следует исходить из требования инструкции [8], где указано, что предельная погрешность положения пунктов плановой съёмочной сети относительно пунктов ГГС и сетей сгущения не должна превышать на плане 0,2 мм для открытой местности и 0,3 мм для местности, закрытой древесной и кустарниковой растительностью.

Площадь съёмки, предложенная студенту составляет 10–15 км<sup>2</sup>. Следовательно, согласно СП 47.13330.2012, (СП 11-104-97) на таком участке строится плановая опорная и съёмочная сеть в 3 этапа. Основой являются построения 4 класса, которые сгущаются построениями 1 разряда. При необходимости сгущение производится теодолитными ходами.

По методическим соображениям студенту предлагается строить сеть в 3 ступени, а именно: построением спутниковой сети, сгущением спутниковой сети полигонометрическими ходами 1 разряда и дальнейшим их сгущением или полигонометрией 2 разряда или теодолитными ходами. Приняв такую схему организации обоснования, следует решить вопрос о точности построения сети в каждой ступени, руководствуясь следующим:

- Погрешность определения положения пунктов в высших ступенях (ошибки исходных данных) должны быть малы по сравнению с ошибками последующих построений, и не превышать их на 10-20%.
- В этом случае коэффициент обеспечения точности  $k$  при переходе от одной ступени обоснования к последующим может быть принят равным 2,2 – 1,5.
- Предельная погрешность в положении пункта съёмочного обоснования относительно пунктов высшей ступени не должна превышать 0,2 мм на плане для открытой местности, т. е.

$$\Delta_3 = 0,2 \times 1000 = 20 \text{ см.}$$

- Приняв коэффициент перехода от предельной погрешности к сред-

ней квадратической равным  $t = 2,0$ , что соответствует доверительной вероятности 95%, найдём значение средней квадратической погрешности в положении точек (пунктов) съёмочного обоснования относительно исходных пунктов ГГС

$$m_3 = \frac{\Delta_3}{t} = \frac{20}{2} = 10 \text{ см}.$$

• Приняв коэффициент перехода от одной ступени обоснования к другой равны  $k = 2$ , подсчитаем значения этих погрешностей для каждой ступени обоснования:

$$m_3 = 10 \text{ см}; \quad m_2 = \frac{m_3}{2} = 5 \text{ см}; \quad m_1 = \frac{m_2}{2} = 2,5 \text{ см}.$$

Суммарная ошибка  $M$  в положении пункта съёмочного обоснования по отношению к исходным пунктам спутниковой сети составит

$$M = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} = 11,5 \text{ см}.$$

Таким образом, суммарная ошибка  $M$  оказалась несколько больше предписанной в 10 см, что и отражает влияние ошибок исходных данных. Это влияние не превышает 15% и даёт право не учитывать ошибки исходных данных.

## *2.2. Проектирование и оценка проекта спутниковой сети.*

Основными нормативными документами при проектировании спутниковых сетей являются «Руководство» [11], «Свод правил» [3], и «Инструкция» [8].

При проектировании спутниковой сети в качестве планового обоснования необходимо руководствоваться следующими положениями.

- Следует выбрать в пределах топографической карты исходные геодезические пункты с известными координатами в количестве 1 – 5, которые при спутниковых измерениях будут служить базовыми станциями.
- Вблизи площадки изысканий на открытых местах следует наметить положение определяемых пунктов (роверных станций).
- При проектировании положения роверных станций необходимо исходить не только из удобств подхода к этим точкам, но и отсутствия помех для радиосигналов при подходе их к антенне приёмника (наличие свободного горизонта).
- Погрешности положения роверных станций рассчитываются по формулам,

приведённым в руководствах избранных спутниковых приёмников по расстоянию до ближайшего исходного пункта (базовой станции).

