

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Мосты и транспортные тоннели»

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Конспект лекций  
для студентов специальности  
23.05.06 «Строительство железных дорог,  
мостов и транспортных тоннелей»  
всех специализаций и форм обучения

Екатеринбург  
УрГУПС  
2019

УДК 528.4  
И62

**Инженерная геодезия и геоинформатика** : конспект лекций / С. Г. И62 Лазарев, Е. А. Монин, А. М. Шишов, Ф. Е. Резницкий. – Екатеринбург : УрГУПС, 2019. – 152 с.

Конспект лекций содержит теоретический материал по всем разделам дисциплины «Инженерная геодезия и геоинформатика». Предназначен для обучающихся по специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» всех специализаций и форм обучения.

УДК 528.4

*Опубликовано по решению  
редакционно-издательского совета университета*

*Авторы:* С. Г. Лазарев, доцент кафедры «Мосты и транспортные тоннели», УрГУПС  
Е. А. Монин, ведущий инженер ООО НПО «ТрансТехПроект», Екатеринбург  
А. М. Шишов, ст. преподаватель кафедры «Мосты и транспортные тоннели», УрГУПС  
**Ф. Е. Резницкий,** доцент, канд. техн. наук

*Рецензент:* Н. Г. Горелов, доцент кафедры «Строительные конструкции и строительное производство», канд. техн. наук, УрГУПС

---

*Учебное издание*

**Лазарев** Сергей Геннадьевич  
**Монин** Евгений Александрович  
**Шишов** Алексей Михайлович  
**Резницкий** Феликс Ефимович

**ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ  
И ГЕОИНФОРМАТИКА**

Редактор С. И. Семухина  
Верстка Н. А. Журавлевой

Подписано в печать 30.12.2019. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 8,8. Электронная версия. Заказ 365.

УрГУПС  
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

---

© Уральский государственный университет  
путей сообщения (УрГУПС), 2019

# Оглавление

<b>Введение</b> .....	7
<b>1. Инженерные изыскания</b> .....	8
1.1. Инженерно-геодезические изыскания .....	10
1.1.1. Геодезическая основа строительства.....	11
1.1.2. Съёмка подземных и надземных сооружений.....	12
1.1.3. Инженерно-геодезические изыскания для разработки предпроектной документации .....	12
1.1.4. Инженерно-геодезические изыскания для разработки проекта.....	13
1.1.5. Инженерно-геодезические изыскания для разработки рабочей документации .....	14
1.1.6. Инженерно-геодезические изыскания в период строительства, эксплуатации и ликвидации зданий и сооружений .....	15
1.2. Сводка формул математики, необходимых для изучения инженерной геодезии, основные термины .....	16
1.3. Метрология в геодезическом производстве, общие принципы организации геодезических работ .....	17
<b>2. Изображение поверхности земли на плоскости</b> .....	20
2.1. Сведения о фигуре и размерах земли .....	20
2.2. Понятие о геодезических съёмках.....	22
2.3. Системы координат, применяемые в геодезии .....	23
2.3.1. Проекция гаусса-крюгера эллипсоида на плоскость.....	25
2.3.2. Прямоугольные координаты $x, y$ в проекции Гаусса-Крюгера ...	27
2.3.3. Проекция УТМ .....	28
2.3.4. Системы высот .....	28
2.3.5. Условные системы прямоугольных и полярных координат... ..	28
2.4. Ориентирование линий .....	30
2.4.1. Азимуты и дирекционный угол, связь между ними.....	30
2.4.2. Передача дирекционного угла на стороны геодезических сетей.....	31
2.5. Геодезические задачи на плоскости (преобразование координат). ..	32
2.5.1. Прямая геодезическая задача (преобразование полярных координат в прямоугольные).....	32
2.5.2. Обратная геодезическая задача (преобразование прямоугольных координат в полярные).....	33
2.6. Изображение рельефа на топографических картах и планах.....	33

2.6.1. Основные определения .....	33
2.6.2. Основные формы рельефа, их изображение горизонталями .	36
2.6.3. Цифровые модели местности и рельефа .....	37
<b>3. Математическая обработка геодезических измерений .....</b>	<b>38</b>
3.1. Погрешности измерений, их виды.....	38
3.2. Оценка точности прямых равноточных измерений .....	39
3.3. Оценка точности функций измеренных величин .....	42
3.4. Понятие об уравнивании результатов геодезических измерений... 43	
<b>4. Измерение углов .....</b>	<b>47</b>
4.1. Принцип измерения горизонтального и вертикального угла, классификация теодолитов .....	47
4.2. Основные части геодезических приборов .....	48
4.2.1. Лимбы и алидады .....	48
4.2.2. Отсчетные микроскопы .....	49
4.2.3. Зрительные трубы .....	50
4.2.4. Уровни и компенсаторы .....	51
4.2.5. Прочие части, приспособления, принадлежности .....	53
4.3. Геометрическая схема теодолита .....	54
4.4. Измерение углов .....	55
4.4.1. Измерение горизонтальных углов и направлений.....	55
4.4.2. Вертикальный круг теодолита, измерение углов наклона.....	57
<b>5. Измерение расстояний.....</b>	<b>59</b>
5.1. Непосредственное измерение расстояний .....	59
5.2. Измерение расстояний с помощью оптических дальномеров, нитяный дальномер .....	60
5.2.1. Оптические дальномеры с постоянным базисом.....	61
5.2.2. Оптический дальномер с постоянным углом – нитяный.....	61
5.3. Измерение расстояний с помощью электронных дальномеров .....	62
5.3.1. Виды электронных дальномеров в зависимости от способа измерения времени .....	62
5.3.2. Светодальномеры, их точность, типы .....	63
5.4. Вычисление горизонтальных проложений измеренных линий .....	68
<b>6. Спутниковый метод определения положения точек</b> (геодезическое использование спутниковых навигационных систем) ... 70	
6.1. Принцип работы и устройство спутниковой радионавигационной системы .....	70
6.2. Прямой способ измерения времени .....	74
6.3. Косвенный способ измерения времени (фазовые измерения при работе со спутниковыми системами) .....	76
6.4. Способы определения положения точек (позиционирования).....	79
6.4.1. Абсолютные способы определения положения.....	79
6.4.2. Относительные способы определения положения точек.....	81
6.5. Обработка материалов спутниковых измерений.....	83

<b>7. Нивелирование</b> .....	84
7.1. Геометрическое нивелирование, нивелирный ход.....	84
7.2. Нивелиры и рейки, их типы .....	86
7.2.1. Устройство нивелиров .....	86
7.2.2. Проверка главного условия нивелира .....	88
7.2.3. Нивелирные рейки .....	89
7.3. Основные источники погрешностей геометрического нивелирования, ослабление их влияния.....	90
7.4. Тригонометрическое нивелирование .....	93
<b>8. Геодезические опорные сети</b> .....	96
8.1. Назначение, принцип построения, виды и классификация ГОС, закрепление пунктов ГОС .....	96
8.2. Методы построения плановых ГОС .....	97
8.3. Государственная плановая геодезическая сеть.....	100
8.4. Государственная нивелирная сеть .....	102
8.5. Геодезические сети сгущения .....	103
8.6. Построение геодезических опорных сетей с использованием спутниковых измерений, спутниковое нивелирование .....	104
8.7. Геодезические опорные сети специального назначения .....	105
<b>9. Геодезические съемки местности</b> .....	107
9.1. Виды съемок, выбор масштаба и высоты сечения рельефа .....	107
9.2. Горизонтальная съемка .....	108
9.2.1. Плановая съемочная сеть, теодолитные ходы.....	109
9.2.2. Плановая привязка теодолитных ходов .....	110
9.2.3. Обработка материалов построения плановых съемочных сетей.....	111
9.2.4. Способы съемки ситуации, абрис .....	111
9.2.5. Горизонтальная съемка железнодорожной станции .....	112
9.2.6. Обработка материалов горизонтальной съемки .....	112
9.3. Методы топографической съемки, тахеометрическая съемка.....	113
9.3.1. Приборы для тахеометрической съемки .....	114
9.3.2. Планово-высотная основа тахеометрической съемки.....	115
9.3.3. Съемка ситуации и рельефа .....	116
9.3.4. Обработка материалов тахеометрической съемки .....	117
<b>10. Геодезические работы при трассировании железных дорог</b> .....	118
10.1. Разбивка трассы на местности.....	118
10.2. Железнодорожные закругления .....	120
10.2.1. Виды и назначение железнодорожных кривых.....	120
10.2.2. Расчет и разбивка круговых кривых .....	121
10.2.3. Перенос пикетов с тангенса на кривую, учет домера при разбивке пикетажа.....	123
10.2.4. Расчет и разбивка круговой кривой с двумя переходными кривыми.....	124
10.3. Нивелирование трассы и поперечников .....	126

10.4. Съёмка полосы местности вдоль трассы.....	127
10.5. Камеральная обработка материалов трассирования .....	127
10.6. Элементы проектирования плана и профиля дороги.....	128
<b>11. Геодезические разбивочные работы.....</b>	<b>131</b>
11.1. Задачи геодезических разбивочных работ .....	131
11.2. Геодезическая основа разбивочных работ .....	131
11.3. Подготовка данных для выноса проекта сооружения в натуру...	132
11.4. Горизонтальная разбивка сооружений .....	133
11.5. Детальная разбивка кривых.....	137
11.5.1. Геометрия кривой.....	137
11.5.2. Детальная разбивка кривой способом прямоугольных координат.....	140
11.5.3. Детальная разбивка кривой способом углов .....	140
11.5.4. Детальная разбивка кривой способом продолженных хорд ..	140
11.5.5. Разбивка кривой в закрытой местности, кратные кривые .	141
11.6. Вертикальная разбивка сооружений .....	143
11.6.1. Вынос в натуру заданной проектной отметки.....	143
11.6.2. Вынос в натуру линии с заданным проектным уклоном ....	144
11.6.3. Вынос в натуру проектной плоскости .....	145
11.7. Исполнительные съёмки .....	145
<b>12. Информационная технология, цифровые карты и геоинформационные системы .....</b>	<b>148</b>
<b>Литература .....</b>	<b>152</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие написано для студентов специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» всех специализаций и форм обучения изучающих дисциплину «Инженерная геодезия и геоинформатика». Развитие вычислительной техники и информатики привело к созданию информационных технологий, основанных на цифровом представлении и хранении информации. Получила широкое применение новая цифровая геодезическая техника — электронные тахеометры, электронные нивелиры, приемники спутниковых сигналов. Была принята концепция перехода геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений, поэтому спутниковым методам уделено в пособии особое внимание.

В данном учебном пособии рассмотрены вопросы стандартизации и метрологии, установления фундаментальных геодезических постоянных, создания и введения современных всемирных и референционных систем координат, современного состояния государственных и построения специальных геодезических опорных сетей, современной геодезической техники.

# 1. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

СНиП 11-02-96 определяет инженерные изыскания для строительства как вид строительной деятельности, которая обеспечивает комплексное изучение природных и техногенных условий территории объектов строительства; составление прогнозов взаимодействия этих объектов с окружающей средой; обоснование их инженерной защиты и безопасных условий жизни населения.

Кроме *инженерных*, проводятся *экономические* изыскания, результаты которых позволяют определить эффективность затрат на строительство и показатели работы проектируемого объекта.

На основе материалов инженерных изысканий осуществляется обоснование инвестиций в строительство, разработка предпроектной документации, проектов и рабочей документации строительства сооружений, включая расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, эксплуатацию и ликвидацию объектов, ведение государственных кадастров и информационных систем поселений и предприятий, а также разработка рекомендаций для принятия экономически, технически, социально и экологически обоснованных проектных решений.

Как видим, СНиП 11-02-96 трактует инженерные изыскания исключительно широко.

Виды инженерных изысканий для строительства:

- инженерно-геодезические;
- инженерно-геологические;
- инженерно-гидрометеорологические;
- инженерно-экологические;
- изыскания грунтовых строительных материалов и источников водоснабжения на базе подземных вод.

К инженерным изысканиям для строительства также относятся:

- геотехнический контроль;
- обследование грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений;
- оценка опасности от природных и техноприродных процессов;
- обоснование мероприятий по инженерной защите территорий;
- геодезические, геологические, гидрогеологические, гидрологические, кадастровые и другие сопутствующие работы и исследо-

вания (наблюдения) в процессе строительства, эксплуатации и ликвидации объектов;

– научные исследования в процессе инженерных изысканий для строительства предприятий, зданий и сооружений;

– авторский надзор за использованием изыскательской продукции в процессе строительства.

Исполнители инженерных изысканий должны иметь соответствующие лицензии на их проведение. Они имеют право устанавливать (закладывать) геодезические пункты, отбирать различные пробы, выполнять подготовительные работы: расчистку и планировку площадок, рубку визирок, строительство водостоков, дорог и других временных сооружений.

Средства измерений, применяемые при инженерных изысканиях, подлежат государственному метрологическому контролю и надзору, выполняемому метрологическими службами.

Инженерные изыскания, выполняемые для стадии и «техническое задание», обеспечивают комплексное изучение условий района и составление прогноза возможного изменения этих условий при взаимодействии с объектами строительства. На этой стадии *определяют цели* инвестирования, *составляют ходатайство* (декларацию) о намерениях, *обосновывают инвестиции* в строительство.

Инженерные изыскания, выполняемые для обоснования инвестиций в строительство, обеспечивают получение достаточных данных о вариантах размещения объекта строительства для определения его базовой стоимости и оценки воздействия на окружающую среду.

Инженерные изыскания, выполняемые для стадии и «технический проект», обеспечивают разработку проектных решений по выбранному варианту и получение достаточных данных для составления ситуационного и генерального планов проектируемого объекта.

Инженерные изыскания, выполняемые для стадии и «рабочая документация», обеспечивают получение материалов для: расчетов оснований, фундаментов, конструкций зданий и сооружений; их инженерной защиты; уточнения проектных решений по отдельным вопросам; согласования и утверждения проекта.

Инженерные изыскания обеспечивают получение материалов для: установления соответствия природных условий, заложенных в проекте, фактическим; оценки качества возводимых сооружений; оценки состояния сооружений и систем их инженерной защиты; выполнения специальных геодезических, геологических и других работ и наблюдений; мониторинга окружающей среды; санации и рекультивации территории после ликвидации объекта.

**Изыскательская продукция** передается заказчику в виде технического отчета, содержащего текстовую часть, графическую часть, приложения.

Графическая часть отчета должна содержать карты, планы, разрезы, профили, графики, таблицы, каталоги.

## 1.1. Инженерно-геодезические изыскания

Как видим, все виды инженерных изысканий для строительства базируются на картографическом материале. Поэтому в перечне инженерных изысканий на первом месте стоят инженерно-геодезические изыскания (ИГИ), выполнение которых регламентируется Сводом правил СП 11-104-97 (разд. 9).

Задачами ИГИ являются получение геодезических материалов и данных о ситуации и рельефе местности, существующих зданиях и сооружениях, элементах планировки в цифровой или графической форме, необходимых для комплексной оценки природных и техногенных условий территории строительства и обоснования проектирования строительства и эксплуатации сооружений.

В состав ИГИ входят:

- сбор и обработка материалов изысканий прошлых лет;
- рекогносцировочное обследование территории изысканий;
- создание геодезических опорных сетей 3 и 4 классов, сетей сгущения 1 и 2 разрядов, нивелирной сети II, III и IV классов, а также специальных геодезических сетей для строительства;
- создание съемочных сетей;
- топографическая съемка в масштабах 1:10 000 – 1:200, включая съемку подземных и надземных сооружений;
- перенесение проекта в натуру;
- обновление топографических планов;
- инженерно-гидрографические работы;
- геодезические наблюдения за деформациями оснований зданий и земной поверхности;
- инженерно-геодезическое обеспечение информационных систем поселений и предприятий, государственных кадастров;
- составление и размножение инженерно-топографических планов в цифровой и графической форме;
- камеральная обработка материалов;
- составление технического отчета.

В состав ИГИ для строительства линейных сооружений дополнительно входят:

- камеральное трассирование и выбор конкурентоспособных вариантов трассы для выполнения полевых работ и обследований;
- полевое трассирование;
- съемки существующих железных и автомобильных дорог, составление продольных и поперечных профилей, пересечений линий электропередачи и связи, магистральных трубопроводов;
- координирование основных элементов сооружений и наружные обмеры зданий;
- определение полной и полезной длины железнодорожных путей на станциях и габаритов приближения строений.

### 1.1.1. Геодезическая основа строительства

Геодезической основой при производстве ИГИ на площадках строительства служат пункты: государственных геодезических сетей; опорных геодезических сетей; геодезической разбивочной основы; планово-высотных съемочных сетей.

В обязательных приложениях к СП 11-104-97 приведены:

- требования к построению геодезической основы – приложение Б;
- требования к построению опорных сетей – приложение В;
- требования к производству и обеспечению точности топографических съемок – приложение Г;
- требования к содержанию инженерно-топографических планов – приложение Д.

Плотность опорных и съемочных сетей должна составлять на незастроенной территории на 1 км<sup>2</sup> не менее 4, 12, 16 пунктов для съемок в масштабах 1:5000, 1:2000 и 1:1000 соответственно. Для масштаба съемки 1:500 плотность пунктов устанавливается отдельно в программе изысканий.

Предельная погрешность взаимного планового положения смежных пунктов опорной геодезической сети не должна превышать 5 см.

При производстве изысканий линейных сооружений геодезическая основа создается в виде магистральных ходов, прокладываемых вдоль оси сооружения – трассы. Магистральные ходы должны привязываться в плане и по высоте к пунктам опорных геодезических сетей не реже чем через 30 км.

**Системы координат и высот** для выполнения ИГИ устанавливаются при выдаче разрешения на производство изысканий.

### 1.1.2. Съёмка подземных и надземных сооружений

На инженерно-топографические планы наносят все существующие подземные, наземные и надземные сооружения (коммуникации). Это самая сложная часть работы и выполняется обычно по дополнительно заданию заказчика, если существующие планы коммуникаций, материалы исполнительных и контрольных геодезических съёмок признаны недостаточно полными и точными. Съёмка и обследование подземных и надземных сооружений выполняется методами, применяемыми при горизонтальной и вертикальной съёмке застроенных территорий с учетом специальных требований СНиП 11-02-96. Эта работа включает:

- отыскание сооружений на местности, определение назначения и участков для поиска прокладок с помощью трубокабелеискателей;
- обследование подземных сооружений в колодцах;
- поиск и съёмка подземных сооружений, не имеющих выхода на поверхность;
- плановая и высотная съёмка выходов подземных сооружений на поверхность;
- составление схем и планов сетей подземных сооружений с их техническими характеристиками;
- согласование полноты планов с эксплуатирующими организациями.

Средние погрешности в плановом положении скрытых точек подземных сооружений, определенных с помощью трубокабелеискателей, не должны превышать 0,7 мм в масштабе плана относительно ближайших капитальных зданий и точек съёмочной сети.

Предельные расхождения между значениями глубины заложения подземных сооружений, полученными во время съёмки и по данным полевых контрольных измерений, не должны превышать 15 % глубины заложения.

### 1.1.3. Инженерно-геодезические изыскания для разработки предпроектной документации

Эта стадия ИГИ выполняется преимущественно камеральным способом по имеющимся топографическим картам и планам для решения трех задач:

- определения цели инвестирования;
- составления ходатайства о намерениях;
- обоснования инвестиций в строительство.

Решение третьей из этих задач должно обеспечить топографо-геодезические данные для определения стоимости строительства объекта на площадках, предварительно согласованных с органами власти, и оценки влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду. При этом изыскания ведутся по каждому согласованному варианту.

Полевые работы на этой стадии ИГИ допускаются как исключение и носят характер рекогносцировки, обследования. Съёмки выполняют только на сложных и эталонных участках. На линейных объектах такие изыскания выполняют для новых трасс или для расширения существующих. При этом ширина полосы съёмки должна быть не более 300 м.

#### 1.1.4. Инженерно-геодезические изыскания для разработки проекта

Эта стадия ИГИ должна обеспечить разработку:

– уточненного ситуационного плана предприятия в масштабах 1:25000 – 1:10000;

– проекта инженерной подготовки строительной площадки;

– генерального плана объекта;

– проекта вертикальной планировки объекта;

– проекта инженерной защиты объекта;

– проекта природоохранных мероприятий;

– проекта геодезического обеспечения строительства.