- Количество спутниковых пунктов определяется дальнейшими соображениями относительно сгущения спутниковой сети полигонометрическими ходами.
- Поскольку полигонометрические ходы следует обеспечивать не только координатной привязкой, но и угловой, то при проектировании спутниковой сети необходимо предусмотреть в пунктах привязки видимость на смежный пункт спутниковой сети для передачи дирекционного угла.

### *2.3. Проектирование и оценка проекта сети полигонометрии.*

При проектировании сетей полигонометрии следует пользоваться такими источниками как «Свод правил» [3], учебниками «Прикладная геодезия» [1, 5].

Ходы полигонометрии проектируются по дорогам и просекам с наиболее благоприятными условиями для измерения углов и линий, избегая чередования слишком длинных и слишком коротких сторон.

В полигонометрической сети следует предусматривать минимальное число порядков, ограничиваясь, как правило, полигонометрией 4 класса и 1 разряда или 1 и 2 разрядов.

Проектируя полигонометрические ходы необходимо рассчитывать ожидаемые средние квадратические ошибки определения пунктов, а также относительные ошибки ходов. В случае если эти ошибки окажутся недопустимыми, проект следует пересмотреть.

Ожидаемая средняя квадратическая ошибка в положении конечной точки полигонометрического хода с примерно равными сторонами, опирающегося на два исходных пункта и дирекционных угла, в случае предварительного исправления углов может быть рассчитана по формулам [2, 5]:

для вытянутого хода

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+3}{12} \quad (1)$$

для изогнутых ходов

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [D_{0i}^2] \quad (2)$$

где  $m_s$  – средняя квадратическая ошибка измерения стороны хода светодальномером или электронным тахеометром;  $n$  – число сторон в ходе;  $m_\beta$  – средняя квадратическая ошибка измерения угла;  $L \approx [S]$  – длина замыкающей, равная длине вытянутого хода;  $D_{0i}$  – расстояние от центра тяжести до  $i$ -й вершины хода,  $[ ]$  – гауссова сумма.

Ход считается вытянутым, если дирекционные углы отдельных сторон отличаются от дирекционного угла замыкающей не больше  $20^\circ$ , а отдельные точки хода отклоняются от замыкающей не более  $1/10$  её длины.

Для определения значений  $[D_{0i}^2]$  необходимо знать координаты центра тяжести хода, которые вычисляют по формулам

$$x_0 = [x_i]/n; y_0 = [y_i]/n,$$

где  $x_0, y_0$  – координаты центра тяжести хода;  $x_i, y_i$  – координаты вершин полигонометрического хода, которые определяют графически по проекту хода, составленному на планах (картах) масштаба 1:25000, или 1:10000.

Полученные координаты  $x_0, y_0$  наносят на проект и графически определяют величины  $D_{0i}$  для каждой точки хода. Предельную относительную невязку хода вычисляют по формуле

$$2M/[S] \leq 1/T, \quad (3)$$

где  $T$  – знаменатель допустимой относительной ошибки хода соответствующего класса (разряда).

Если в процессе проектирования образовалась система полигонометрических ходов с узловыми точками, то оценку точности такой сети проще выполнить современными компьютерными программами. Исходными данными для такой оценки, как правило, являются координаты опорных пунктов, координаты проектируемых точек (снимаются графически с проекта) а также средние квадратические ошибки измерения углов и длин сторон для соответствующего класса полигонометрии.