На этой стадии ИГИ выполняются:

– сбор всех имеющихся топографо-геодезических материалов;

– развитие опорной геодезической сети;

– создание съёмочной сети;

– топографические съёмки и обновление имеющихся планов в масштабах 1:5000 – 1:500 с высотой сечения рельефа 1 и 0,5 м;

– инженерно-гидрографические работы;

– составление и размножение инженерно-топографических планов;

– геодезическое обеспечение других видов инженерных изысканий.

При изысканиях линейных сооружений главной частью ИГИ на этой стадии является полевое трассирование – вынос трассы в натуру с прокладкой магистральных ходов по всей длине трассы. Этот вид работы детально описан в главе 10 данного пособия «Геодезические работы при изысканиях железных дорог».

В результате выполнения ИГИ на стадии разработки проекта заказчику передается отчетная документация:

*По площадкам строительства:*

- каталог координат и высот пунктов опорных геодезических сетей;
- инженерно-топографические планы в масштабах 1:500 – 1:2000;
- эскизы колодцев и опор;
- геометрические размеры элементов зданий, сооружений, технологических установок.

*По трассам линейных сооружений:*

- инженерно-топографические планы полосы вдоль трасс и площадок для проектирования станций, мостов, поселков в масштабах 1:500 – 1:2000;
- продольные и поперечные профили проектируемых и существующих дорог.

#### 1.1.5. Инженерно-геодезические изыскания для разработки рабочей документации

Эта стадия ИГИ должна обеспечить получение данных для уточнения и детализации проектных решений. Работы на этой стадии аналогичны работам на стадии разработки проекта, но выполняются для сложных участков в наиболее крупных масштабах.

На реконструируемых объектах определяют координаты углов капитальной застройки, центров стрелочных переводов, колодцев, опор и других точек, составляют обмерные чертежи зданий и технологических установок в масштабах 1:500 – 1:50. При полевом трассировании линейных сооружений выполняют съемку поперечников на каждом пикете и всех плюсовых точках. Ширину полосы съемки ограничивают полосой отвода, а на участках пересечений и сближений – с учетом обеспечения переустройства и переноса существующих коммуникаций.

В результате выполнения ИГИ на стадии рабочей документации заказчику передается технический отчет, содержание которого аналогично указанному в п. 1.1.4. Для реконструируемых объектов дополнительно представляются обмерные чертежи, схемы подземных и надземных сооружений, ведомости координат углов зданий, каталоги колодцев.

### 1.1.6. Инженерно-геодезические изыскания в период строительства, эксплуатации и ликвидации зданий и сооружений

Этот вид строительной деятельности изучается отдельно по программе 100 «Специалист по геодезическим работам на строительной площадке» и в данном пособии рассматривается лишь частично в главе 11 «Геодезические разбивочные работы» в основном применительно к строительству железных дорог.

По СП 11-104-97 эта стадия ИГИ включает выполнение работ:

- создание геодезической разбивочной сети для строительства;
- вынос в натуру основных или главных осей сооружений;
- геодезические разбивочные и привязочные работы в соответствии с рабочей документацией;
- геодезический контроль точности геометрических параметров зданий и сооружений в процессе строительства;
- исполнительные геодезические съемки законченных элементов конструкций, зданий, коммуникаций;
- контрольные геодезические съемки законченных строительством зданий, сооружений, коммуникаций;
- наблюдения за деформациями оснований сооружений, земной поверхности и толщи горных пород;
- геодезические работы при монтаже оборудования, съемке и выверке подкрановых путей, проверке вертикальности колонн и элементов сооружений;
- геодезические работы по определению в натуре подземных сооружений при ремонтах;
- составление исполнительной геодезической документации.

Все геодезические работы на строительной площадке выполняются в строительной системе координат с привязкой ее к местной системе, принятой для данного населенного пункта.

Геодезическую разбивочную основу создают в соответствии с генеральным планом и строительным генпланом сооружения. Точность построения геодезической разбивочной основы устанавливается в соответствии со СНиП 3.01.03-84 «Геодезические работы в строительстве» и соответственными ведомственными нормативными документами.

Геодезические разбивочные работы должны обеспечивать возведение сооружения в точном соответствии с проектом. Точность этих работ принимается в соответствии с указанным ранее СНиП 3.01.03-84 (таблица 2).

В проекте производства работ или (для больших объектов) в проекте производства геодезических работ устанавливается перечень элементов конструкций и частей сооружений, подлежащих контролю геометрических параметров в процессе строительства, приводятся методы и порядок проведения такого контроля.

Исполнительную геодезическую съемку выполняют после окончательной установки и закрепления по проекту элементов конструкций и частей сооружения. *Обязательной исполнительной съемке подлежат все надземные и подземные коммуникации.*

**Погрешность измерений при выполнении геодезического контроля и исполнительных съемок не должна превышать 0,2 величины отклонений, допускаемых проектом, строительными нормами, правилами, стандартами.**

Исполнительная геодезическая документация включает:

- исполнительные схемы по элементам конструкций и частей сооружений;
- исполнительные чертежи по подземным и надземным коммуникациям;
- исполнительные чертежи генерального плана.

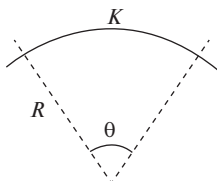
В период ликвидации объектов выполняется топографическая съемка контуров застройки, подлежащей сносу. Высокая точность съемок тут не требуется.

## 1.2. Сводка формул математики, необходимых для изучения инженерной геодезии, основные термины

Рисунки, термины

Формулы

*Горизонтальная плоскость (план)*



$\theta$  – угол поворота,  
 $R$  – радиус круговой кривой,  
 $K$  – длина круговой кривой,

$$\frac{K}{\theta^\circ} = \frac{2\pi R}{360^\circ}, \text{ откуда } K = \frac{\pi R \theta^\circ}{180^\circ} \text{ или}$$

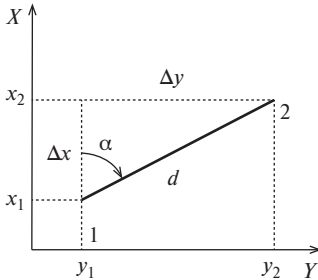
$$\theta = \frac{K}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}; \text{ если } K = R, \text{ то}$$

$$\theta = \frac{180^\circ}{\pi} = \rho^\circ; \rho^\circ = 57,3; \rho' = 3438;$$

$$\rho'' = 206265; \pi = 3,1415926;$$

$\rho$  – радиан (центральный угол, стягиваемый дугой, равной радиусу).

$K = \frac{R \cdot \theta^\circ}{\rho^\circ}$ , если угол дан в градусах;  
 $K = R \cdot \theta$ , если угол дан в радианах.



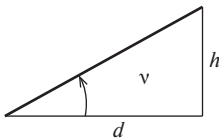
$\Delta x = d \cdot \cos\alpha$ ;  $\Delta y = d \cdot \sin\alpha$ ;

$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ;  $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ;

$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ .

$\alpha$  – дирекционный угол,  
 $\Delta x, \Delta y$  – приращения координат.

*Вертикальная плоскость (профиль)*



$d = D \cdot \cos v = \sqrt{D^2 - h^2}$ ;

$h = D \cdot \sin v = d \cdot \operatorname{tg} v$ ;

$i = \operatorname{tg} v = \frac{h}{d}$ .

$D$  – наклонная длина,  
 $d$  – горизонтальное проложение,  
 $h$  – превышение,  
 $v$  – угол наклона,  
 $i$  – уклон.

### 1.3. Метрология в геодезическом производстве, общие принципы организации геодезических работ

Геодезия как наука об измерениях *базируется на метрологии*. Главная задача метрологии – обеспечение единства и достоверности измерений. Под единством понимают, что результаты измерений

выражены в законных единицах и известны погрешности этих измерений. Единство необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разное время, в разных организациях, разными средствами измерений.

Таблица 1.1

Единицы физических величин, применяемые в геодезии

Физическая величина	Соотношение с единицами СИ	Название	Обозначение	
			русское	Международное
Длина		метр	м	m
Время		секунда	с	s
Плоский угол		радиан	рад	rad
Внесистемные единицы				
Плоский угол	( $\pi/180$ )рад	градус	°	°
	( $\pi/180/60$ )рад	минута	'	'
	( $\pi/180/3600$ )рад	секунда	"	"
	( $\pi/200$ )рад	град (гон)	g	gon
	( $\pi/200/1000$ )рад	миллигон	mg	mgon
1 миллигон = 3,24 <sup>2</sup>				

Геодезия как одна из наук о Земле имеет свои специфические фундаментальные постоянные, отражающие ее направленность. Эти постоянные утверждаются Международной ассоциацией геодезистов (IAG) и периодически уточняются. К ним относятся скорость света в вакууме, экваториальный радиус Земли, ее сжатие, угловая скорость вращения, ускорение силы тяжести на экваторе и некоторые другие:

скорость света в вакууме	$c = 299\,792\,458$ м/с;
экваториальный радиус Земли	$a = 6\,378\,136$ м;
сжатие Земли	$1/f = 1 : 298,257$ .

Выполнение геодезических измерений регламентировано обязательными нормативными документами – инструкциями, наставлениями, правилами (ГКИНП). Метрологическая направленность этих документов определяется установлением норм точности по различным видам работ, методикой выполнения отдельных операций, указанием системы допускового контроля как конечных результатов, так и промежуточных действий. **Бесконтрольные измерения в геодезии не допускаются.**

Инструкции регламентируют индивидуальную ежегодную метрологическую аттестацию всех геодезических приборов, допускаемых к измерениям, через систему поверок и исследований (например,

на методы и средства поверки теодолитов в эксплуатации – ГКИНП-17-195-85).

При изучении геодезических приборов будем рассматривать их поверки и юстировку, при изучении измерений – методику их производства, обеспечивающую компенсацию погрешностей, допуски на промежуточные и окончательные результаты, геометрические схемы, при которых не будут возникать бесконтрольные измерения.