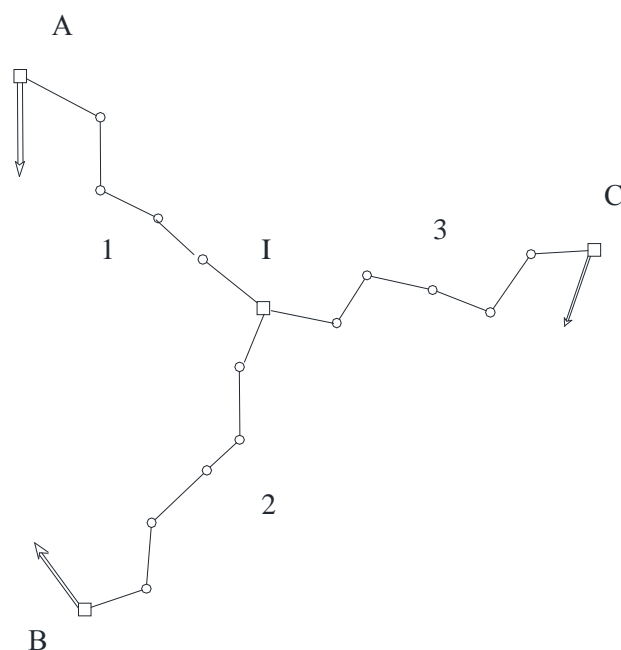
**Оценка точности проектов полигонометрических сетей.** Оценка точности запроектированных сетей полигонометрии может быть выполнена как стро-

гими методами, так и приближёнными: эквивалентной замены или способом последовательных приближений.

Основными критериями при расчётах точности полигонометрии являются предельные ошибки положения точек в наиболее слабом месте уравненного хода или сети. Эти ошибки не должны превышать допустимых значений для соответствующего разряда полигонометрии или технических требований к построению сети на данном объекте. Сказанное выражается соответствующей зависимостью:

$$\frac{M}{L} = \frac{1}{T_c} \text{ или } \frac{2M}{L} = \frac{1}{T}, \quad (4)$$

где  $M$  – средняя квадратическая ошибка в положении конечного пункта хода;  $L$  – длина хода;  $T_c$  – знаменатель средней квадратической относительной ошибки хода;  $T$  – знаменатель предельной относительной ошибки хода. В зависимости от назначения хода или сети критерием точности может служить величина  $1/T$  или  $M$ .



**Рис. 5. Схема сети с одной узловой точкой**

Если задана величина  $1/T$ , то на первый взгляд достаточно было бы выбрать из СП разряд полигонометрии (Приложение В). Там же приводятся требо-

вания к точности измерения углов и длин линий. Однако такой подход не даёт надёжного результата.

Во всех методах оценки проектов исходными данными являются средние квадратические ошибки конечной точки ходов  $M_{ход}$ , которые подсчитываются по формулам (1) и (2). В соответствии с этими ошибками находят веса ходов.

Для уменьшения объёмов вычислений средние квадратические ошибки ходов вычисляют без учёта ошибок исходных данных. В результате вычислений получают средние квадратические ошибки узловых точек, как среднее весовое. С учётом ошибок узловых точек и ошибок начальных пунктов вычисляют ошибки исходных данных для каждого хода

$$m_{исх} = \sqrt{\frac{m_n^2 + m_{узн}^2}{2}}, \quad (5)$$

где  $m_n$  средняя квадратическая ошибка начального пункта;  $m_{узн}$  - средняя квадратическая ошибка узловой точки. После этого находят общую ошибку в каждом ходе

$$M_{общ}^2 = m_{исх}^2 + M_{ход}^2, \quad (6)$$

Средняя квадратическая ошибка в наиболее слабом месте хода, т. е. в его середине вычисляется по формуле

$$M_c = \frac{1}{2} M_{ход}^2. \quad (7)$$

Оценку точности проекта полигонометрической сети приближённым способом покажем на примере оценки способом узлов.

На рисунке 5 приведена схема полигонометрической сети из трёх ходов, которые опираются на начальные пункты  $ABC$  и сходятся в точке  $I$ .

Для оценки точности по каждому ходу вычисляют среднюю квадратическую ошибку конечного пункта, т. е. пункта  $I$  по формулам (1) и (2) и веса

$$P_i = \frac{c}{M_i^2}, \quad (8.)$$

где  $c$  – коэффициент, который подбирают таким, чтобы веса были близки к единице.