**Общим принципом организации геодезических работ является принцип перехода от общего к частному**, что соответствует принятым в метрологии канонам. Этот принцип – переход от фигур с длинными сторонами и высокой точностью измерений к фигурам с более короткими сторонами и измерениям меньшей точности – применяется в первую очередь при создании геодезической сети, которая является важнейшим носителем метрологической информации в геодезии.

С этой позиции важнейшим вопросом всего курса геодезии является вопрос создания и использования геодезических опорных сетей. В последние годы в этом вопросе произошли большие перемены: геодезическая сеть в виде системы спутников вынесена в космос. Однако метрологической сущности эти перемены не затронули.

Основные термины и определения в геодезии стандартизованы.

## 2. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ПЛОСКОСТИ

### 2.1. Сведения о фигуре и размерах Земли

Под общей фигурой Земли понимают фигуру, ограниченную физической поверхностью Земли.

71 % поверхности Земли занимают океаны и моря, 29 % – суша. Средняя глубина мирового океана 3800 м, средняя высота суши – 850 м. Таким образом, суша – маленький низкий остров в огромном и глубоком океане. Поверхность океана в спокойном состоянии называют средней уровенной поверхностью. Продолжим эту поверхность под материками. **Тело, ограниченное средней уровенной поверхностью, называют геоидом.**

Из-за неравномерности распределения масс в земной коре поверхность геоида волнистая (нерегулярная) и не описывается простыми, точными уравнениями. Однако к поверхности геоида очень близка поверхность эллипсоида вращения с малым полярным сжатием – сфероида. Для обработки результатов геодезических измерений в качестве фигуры Земли используют фигуру эллипсоида вращения, на поверхность которого (поверхность относимости) нормальными переносят точки физической поверхности Земли.

Размеры земного эллипсоида определяли по-разному и принимали разными в разных странах. Эллипсоид заданных размеров, определенным образом ориентированный в теле Земли и принятый в стране для установления системы геодезических координат, называется референц-эллипсоидом, а **система геодезических координат, основанная на таком эллипсоиде, называется референцной системой.**

Эллипсоид вращения получается вращением эллипса вокруг его полярной оси и характеризуется размерами его меридианного эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $a$  и  $b$  – большая (экваториальная) и малая (полярная) полуоси меридианного эллипса (рис. 2.1).

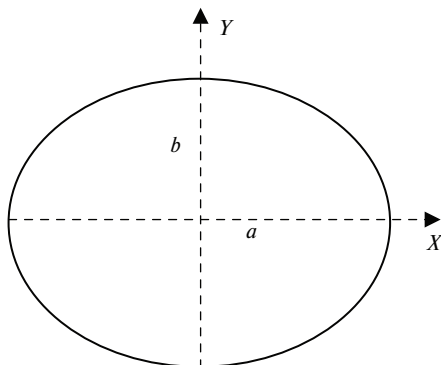


Рис. 2.1

В России и во всех прилегающих к ней странах для обработки геодезических измерений с 1946 г. использовался эллипсоид Ф. Н. Кравцовского с размерами большой полуоси  $a$  и сжатия  $1/f$ :

$$a = 6\,378\,245 \text{ м} \quad \text{и} \quad 1/f = (a - b)/a = 1:298,3.$$

Наблюдения за движением искусственных спутников Земли (ИСЗ) позволили определить размеры общего, наиболее подходящего к геоиду в целом, земного эллипсоида:

$$a = 6\,378\,136 \text{ м} \quad \text{и} \quad 1/f = 1:298,257\,839\,303.$$

Центр его совмещен с центром масс Земли, ось вращения совпадает с направлением на Условный Земной полюс, принятое Международной службой вращения Земли, а плоскость нулевого меридиана параллельна плоскости начального астрономического (Гринвичского) меридиана, как было установлено Международным бюро времени.

Геометрические параметры общего земного эллипсоида приняты равными параметрам урванного эллипсоида вращения, а их поверхности — совпадающими между собой. За урванный эллипсоид принята внешняя поверхность нормальной Земли, масса и угловая скорость вращения которой задаются равными массе и угловой скорости вращения Земли.

Сжатие Земли достаточно мало, разность полуосей всего 20 км. В работах малой точности считают Землю шаром со средним радиусом 6371 км.

Точное положение поверхности геоида относительно поверхности референц-эллипсоида определить нельзя. Для преодоления этого затруднения используют *квазигеоид* – фигуру, положение поверхности которой по отношению к поверхности референц-эллипсоида можно точно вычислить.

Изучение фигуры Земли состоит в определении отступлений поверхности квазигеоида от поверхности принятого эллипсоида вращения. С этой целью на территории страны создана государственная гравиметрическая сеть, на пунктах которой измеряют ускорение силы тяжести.

Основными геодезическими работами: установлением системы геодезических координат и картографированием всей территории страны – занимается специальная государственная организация. В настоящее время это агентство геодезии и картографии министерства транспорта России.

## 2.2. Понятие о геодезических съемках

Съемкой называется комплекс работ, выполняемых с целью получения карт, планов, профилей, а также другой топографической информации о местности и объектах.

Возьмем на поверхности Земли точки  $A$  и  $B$  и перенесем их отвесными линиями на среднюю уровенную поверхность (уровень моря).

Точки  $A_0$  и  $B_0$  называются горизонтальными проекциями точек  $A$  и  $B$  местности (рис. 2.2). **Расстояния по отвесным линиям  $AA_0$  и  $BB_0$  называются их высотами. Численное значение высоты называется отметкой.**

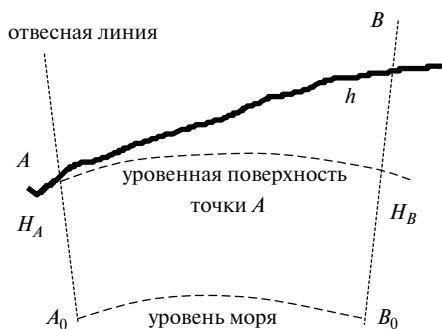


Рис. 2.2

**Задача съемки** состоит в определении горизонтальных проекций и высот точек местности в каких-либо системах координат.

Если определяются только горизонтальные проекции точек, то съемки называются горизонтальными, или контурными, ситуационными.

Если определяются только высоты точек, то съемки называются вертикальными, или нивелированием.

Если определяются и горизонтальные проекции, и высоты точек, то съемки называются топографическими.

**Топографическая карта** – это уменьшенное подробное изображение местности, построенное в картографической проекции и позволяющее определять как плановое, так и высотное положение точек. Государственные топографические карты России издаются в масштабах 1:1 000 000, 1:500 000, 1:300 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000 и 1:10 000. Карты первых четырех из указанных масштабов обычно называются *обзорно-топографическими*. Топографические карты издаются на основе единых общих положений и условных знаков.

**Топографический план** – это уменьшенное изображение на плоскости в ортогональной проекции ограниченного участка местности, в пределах которого кривизна уровенной поверхности не учитывается. Топографические планы издаются в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. Топографические планы обычно составляются с квадратной разграфкой листов. Перечисленные масштабы карт и планов называются масштабным рядом.

**Профилем линии местности** называют развертку этой линии на вертикальную плоскость.

### 2.3. Системы координат, применяемые в геодезии

На поверхности эллипсоида положение точки можно определить по-разному:

- во *всемирной геоцентрической пространственной прямоугольной* системе координат  $X, Y, Z$ ;
- в *общеземной* системе геодезических координат  $B, L$  (широта и долгота) на поверхности эллипсоида;
- в *референционной* системе эллипсоидальных геодезических координат.

Геоцентрическая пространственная система, устанавливаемая по результатам наблюдений за движением искусственных спутников

Земли, является *основой* для установления всех последующих координатных систем.

Международная ассоциация геодезистов рекомендовала для использования во всем мире Всемирную систему геоцентрических (геодезических) координат WGS-84.

Международная служба вращения Земли (IERS) с 1989 г. новейшими методами и средствами формирует сеть пунктов, закрепляющую всемирную систему координат ITRF-94 (IERS Terrestrial Reference Rotation Service), точность положения пунктов в которой не ниже 10 см.

В России принята своя, несколько отличная от WGS-84, геоцентрическая пространственная прямоугольная система ПЗ-90, установленная на основе наблюдения спутников систем ГЕОИК, ТРАНЗИТ, ГЛОНАСС и ЭТАЛОН, гравиметрических измерений на суше и Мировом океане. Носителем этой системы являются 26 пунктов космической геодезической сети на территории бывшего СССР.

Начало системы ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г.) совпадает с центром масс Земли, ось  $Z$  направлена к Условному земному полюсу (среднему полюсу), как определено рекомендациями Международной службы вращения Земли, ось  $X$  — в точку пересечения плоскости экватора и нулевого меридиана (начало счета долгот), установленного Международным бюро времени, ось  $Y$  дополняет систему до правой. Параметры связи систем ПЗ-90 и WGS-84 известны достаточно точно.

В *общеземной системе* геодезических координат используется общий земной эллипсоид, центр и оси которого совпадают с началом и осями геоцентрической прямоугольной системы (см. п. 2.1).

В *референциальных эллипсоидальных системах* используются эллипсоиды с разными параметрами, по-разному ориентированные в теле Земли и давно использующиеся для обработки геодезических измерений в разных странах. У нас в стране это системы координат СК-32 и СК-42, в США и Канаде NAD-27 и NAD-83.

В СССР в референционной системе 1942 года (СК-42) использован эллипсоид Ф.Н. Красовского, ориентирование которого было выполнено по астрономическим и гравиметрическим данным в Пулкове. Однако эта система перестала отвечать современному состоянию техники и требованиям к точности определения положения пунктов.

С 1 июля 2002 г. в России введена новая референционная система координат СК-95, полученная в результате совместной обработки материалов геодезических и спутниковых измерений на территории бывшего СССР, накопленных к 1995 году.

В качестве отсчетного (поверхности относимости) сохранен эллипсоид Красовского, но ориентирование его выполнено по-другому. Оси референцной системы СК–95 параллельны осям общеземной системы координат. Для уменьшения расхождений с системой СК–42 положение начала системы СК–95 задано так, что значения пространственных геоцентрических координат пункта Пулково в обеих системах совпадают. Параметры перехода от общеземной системы к референцной системе СК–95 и от системы СК–42 к системе СК–95 задаются действующими Основными положениями о Государственной геодезической сети России. Носителем референцной системы координат является государственная геодезическая сеть.

Система СК–95 по сравнению с СК–42 обладает на порядок большей точностью абсолютного положения пунктов.

Для получения отдельных листов карт и планов поверхность эллипсоида изображают на плоскости – разворачивают, используя различные математические законы – картографические проекции. Для практического использования пространственные прямоугольные и эллипсоидальные геодезические координаты перевычисляются в плоские прямоугольные.

В инженерных работах на малых площадях пользуются местными (или условными) системами координат.

### 2.3.1. Проекция Гаусса-Крюгера эллипсоида на плоскость

Без искажений (разрывов, складок) развернуть выпуклую поверхность эллипсоида в плоскость нельзя. Это разворачивание производится проецированием поверхности эллипсоида на плоскость по определенным математическим законам – картографическим проекциям, устанавливающим связь между координатами точки на поверхности эллипсоида и координатами изображения этой точки на плоскости:  $x = f_1(B, L)$ ,  $y = f_2(B, L)$ .

Для уменьшения размеров искажения углов и линий во всех картографических проекциях используют деление поверхности эллипсоида на отдельные участки – зоны.

Для создания точных топографических карт в большинстве стран используют поперечно-цилиндрическую проекцию Меркатора (Transverse Mercator) с делением поверхности эллипсоида на шестиградусные зоны. Границами зон служат меридианы. Зоны нумеруют с запада на восток, начиная с начального (Гринвичского) меридиана (рис. 2.3). Например, первая зона простирается от меридиана  $0^\circ$  до меридиана  $6^\circ$ ,

ее центральный (средний) меридиан имеет долготу  $3^\circ$ . Таким образом, для данной долготы  $L$

$$N = (\text{целая часть от } L:6^\circ) + 1; \quad L_0 = 6N - 3^\circ,$$

где  $N$  – номер зоны,  $L_0$  – долгота среднего меридиана.

В России по предложению проф. Н. Г. Келля с 1928 г. используется разновидность проекции Меркатора – проекция Гаусса-Крюгера.

Сущность проекции Гаусса состоит в следующем:

1. В пределах каждой зоны поверхность эллипсоида переносится на плоскость отдельно и так, что углы между направлениями на эллипсоиде сохраняют свое значение на плоскости. Это приводит к сохранению на плоскости формы малых фигур. Поэтому такая проекция называется конформной или равноугольной. В силу этого свойства углы между отрезками параллелей и меридианов, составляющих рамку карты, сохраняют на плоскости свое значение  $90^\circ$ .

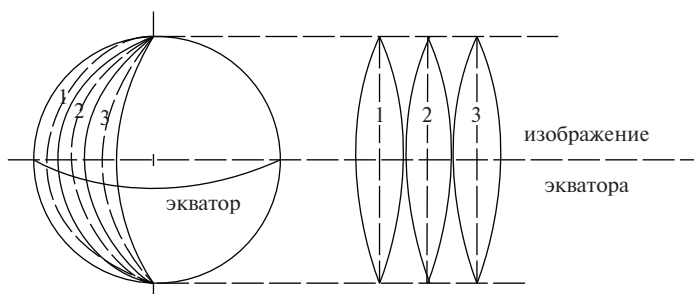


Рис. 2.3

2. Только средний меридиан каждой зоны и экватор изображаются на плоскости прямыми взаимно перпендикулярными линиями. В силу этого свойства проекции Гаусса рамки топографической карты изобразятся на плоскости кривыми линиями.

3. Масштаб вдоль среднего меридиана равен 1, т. е. его длина передается на плоскости проекции без искажений. Все остальные линии, в том числе все меридианы и все параллели, растягиваются. Растяжение тем больше, чем дальше расположена линия от среднего меридиана. Масштаб, подписанный на карте, выдерживается только на осевом меридиане. На краю шестиградусных зон искажения линий достигают 1:1500, на краю трехградусных зон – 1:6000.

### 2.3.2. Прямоугольные координаты $x, y$ в проекции Гаусса-Крюгера

Так как средний меридиан и экватор в каждой зоне изображаются взаимно перпендикулярными прямыми, то их и принимают в качестве координатных осей. Ось  $X$  совмещают с изображением среднего (осевого) меридиана, а ось  $Y$  – с изображением экватора. Это связано с отсчётом углов ориентирования в навигации от меридиана, а в математике – от оси  $X$ .

Начало системы координат в зоне помещают в точку пересечения осевого меридиана с экватором (рис. 2.4). В каждой зоне система координат своя. Чтобы их различать, перед ординатой ставят номер зоны.

На картах осевому меридиану присваивают ординату  $y_0 = 500$  км, а не ноль. Тогда в зоне не будет точек с отрицательными ординатами. Запись  $x_A = 6\,385\,200$  м,  $y_A = 11\,420\,800$  м означает: точка  $A$  находится в 11-й шестиградусной координатной зоне на расстоянии 6 385 200 м к северу от экватора и на расстоянии  $y' = 420\,800 - 500\,000 = 79\,200$  м к западу от осевого меридиана 11-й зоны.

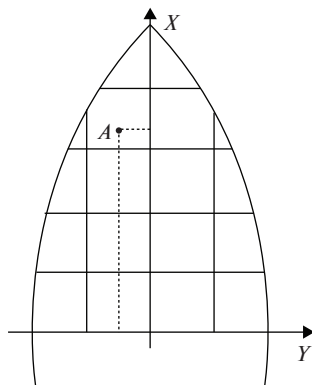


Рис. 2.4

Для создания топографических планов применяют трехградусные зоны и используют обычную систему записи ординат, т. е. ординату осевого меридиана принимают равной нулю.

### 2.3.3. Проекция UTM

В США и многих странах применяется другая разновидность проекции Меркатора – проекция UTM (Universal Transverse Mercator). Единственное отличие этой проекции от проекции Гаусса-Крюгера: масштаб равен единице вдоль двух *секущих* линий, отстоящих от среднего меридиана в обе стороны на 180 км. Так как искажения линий в проекции пропорциональны квадрату удаления от линии с масштабом 1, то искажения в проекции UTM примерно в 4 раза меньше, чем в проекции Гаусса-Крюгера. Но эти искажения имеют разные знаки: от секущей с масштабом 1 к середине зоны длины линий на плоскости уменьшаются, а к краям зоны увеличиваются.

### 2.3.4. Системы высот

В России в качестве основной принята *нормальная система высот*. В этой системе вычислены отметки пунктов государственной высотной опорной сети. Нормальные высоты отсчитываются от поверхности *квазигеоида*.

Поверхность квазигеоида в океанах совпадает с поверхностью геоида. Наблюдения за колебанием уровня моря выполняются на уровнемерных постах – *футштоках*. В России высоты считают от среднего многолетнего уровня Балтийского моря, зафиксированного нулем Кронштадтского футштока. Эта система называется Балтийской системой высот.

В практической деятельности высоты в Балтийской системе вычисляют по полученным из нивелирования превышениям и отметкам реперов – пунктов высотных (нивелирных) опорных сетей.

В системе геодезических координат третьей координатой точки является ее высота  $H$  над поверхностью земного эллипсоида – *геодезическая высота*, отсчитываемая по нормали к поверхности эллипсоида. Эти высоты получают из спутниковых измерений.

Системы, в которых высоты отсчитывают от произвольного уровня, называются относительными. Например, на строительной площадке высоты считают от уровня «чистого пола» – уровня пола первого этажа или головки рельсового пути, входящего в промышленное здание.

### 2.3.5. Условные системы прямоугольных и полярных координат

В инженерных работах на малых площадях пользуются условными системами координат. Начало такой системы помещают в произ-

вольной удобной точке, а ось  $X$  совмещают с каким-нибудь основным направлением на участке работ. На железнодорожной станции такая система координат обычно называется *станционной*. При съемках и разбивочных работах пользуются полярными координатами: плоскими и пространственными.

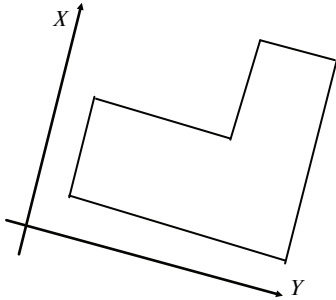


Рис. 2.5

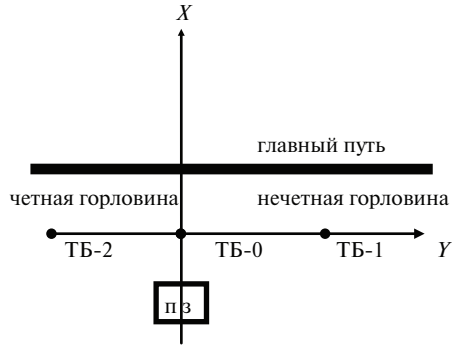


Рис. 2.6



Рис. 2.7

Рис. 2.8

На строительной площадке начало системы прямоугольных координат выносят за юго-западный угол участка, а ось  $X$  выбирают параллельно одной из строительных осей. Удобство такой системы в том, что все координаты на участке (рис. 2.5) будут положительными.

При съемках железнодорожных станций в качестве оси  $X$  принимают ось пассажирского здания (ПЗ), а ось  $Y$  выбирают параллельно оси главного пути (рис. 2.6) и закрепляют ее не менее чем тремя постоянными точками в твердом покрытии посадочной платформы или в междупутье. Одна из этих точек (ТБ-0) закрепляет начало системы. **Закрепленные таким образом линии называются базисами.**

В полярной системе координат полюс обычно выбирают в точке с известными прямоугольными координатами, полярную ось  $OP$  направляют на другую точку с известными координатами. Положение точки  $A$  определяется двумя углами: горизонтальным  $\alpha$  и вертикальным  $\nu$  — и наклонным расстоянием  $D$ . Для измерения  $\alpha$  и  $\nu$  используют прибор теодолит, линию  $D$  измеряют лентами, рулетками, дальномерами.

При обработке результатов геодезических измерений постоянно преобразуют координаты: полярные в прямоугольные и обратно.