Вес узловой точки находят простым сложением весов всех ходов

$$P_i = P_1 + P_2 + P_3. \quad (9)$$

Ошибка узловой точки соответственно будет равна

$$M_I^2 = \frac{c}{P_I}, \quad (10)$$

или

$$M_I = \frac{M_1 \cdot M_2 \cdot M_3}{\sqrt{M_1^2 M_2^2 + M_1^2 M_3^2 + M_2^2 M_3^2}}. \quad (11)$$

Если найденные относительные погрешности для слабых точек полигонометрических ходов не выходят за пределы допустимых значений соответствующего класса ( $1/T = 1:25000$  - 4 класс,  $1/T = 1:10000$  – 1 разряд и  $1/T = 1:5000$  - 2 разряд), то проект принимается к исполнению. В противном случае проектирование следует выполнить заново.

#### 2.4. Построение планово-высотной съёмочной сети.

При проектировании съёмочных сетей следует руководствоваться положениями «Инструкции» [7], выдержки из которой приведены нами ранее.

### 3. Методика спутниковых измерений, приборы.

Организация спутниковых измерений, порядок производства полевых и камеральных работ отражены в источниках [1, 2, 7 и 11]. Методика измерений описывается коротко по «Руководству пользователя» соответствующего спутникового приёмника.

#### 4. Угловые и линейные измерения в полигонометрии, приборы.

Полевые работы при построении полигонометрических ходов отражены в источниках [1, 2].

### 5. Производство топографических съёмок.

Топографические съёмки могут быть реализованы как на основе глобаль-

ных навигационных спутниковых систем, но это может быть стереотопографическая съёмка с лётносъёмочными работами на основе традиционных или беспилотных летательных аппаратов. Съёмку местности также можно выполнять электронным тахеометром с пунктов планово-высотного съёмочного обоснования, т. е. реализовать тахеометрическую съёмку.

Выбор метода топографической съёмки остаётся за студентом и диктуется характером местности (открытая или закрытая), наличием соответствующего оборудования и предпочтениями автора проекта. При смешанных характеристиках местности возможна комбинация способов съёмки. Часть территории может быть заснята спутниковыми методами (открытая местность), на закрытой местности можно предусмотреть тахеометрическую съёмку

При написании этого раздела следует пользоваться «Инструкцией» [7], а также учебными пособиями [1, 2, 3, 5,].

## **6. Проектирование и оценка точности проекта разбивочной сети**

### **6.1. Состав геодезических работ для строительства**

Состав геодезических работ на строительной площадке определяется «СП 126.13330.2012. (СНиП 3.01.03-84). Геодезические работы в строительстве» и зависит от характера и размеров сооружения, его высоты и конструктивных особенностей. Различна при этом и точность измерений и построений.

Обобщая комплекс геодезических работ на строительной площадке, можно выделить такие этапы:

- построение разбивочной основы строительной площадки;
- вынос в натуру и закрепление главных и (или) основных осей сооружения;
- геодезические разбивки нулевого цикла – работы по сооружению подземной части здания (котлована, свайного поля, фундамента, технического подполья, гаражей и других подземных сооружений и их перекрытий);
- прокладка трасс подземных коммуникаций в плане и по высоте;
- геодезические работы при возведении надземной части здания (построение внутренней разбивочной сети здания на исходном горизонте, перенос разбивочных осей и отметок на вышележащие монтажные горизонты, по-



строение разбивочных осей на монтажных горизонтах, детальная разбивка мест положения конструкций, контроль установки конструкций);

- вынос в натуру проекта вертикальной планировки (дорог, площадок, насыпей и выемок и др.).

Практически все перечисленные работы сопровождаются производством исполнительных съёмок и надлежащим оформлением исполнительной документации.

Если предприятия и группы зданий занимают значительные площади, скажем более 100 тыс. м<sup>2</sup> или более 1 км<sup>2</sup>, то для их возведения строятся специальные разбивочные сети строительной площадки.

## 6.2. Общие принципы построения разбивочных сетей

Для обеспечения практически всех видов инженерно-геодезических работ на территории строительства создаются опорные сети, пункты которых хранят плановые координаты и высоты. Разбивочные инженерно-геодезические сети служат основой для выноса на местность проекта инженерного сооружения и коммуникаций.

Эти сети обладают следующими характерными особенностями:

- часто создаются в местной системе координат с привязкой к государственной системе координат;
- форма сети определяется ситуацией на обслуживаемой территории или формой объектов, группы объектов;
- разбивочные сети имеют ограниченные размеры, часто с незначительным числом фигур или полигонов;
- длины сторон, как правило, короткие.

Различают разбивочную сеть строительной площадки и два вида разбивочных сетей здания (сооружения): внешнюю и внутреннюю.

Разбивочная сеть строительной площадки может включать в себя пункты красных линий застройки, а также пункты строительной сетки, а для строительства уникальных сооружений, требующих высокой точности производства разбивочных работ, строятся специальные линейно-угловые сети, микротриангуляция, микротрилатерация, в виде систем прямоугольников, центральных или ра-

диально-кольцевых систем.

Основное требование при создании разбивочных сетей – необходимая точность для обеспечения выноса проекта сооружения на местность.

### *Точность разбивочных сетей площадки*

*Таблица 7.*

Характеристика объектов строительства	Средние квадратические погрешности		
	угловых измерений, сек	линейных измерений	определение превышения на 1 км хода, мм
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью более 1 кв. км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. кв. м	3	1/25000	4
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 кв. км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. кв. м	5	1/10000	6
Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. кв. м; дороги, инженерные сети в пределах застраиваемых территорий	10	1/5000	10
Дороги, инженерные сети вне застраиваемых территорий; земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	30	1/2000	15

Для определения координат пунктов разбивочной сети используют традиционные схемы и методы геодезических построений и измерений, такие как триангуляция, трилатерация, линейно-угловые сети в виде рядов и типовых фигур, полигонометрические ходы и полигоны. Всё чаще при построении разбивочных сетей строительных площадок или отдельного здания используются спутниковые технологии.

В табл. 7 приведены требования к точности разбивочной сети площадки в зависимости от ее размера согласно СНиП 3.01.03-84. Поскольку студенту предлагается на выделенном участке для строительства промышленного комплекса подобрать площадку размером 1 – 2 км<sup>2</sup>, то становится ясно, что точность построения разбивочной сети должна характеризоваться параметрами 1:25000 в линейных измерениях и 3" в угловых. Это, как известно, построения 4 класса точности.

Для реализации поставленной задачи студент подбирает в пределах выделенной территории указанных размеров участок, желательно пустынный, в некотором отдалении от будущих жилых кварталов. Выбранный участок ввиду его небольших размеров на карте масштаба 1:25000, следует перенести на отдельный лист бумаги, где схематически отразить рельеф, ситуацию, но в более крупном масштабе, скажем 1:10000. На схеме следует отразить и знаки ранее запроектированной опорной сети, оказавшиеся поблизости или непосредственно на выбранном участке.

### 6.3. Проектирование разбивочной сети строительной площадки

При строительстве комплексов промышленных и гражданских сооружений на значительных площадях, при строительстве аэропортов или планировке орошаемых полей плано-высотное обоснование может строиться в виде геодезической строительной сетки. Она представляет собой координатную систему из опорных пунктов, расположенных в вершинах квадратов или прямоугольников со сторонами 20, 50, 100, 200 или 400 м.

Проектирование строительной сетки обычно производят на генплане сооружения с учётом размеров его отдельных элементов (цехов, зданий, проездов) и расположения основных осей. Поскольку в настоящем задании генплан отсутствует, студент вычерчивает произвольно ориентированную сетку квадратов со стороной 200 м и общей площадью 1,5 – 2,0 км<sup>2</sup>.