## 2.4. Ориентирование линий

### 2.4.1. Азимуты и дирекционный угол, связь между ними

Ориентировать линию — значит определить ее направление относительно другой линии, принятой за исходную (начальную). **Угол ориентирования (или направление) называется азимутом.** Азимуты отсчитываются от северной (положительной) части исходной линии по часовой стрелке. Азимут — величина положительная, принимающая значения от 0 до 360°.

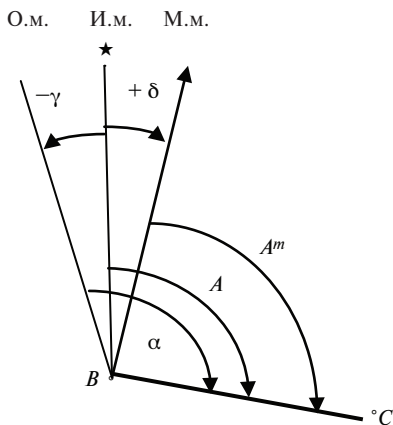


Рис. 2.9

И.м. — истинный меридиан  
О.м. — осевой меридиан зоны (ось  $X$ )

М.м. — магнитный меридиан  
 $\gamma$  — сближение меридианов на плоскости (восточное — положительное, западное — отрицательное)

$\delta$  — магнитное склонение (восточное — положительное, западное — отрицательное)

В геодезии в качестве начальной линии обычно используют истинный меридиан, магнитный меридиан, ось  $X$ . Углы ориентирования, отсчитываемые от этих линий, называются соответственно истинным азимутом  $A$ , магнитным азимутом  $A^m$ , дирекционным углом  $\alpha$ .

Покажем в данной точке на карте три меридиана (рис. 2.9).

Связь между углами ориентирования устанавливается формулами

$$\alpha = A - \gamma, \quad A^m = \alpha + \gamma - \delta.$$

Истинные азимуты используют при вычислении геодезических эллипсоидальных координат — *широты и долготы*. Истинный азимут можно измерить с помощью гиротеодолита или астрономическими методами.

При ориентировании в закрытой местности используют магнитные азимуты. Магнитный азимут можно измерить с помощью буссоли (компаса).

На плоскости проекции используют дирекционные углы. **Дирекционный угол измерить с достаточной точностью нельзя — его можно только вычислить.**

#### 2.4.2. Передача дирекционного угла на стороны геодезических сетей

Дирекционные углы вычисляют по исходному дирекционному углу и горизонтальным углам между линиями геодезических построений. Горизонтальные углы измеряют специальным прибором — теодолитом.

На рис. 2.10 показан теодолитный ход — геодезическая сеть, в которой измерены все линии и все углы между смежными линиями.

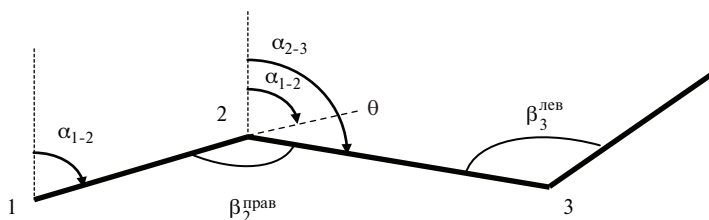


Рис. 2.10

Пусть в этом ходе задан дирекционный угол линии 1–2 ( $\alpha_{1-2}$ ). Тогда  $\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} + \theta = \alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2^{\text{прав}}$ .

Так как  $\beta^{\text{прав}} = 360^\circ - \beta^{\text{лев}}$ , то  $\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} - 180^\circ + \beta_2^{\text{лев}}$ .

Общая формула  $\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} \pm 180^\circ \pm \beta_{\text{прав}}^{\text{лев}}$ . (2.1)

Формула (2.1) *передачи дирекционного угла* – одна из основных формул геодезии. Угол  $\theta$  называется углом поворота.

## 2.5. Геодезические задачи на плоскости (преобразование координат)

Вычисление на плоскости прямоугольных координат, исходных дирекционных углов и длин сторон выполняется с помощью формул преобразования координатных систем.

### 2.5.1. Прямая геодезическая задача (преобразование полярных координат в прямоугольные)

Так в геодезии называется определение координат конечной точки линии по ее длине, направлению и координатам начальной точки (рис. 2.11).

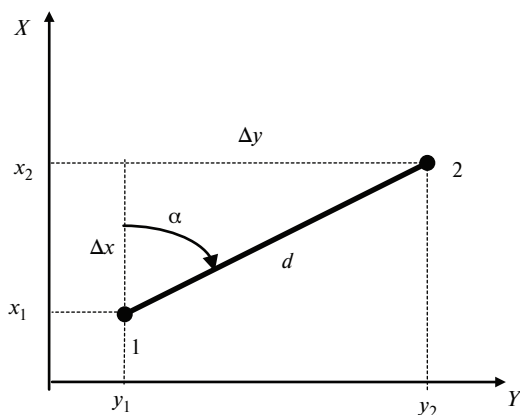


Рис. 2.11

Формулы прямой геодезической задачи используются наиболее часто при вычислении координат пунктов геодезических опорных сетей всех уровней точности. Длины линий измеряют, а дирекционные углы вычисляют по формуле (2.1) передачи дирекционного угла.

Дано:  $x_1, y_1, \alpha, d$ .

Найти:  $x_2, y_2$ .

Решение:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + \Delta x, \\y_2 &= y_1 + \Delta y, \\ \Delta x &= d \times \cos \alpha, \\ \Delta y &= d \times \sin \alpha.\end{aligned}$$

## 2.5.2. Обратная геодезическая задача (преобразование прямоугольных координат в полярные)

Так в геодезии называется определение длины и направления линии по заданным координатам ее начальной и конечной точек (рис. 2.11).

Дано:  $x_1, y_1, x_2, y_2$ .

Найти:  $\alpha, d$ .

Решение:  $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y}{\Delta x}; \quad d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2};$

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1.$$

Формулы обратной геодезической задачи используют при вычислении геодезической привязки, при подготовке данных для переноса проекта сооружения в натуру и других работах.

## 2.6. Изображение рельефа на топографических картах и планах

### 2.6.1. Основные определения

**Рельеф** — это совокупность неровностей земной поверхности. Современный рельеф сложился в результате горообразования и действия текучих вод. Рельеф и гидрография составляют основное содержание топографической карты с точки зрения инженера-путейца, так как именно эти два элемента местности определяют стоимость

строительства и содержания железной дороги. Основная задача при трассировании железной дороги – выбор попутных благоприятных форм рельефа.

На топографических картах и планах *рельеф изображается совокупностью условных знаков*: горизонталями, бергштрихами, отметками точек и специальными условными знаками для показа крутых склонов. Для изображения рельефа используют коричневый цвет.

**Горизонталь** – линия, соединяющая точки с одинаковыми высотами. Горизонтали – плавные, замкнутые, непересекающиеся линии, получающиеся как след от сечения местности уровнями поверхностями, проведенными через равные интервалы. Этот интервал, т. е. расстояние  $h_0$  между смежными уровнями поверхностями, считаемое по отвесной линии, называется высотой сечения рельефа (или сечением рельефа). Высота сечения зависит от характера местности, масштаба, назначения карты и в среднем определяется по формуле  $h_0 = 0,2 \cdot M$ , где  $M$  – знаменатель масштаба. Высота сечения подписывается на каждом листе топографической карты (плана) ниже масштаба. На планах применяют высоты сечения рельефа 0.5 м, 1 м, 2 м и 5 м; на топографических картах 2.5 м, 5 м, 10 м, 20 м и 40 м.

Виды горизонталей:

– основные; их проводят через превышения, равные высоте сечения;

– основные утолщенные; их применяют для облегчения счета горизонталей и большей наглядности рисунка рельефа; утолщается каждая пятая горизонталь при высоте сечения 1; 2; 5; 10; 20 м и каждая четвертая или десятая при высоте сечения 0.5 и 2.5 м;

– дополнительные (полугоризонтали); их проводят через половину высоты сечения;

– вспомогательные; их проводят на произвольной высоте.

Дополнительные и вспомогательные горизонтали показывают пунктиром. Толщина основных, дополнительных и вспомогательных горизонталей на планах принята равной 0.15 мм, утолщенных – 0.25 мм.

На картах и планах надписывают отметки точек местности, горизонтали (в их разрыве), относительные высоты отдельных форм рельефа. Надписи горизонталей ориентируют основанием цифр вниз по скату. Надписываться может любая горизонталь. Обычно надписывают утолщенные горизонтали.

Направление ската показывают с помощью бергштрихов (длиной 0.5 мм), которые ставят в характерных местах рельефа перпендикулярно горизонталям и ориентируют по скату.

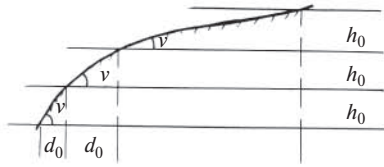


Рис. 2.12

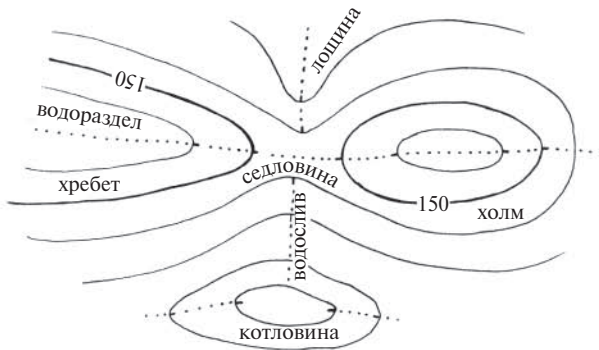


Рис. 2.13

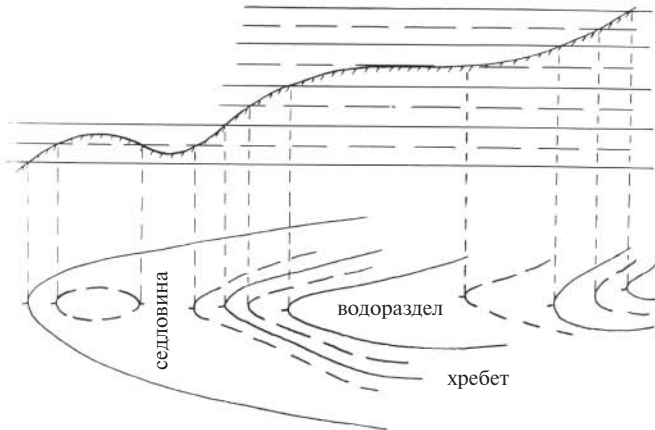


Рис. 2.14

На каждом квадратном дециметре плана подписывают не менее 5 отметок с включением наиболее характерных точек данной территории.

Расстояние между смежными горизонталями в плане называется заложением  $d_o$ . Угол наклона ската  $\nu$  называется крутизной ската. Очевидно, чем круче скат, тем меньше заложение. Связь между элементами ската устанавливается по рис. 2.12.

Уклон численно равен тангенсу угла наклона ската:

$$i = \operatorname{tg} \nu = h_o / d_o .$$

Железнодорожники уклон выражают в тысячных долях единицы — промилле (‰). Например,  $h_o = 1$  м,  $d_o = 100$  м,  $i = 0.010 = 10‰$ .

По топографическим картам можно определять уклоны и крутизну ската, проводить линии с заданным уклоном, строить профили по заданным направлениям, определять водосборные площади и т.д.

### 2.6.2. Основные формы рельефа, их изображение горизонталями

Всё многообразие форм рельефа можно свести к четырём основным и пятой производной: холм, котловина, хребет, лощина, седловина (рис. 2.13).

*Холм* — замкнутая *выпуклая* форма рельефа.

*Котловина* — замкнутая *вогнутая* форма рельефа.

*Хребет* — вытянутая в одном направлении возвышенность.

*Лощина* — вытянутое в одном направлении понижение.

Пятая форма рельефа — *седловина* — это понижение между двумя возвышенностями, где сходятся два хребта и две лощины. Рисунок седловины обязательно включает четыре горизонтали. Бергштрихи на горизонталях хребтов направлены навстречу друг другу, на горизонталях лощин — в противоположные стороны.

Линия пересечения склонов хребта называется *водоразделом*. Линия пересечения склонов лощины называется *водосливом* (тальвегом). Водораздел и водослив — это две основные (структурные) линии рельефа.

Следует помнить, что линии водораздела и водослива проходят по местам наибольшего изгиба горизонталей и что на изображениях хребтов горизонтали имеют изгиб от вершины, а на изображениях лощин — к вершине.

Определять направление ската, проводить водораздельные и водосливные линии — основные задачи при чтении рельефа на карте.

Для показа характерных деталей рельефа, не изображающихся основными горизонталями, а также изменений в крутизне склонов,

используют дополнительные горизонтали (рис. 2.14). Дополнительные горизонтали обязательно проводят на участках, где расстояние между основными горизонталями превышает 2,5 см на плане.

Средние погрешности положения горизонталей не должны превышать  $1/4$  высоты сечения при углах наклона до 2 градусов и  $1/3$  при углах наклона от 2 до 6 градусов.

### 2.6.3. Цифровые модели местности и рельефа

Топографические карты и планы могут быть представлены в графическом и цифровом виде. Графическая (бумажная) карта более привычна. На такой карте информация о местности представлена в образно-знаковой форме. Цифровая карта, или цифровая модель местности (ЦММ), – это запись картографической информации о местности в цифровом виде на машинных носителях. ЦММ представляет собой отображение в виде пространственных координат множества точек земной поверхности, объединённых в единую систему по определённым математическим законам. Цифровая карта по содержанию полностью аналогична графической карте. Точность ЦММ отвечает точности топографических карт и планов соответствующих масштабов.

Цифровая карта (ЦММ) может быть выведена на экран монитора в виде *электронной карты*. ЦММ позволяют автоматизировать составление топографических карт и планов в разных масштабах, их обновление, тиражирование, выполнение проектирования и инженерных расчётов. Для этой цели разработано много программных комплексов (Кредо и др.).

Частью цифровой модели местности является цифровая модель рельефа (ЦМР). При съёмке местности точки выбирают на перегибах *структурных* линий рельефа и в местах изменения крутизны склонов. Получаемая таким образом ЦМР называется *структурной*.

По ЦМР можно провести горизонтали, т. е. преобразовать цифровую форму изображения рельефа в аналоговую. При проведении горизонталей по ЦМР с помощью ЭВМ точки с известными отметками по специальным программам располагаются в вершинах треугольников.

С помощью специальных устройств (сканеров, дигитайзеров) возможно обратное преобразование – аналоговой формы изображения рельефа в цифровую.

Цифровые модели местности и рельефа служат основой для составления геоинформационных систем (ГИС) – см. гл. 12.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Все измерения подвергаются математической обработке с целью определения точности и наиболее вероятного значения измеренных величин.

#### 3.1. Погрешности измерений, их виды

Погрешность измерения  $\Delta$  – это отклонение результата измерений  $l$  от истинного (действительного) значения измеряемой величины  $X$ :

$$\Delta_i = l_i - X. \quad (3.1)$$

Такая погрешность называется абсолютной, она выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина. Часто в геодезических работах пользуются относительными погрешностями  $\Delta/l$ , которые выражаются дробью с числителем, равным 1. Например, погрешность измерения линии 5 см на 100 м можно записать в относительной мере как 1:2000. Точность измерения углов характеризуется абсолютными погрешностями, точность измерения линий выражается как в абсолютной, так и в относительной мере.

По характеру действия различают погрешности грубые, систематические, случайные.

Грубые погрешности (промахи) – это брак в работе. По модулю они значительно превышают допуски. Устраняют такие погрешности повторными измерениями, заменой неисправных приборов.

Систематические – это односторонние погрешности, проявляющиеся в результатах измерений постоянной величиной и (или) знаком. В сумме измерений такие погрешности быстро накапливаются. Систематическими являются, например, погрешности измерения линий лентой: неточное уложение ленты в створе измеряемой линии, влияние неровности местности, отличие длины ленты от номинала и т. п. Систематические погрешности необходимо устранить из результатов измерений одним из трех способов:

– юстировкой (исправлением) приборов (например, юстировкой уровня теодолита для получения горизонтальной проекции измеряемого угла);

– использованием правильной методики измерений (например, измерением горизонтального угла при двух положениях вертикального круга для исключения влияния коллимационной погрешности трубы теодолита, нивелированием из середины для исключения влияния негоризонтальности визирного луча, кривизны Земли и ослабления влияния рефракции);

– введением поправок в результаты измерений (например, определением места нуля при измерении вертикальных углов теодолитом, поправки за компарирование ленты, постоянной поправки светодальномера и т. д.).

После устранения грубых и систематических погрешностей в результатах измерений остаются случайные погрешности. Они изменяются при повторных измерениях случайным образом, поэтому нельзя заранее предсказать их знак и величину, нельзя полностью устранить их. При достаточно большом числе измерений эти погрешности обладают свойствами, знание которых позволяет оценить качество измерений и вычислить наиболее вероятное значение измеряемой величины. Перечислим их:

– случайные погрешности по модулю не превышают определенного предела;

– малые по модулю случайные погрешности встречаются чаще крупных;

– появление равных по величине положительных и отрицательных случайных погрешностей равновероятно.

Из последнего свойства следует, что при возрастании числа измерений сумма случайных погрешностей будет близка к нулю и, следовательно, наиболее вероятным значением измеряемой величины будет среднее арифметическое из результатов измерений.

График, отражающий свойства случайных погрешностей, известен под названием «колокол Гаусса» или «кривая нормального распределения».

### 3.2. Оценка точности прямых равноточных измерений

Непосредственное сравнение измеряемой величины с единицей меры называется прямым измерением. Так измеряют линию рулеткой,

угол теодолитом. Равноточными называют измерения, выполненные одинаково надежно, т. е. одинаковыми по точности приборами, одинаковыми по квалификации исполнителями, при одинаковых внешних условиях. Степень доверия к результату измерения называется весом. Таким образом, равноточные измерения — это измерения с одинаковым весом, неравноточные — измерения с неравными весами. Обработка неравноточных измерений в данном пособии не рассматривается.

Для оценки точности измерений пользуются двумя показателями: средней квадратической и предельной погрешностями.

Мерой точности измерений служит дисперсия  $D(x)$ , т. е. рассеивание результатов. Это квадратичная величина:

$$D(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum \Delta^2}{n}$$

Корень квадратный из дисперсии называется стандартом  $s$  (сигма), или стандартным отклонением:

$$\sigma = \sqrt{D(x)}.$$

Стандартное отклонение — это норматив, задаваемый в инструкциях. В практической деятельности число измерений  $n$  всегда ограничено. Поэтому для оценки точности отдельного измерения из ряда, содержащего  $n$  прямых равноточных измерений, пользуются приближением стандарта — средней квадратической погрешностью  $m$ .

В метрологии среднюю квадратическую погрешность (СКП) называют средним квадратическим отклонением и вычисляют по формуле Гаусса

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta$  — определяют по формуле (3.1).

Если истинное значение  $X$  измеряемой величины / неизвестно, то вместо него используют среднее арифметическое как наиболее вероятное значение измеряемой величины, а СКП вычисляют по формуле Бесселя

$$m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}, \quad (3.3)$$

где  $v$  – отклонение результата измерения  $l$  от среднего арифметического:

$$v_i = l_i - \bar{l}, \quad (3.4)$$

$$\bar{l} = \frac{\sum l}{n}. \quad (3.5)$$

Среднюю квадратическую погрешность среднего арифметического находят по формуле

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}}. \quad (3.6)$$

На всех инженерных калькуляторах есть клавиши с надписями  $\sum x$ ,  $n$  для вычисления среднего арифметического по формуле (3.5), клавиша  $\sum x^2$  для нахождения числителя в формулах (3.2) и (3.3), клавиши  $\sigma_n$  и  $\sigma_{n-1}$  для вычисления СКП по формулам (3.2), (3.3).

Вторым показателем точности измерений служит предельная погрешность  $\Delta_{\text{пред}}$ . Предельную погрешность находят по формуле

$$\Delta_{\text{пред}} = t \cdot m. \quad (3.7)$$

68 % всех случайных погрешностей не превышают значение средней квадратической погрешности  $m$ , 95,5 % не превышают  $2m$ , а 99,7 % укладываются в  $3m$ . Поэтому в геодезических измерениях нормированный коэффициент (коэффициент допуска)  $t$  принимают равным 2, 2,5 или 3 в зависимости от вида и назначения работ. В Строительных нормах и правилах (СНиП), Инструкциях и Наставлениях величина  $\Delta_{\text{пред}}$  называется допуском.