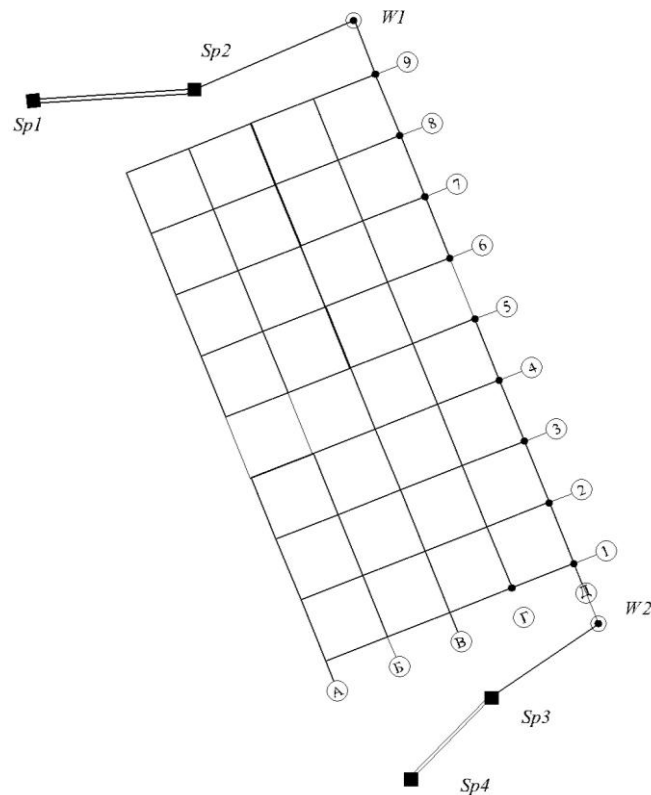
Оценку точности проекта сети можно выполнить в программной среде *Credo*. Можно предрасчитать точность сети, построенной способом полигонометрии, на основе использования спутниковой аппаратуры, а также для комбинированных способов.

Таблица 8

Наименование вида работ	Величины средних квадратических погрешностей при измерениях				Предельная погрешность взаимного положения габаритных осей выносимых в натуру зданий и сооружений, участков трасс дорог	
	Линейные измерения	Измерения углов, сек	Определение отметок реперов мм		В плане, мм	По высоте, мм
Вынос в натуру габаритов зданий, сооружений трасс дорог, подземных и надземных коммуникаций от пунктов государственных геодезических сетей	1/5000 или $\pm (2 + 2_{ppm})^*$	10	2 или 5 мм на 1 км двойного хода		5	10
Определение взаимного положения смежных осей, превышений на станции нивелирования	2 мм				—	—
Перенос точек по вертикали шаговым методом на высоту $H$	15 м	90 м	150 м	240 м	—	—
	1 мм	2 мм	3 мм	5 мм		
Передача отметок шаговым методом на высоту $H^{**}$	на 15 м	на 30 м	на 90 м	на 150 м	—	—
	3 мм	4 мм	7 мм	9 мм		
Разметка монтажных ориентиров при монтаже металлических конструкций **	0,5 мм				—	—
Разметка ориентирных рисок для монтажа сборных железобетонных конструкций на секции (до 30 м) длины дома, сооружения. **	1,0 мм				—	—
Точность определения отметок на монтажном горизонте секции (до 30 м) длины дома, сооружения.	2,0 мм				—	—
Точность определения положения осей дорог в плане (оси дорог, дренажные сооружения, кюветы, откосы и др.) от проектного положения.	20 мм				—	—

В результате выполненной оценки получают среднюю квадратическую ошибку наиболее слабого пункта сети  $M$ , а также находят ожидаемую относи-

тельную ошибку слабой стороны  $M/L$  и, таким образом, выносят суждение о точности запроектированной сети. Как сказано ранее, оценка может быть выполнена по приближённым формулам, но также с использованием различных компьютерных программ.



**Рис. 6. Геодезическая разбивочная сеть стройплощадки**

Для перенесения проекта сетки на местность используют пункты опорной сети или создают независимую исходную сеть из пунктов спутниковых определений  $Sp1 \dots Sp4$ , как это показано на рис.6. На первом этапе на местность выносятся ось основных сооружений, т. е. линия  $W1 - W2$ . Для этих целей используют координаты пунктов опорной сети и проектные координаты точек  $W1$  и  $W2$ . Проектные координаты могут быть сняты с карты графически.

На следующем этапе используя ось  $W1 - W2$  в качестве основы, разбивают сетку квадратов со сторонами  $200 \times 200$  м (или  $400 \times 400$  м). Разбивка сетки квадратов может быть выполнена несколькими способами: это осевой способ и способ редуцирования.

Для построения на местности строительных сеток больших размеров применяют способ редуцирования, который обеспечивает большую точность реализации проекта сетки. Для этого строят сетку любым способом с точностью теодолитного хода и закрепляют вершины временными знаками. Далее по временным знакам прокладывают полигонометрические ходы нужного класса или разряда и получают координаты всех пунктов. Полученные координаты сравнивают с проектными и по разностям координат находят величины редуций, на которые следует сместить каждый пункт предварительно разбитой сетки. После редуцирования выполняют контрольные измерения и пункты сетки закрепляют постоянными железобетонными знаками.

Студенту предлагается кратко описать процесс редуцирования пунктов строительной сетки.

## ПРИМЕР

### оценки проекта сети полигонометрии

Для оценки проектов наиболее простым является метод последовательных приближений, реализацию которого проследим на примере оценки сети рис.7.

Точки  $A, B, В, Г$ , являются исходными, ошибки определения координат которых примем равными нулю.

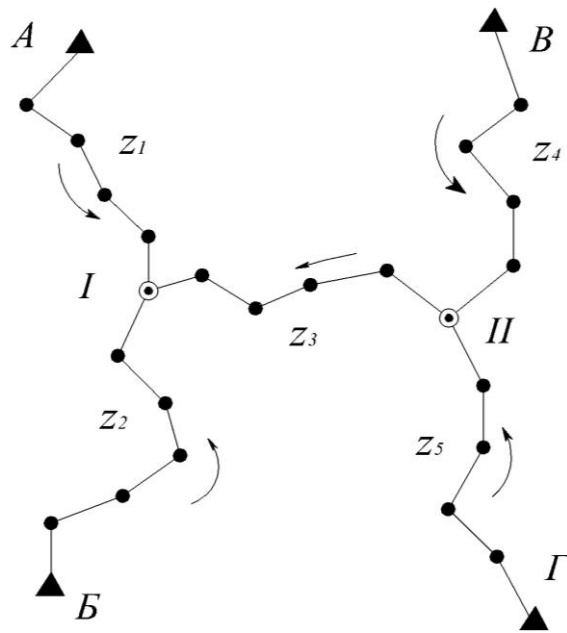
Для ходов  $z_1, z_2, z_3$  исходными будут точки  $A, B$  и  $II$ , а для ходов  $z_3, z_4, z_5$  - точки  $B, Г$  и  $I$ .

Ожидаемые ошибки определения конечных точек каждого хода вычисляют по формулам (1) и (2).

Если значение  $M$  вычислять по формуле (1) также и для изогнутого хода, то ошибка конечной точки получится несколько больше, чем по формуле (2). Это обстоятельство даёт основание при оценке точности, как для вытянутых, так и для ломаных ходов пользоваться формулой (1), создавая при этом некоторый запас точности.

Другие параметры ходов схемы рис. 7 приведены в таблице 9.

Угловые и линейные измерения в ходах выполнены электронным тахеометром с погрешностями соответственно:  $m_\beta = 5''$ ,  $m_s = 10$  мм.



*Рис. 7. Схема проекта сети полигонометрии*

*Таблица 9.*

№№ ходов	Количество линий в ходе	Длина хода в км
$z_1$	11	2,6
$z_2$	12	2,9
$z_3$	7	1,7
$z_4$	10	2,4
$z_5$	6	2,0

Вычисленные по формуле 1 ожидаемые средние квадратичные погрешности ходов приведены в таблице 10.

**Таблица 10.**

№№ ходов	$t^2 = m_s^2 \cdot n$	$u^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [S]^2 \frac{n+3}{12}$	$M^2$	$M$	$M/[S]$
$z_1$	1100	4634	5734	76	1:34000
$z_2$	1200	6177	7377	86	1:34000
$z_3$	700	1415	2115	46	1:37000
$z_4$	1000	3667	4667	68	1:35000
$z_5$	600	1762	2362	49	1:41000

Веса определения положения узловой точки  $I$  по ходам  $z_1, z_2, z_3$  вычисляются по формулам

$$p_1 = \frac{C}{M_{z_1}^2}, \quad p_2 = \frac{C}{M_{z_2}^2}, \quad p_3 = \frac{C}{M_{z_3}^2}.$$

Примем  $C=100000$ . Тогда, пользуясь значениями  $M^2$  из табл. 10 получим:  $p_1=17, p_2= 14, p_3= 47$ .

Вес положения узловой точки  $I$  будет  $P_1 = p_1 + p_2 + p_3 = 78$ , а средняя квадратичная погрешность положения точки определится формулой

$$(M_I^2)_{1\text{прибл}} = \frac{C}{P} = \frac{100000}{78} = 1282, \quad \text{или} \quad (M_I)_{1\text{прибл}} = 36 \text{ мм}.$$

Аналогично для второй узловой точки получим  $p_3 = 47; p_4 = 21; p_5 = 43$

$$(M_{II})_{1\text{прибл}} = 30 \text{ мм}.$$

Во втором приближении полученные средние квадратичные погрешности узловых точек  $I$  и  $II$  следует учесть как ошибки исходных данных. Тогда для первой узловой точки получим  $M_{z1} = 76$  мм;  $M_{z2} = 86$  мм, но  $M_{z3} = \sqrt{46^2 + 30^2} = 55$  мм.

**Таблица 11**

№ хода	1 приближение (точка 1)					
	$M_z$	$M_{исх}$	$M_z^2$	$M_{исх}^2$	$M_{общ}^2$	$p$
$z_1$	76	0	5776	0	5776	17
$z_2$	86	0	7396	0	7396	14
$z_3$	46	0	2116	0	2116	47
	$M_I = 36$					$\sum p = 78$



**Таблица 11 (продолжение)**

№ хода	2 приближение (точка 1)					
	$M_z$	$M_{исх}$	$M_z^2$	$M_{исх}^2$	$M_{общ}^2$	$p$
$z_1$	76	0	5776	0	5776	17
$z_2$	86	0	7396	0	7396	14
$z_3$	46	30	2116	900	3016	33
	$M_I = 40$					64

Для второй узловой точки во втором приближении получим  $(M_{II})_{2 \text{ при } \approx} = 33$  мм.

**Таблица 11 (продолжение)**

№ хода	3 приближение (точка 1)					
	$M_z$	$M_{исх}$	$M_z^2$	$M_{исх}^2$	$M_{общ}^2$	$p$
$z_1$	76	0	5776	0	5776	17
$z_2$	86	0	7396	0	7396	14
$z_3$	46	33	2116	1089	3205	31
	$M_I = 40$					62

Поскольку в третьем приближении средняя квадратичная погрешность первой узловой точки совпала с результатом второго приближения, то вычисления прекращают. Аналогичные расчёты выполняют для второй узловой точки.

Ожидаемая относительная погрешность отдельных ходов может быть подсчитана по формуле

$$\frac{M_{общ}}{L} = \frac{\sqrt{M_{исх}^2 + M_z^2}}{L},$$

где

$$M_{исх} = \sqrt{\frac{M_n^2 + M_k^2}{2}}.$$

Здесь  $M_n$  и  $M_k$  - ожидаемые погрешности соответственно начальной и конечной точек хода.