Погрешности, превышающие допуск, считают грубыми, и измерения с такими погрешностями бракуют.

Зная допуск, можно по формуле  $m = \Delta_{\text{пред}} / t$  предвычислить СКП, подобрать нужные приборы и методику измерений, которые дадут возможность обеспечить заданную точность.

Значение СКП указывается в обозначении марки (шифре) прибора. Например, шифр Т30 означает теодолит, с помощью которого можно измерить угол со средней квадратической погрешностью, не превышающей 30", а шифр Н-5 означает нивелир, с помощью которого можно измерить превышение со средней квадратической погрешностью, не превышающей 5 мм на один километр двойного хода.

### 3.3. Оценка точности функций измеренных величин

По результатам геодезических измерений находят дирекционные углы, координаты отметки и другие функции измеренных величин. Квадрат средней квадратической погрешности функции  $F$  непосредственно измеренных величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  можно вычислить по формуле

$$m_F^2 = \left( \frac{\partial F}{\partial x_1} m_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial x_2} m_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial F}{\partial x_n} m_{x_n} \right)^2, \quad (3.8)$$

где  $\partial F / \partial x_i$  — частные производные функции;  $m_{x_i}$  — частные погрешности.

Последовательность действий при вычислении средней квадратической погрешности функции:

- устанавливают вид функции  $F$ ;
- находят частные производные;
- находят значения частных погрешностей;
- подставляют найденные значения в формулу (3.8).

Сложные функции сначала логарифмируют, а затем дифференцируют.

Предельную погрешность функции находят по формуле

$$\Delta_{\text{пред}} = t \cdot m_F. \quad (3.9)$$

**Пример.** Вычислить среднюю квадратическую и предельную погрешности суммы углов замкнутого  $n$ -угольника, углы в котором измерены равномерно со средней квадратической погрешностью  $30''$ . Принять  $t = 2$ .

Решение:

- вид функции  $F = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n = \sum \beta$ ;
- все частные производные равны 1;
- частные погрешности  $m_{\beta_1} = m_{\beta_2} = \dots = m_{\beta_n} = m_{\beta} = 30''$ ;
- средняя квадратическая погрешность функции

$$m_F = m_{\beta} \sqrt{n} = 30'' \sqrt{n};$$

- предельная погрешность функции  $\Delta_{\text{пред}} = t \cdot m_{\beta} \sqrt{n} = 1' \sqrt{n}$ . (3.10)

### 3.4. Понятие об уравнивании результатов геодезических измерений

Уравниванием называется специальная совместная математическая обработка измерений, при которой выполняют контроль и оценку их качества, находят наиболее вероятные значения измеренных величин (углов, линий) и их функций (дирекционных углов линий, координат точек).

Чтобы получить возможность уравнивания, геодезические измерения организуют по специальным замкнутым схемам, в которых выполняются избыточные измерения. В таких схемах возникают геометрические условия, которые могут быть записаны в виде условных уравнений. Число условных уравнений равно числу избыточных измерений.

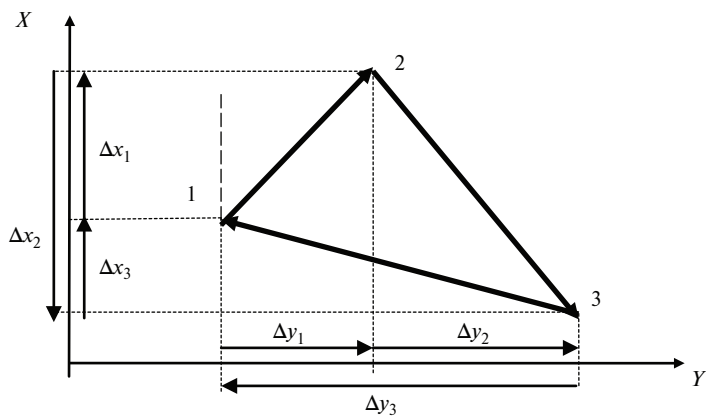


Рис. 3.1

На рис. 3.1 показан замкнутый теодолитный ход, в котором измерены все углы (правые) и все стороны, заданы координаты  $x_1, y_1$  первой точки и дирекционный угол  $\alpha$  первой стороны. Требуется оценить качество измерений, найти наиболее вероятные значения измеренных углов и сторон, вычисленных дирекционных углов и координат вершин хода.

Очевидное решение:

1) по формулам прямой геодезической задачи найти

$$x_2 = x_1 + d_{1-2} \cos \alpha_{1-2}; \quad y_2 = y_1 + d_{1-2} \sin \alpha_{1-2};$$

2) по формуле передачи дирекционного угла найти

$$\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} \pm 180^\circ - \beta_2;$$

3) по формулам прямой геодезической задачи найти

$$x_3 = x_2 + d_{2-3} \cos \alpha_{2-3}; \quad y_3 = y_2 + d_{2-3} \sin \alpha_{2-3}$$

— не является уравниванием, так как не выполнена оценка точности измерений, и найденные значения координат точек не являются наиболее вероятными. При таком решении использованы только необходимые углы и линии. Углы на точках 1 и 3 и линия 3–1 оказались лишними — избыточными. При уравнивании используют все измерения, в том числе и избыточные.

В схеме на рис. 3.1 при любом количестве вершин выполняется *три избыточных измерения*: углы на первой и последней точках и последняя сторона, что приводит к появлению трех геометрических условий:

$$\sum \beta_{\text{теор}} - 180^\circ(n - 2) = 0;$$

$$\sum \Delta x_{\text{теор}} = 0;$$

$$\sum \Delta y_{\text{теор}} = 0.$$

Индексы в уравнениях означают теоретические (безошибочные) значения углов и приращений координат.

Если в эти уравнения подставить результаты измерений, то в их правых частях появятся отличия от нуля — невязки  $f$ :

$$\sum \beta_{\text{измер}} - 180^\circ(n - 2) = f_\beta;$$

$$\sum \Delta x_{\text{измер}} = f_x;$$

$$\sum \Delta y_{\text{измер}} = f_y.$$

Контроль и оценку качества измерений выполняют по невязкам сравнением полученных значений с допустимыми:

$$f \leq \text{доп} f.$$

Допустимые значения невязок определяют по формуле (3.9)

$$\text{доп } f = \Delta_{\text{пред}} = t \cdot m_f$$

Например, допустимой угловой невязкой замкнутого теодолитного хода по формуле (3.10) будет

$$\text{доп } f_{\beta} = 1' \sqrt{n}.$$

Если полученные невязки не превосходят допуск, то измерения считаются качественными и невязки устраняют, т. е. находят систему поправок  $\delta$ , удовлетворяющих двум условиям:

$$\sum \delta = -f \text{ и } \sum \delta^2 = \min.$$

Выполнение второго условия – нахождение поправок к измеренным величинам под условием минимума суммы их квадратов – называется обработкой измерений методом наименьших квадратов. Этот метод применяется для обработки результатов всех геодезических измерений и означает, что сумма квадратов поправок, найденных этим методом, всегда меньше аналогичной суммы, найденной любым другим методом.

Полученными из уравнивания поправками исправляют измеренные углы и линии. Вычисленные по уравненным углам и линиям дирекционные углы и координаты точек будут иметь наиболее вероятные значения.

*Результат уравнивания* – каталог координат и высот точек.

Возникающие в сети уравнения можно решать совместно (строго) или раздельно (упрощенно). Современные ЭВМ позволяют все измерения уравнивать строго методом наименьших квадратов. Это предусмотрено во всех программных комплексах (например, Кредо). При обработке измерений технической точности, выполняемых на ограниченных площадях, допускается упрощенное уравнивание, когда все возникающие условные уравнения решаются раздельно.

Уравнивание – сложный и ответственный этап геодезических работ. Результат уравнивания – каталог – продукт долговременного использования. Во всех странах периодически проводится переуравнивание, т.е. совместная обработка всех прежних и вновь выполненных геодезических измерений, что приводит к изменению координат и высот пунктов в каталогах. Это означает введение в стране новой системы координат. Например, переуравнивание всех накопившихся данных по нивелированию привело к появлению новых каталогов отметок постоянно закрепленных на местности точек, т. е. к введе-

нию новой системы высот – *Балтийской системы 1977 года*. Взамен просуществовавшей полвека системы координат 1942 года (СК-42) в результате совместной обработки всех геодезических и спутниковых измерений, выполненных в государственной геодезической сети, появилась новая система координат 1995 года – СК-95. Последнее уравнивание государственной сети завершило этап истории развития геодезии в России, на котором использовались традиционные методы геодезических измерений. Широкое внедрение спутниковых технологий потребует безусловного перехода к общеземной системе координат, основанной на общем земном эллипсоиде.

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ

### 4.1. Принцип измерения горизонтального и вертикального угла, классификация теодолитов

На топографических картах и планах углы изображаются без искажений проекциями на горизонтальную плоскость. Для измерения горизонтальной проекции угла (горизонтального угла) прибор должен иметь две плоскости: подвижную вертикальную проецирующую (коллимационную) и горизонтальную отсчетную. Вертикальную проецирующую плоскость в геодезических приборах задает зрительная труба при вращении вокруг своей оси, горизонтальная отсчетная плоскость выполняется в виде угломерного круга с кольцом делений – лимба.

Вертикальный угол (угол наклона) – это угол в вертикальной плоскости между направлением на наблюдаемую точку и горизонтальной линией. Вертикальная отсчетная плоскость выполняется в виде вертикального угломерного круга, наглухо соединенного с трубой и вращающегося с ней на одной оси. Горизонтальную линию (горизонтальный отсчетный индекс вертикального круга) задает уровень или автоматический компенсатор.

**Геодезический прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов, называется теодолит.** Кроме того, теодолит снабжается дополнительными устройствами, позволяющими измерять расстояния и магнитные азимуты.

ГОСТ 10529-96 классифицирует теодолиты по точности и конструктивному исполнению.

По точности выделяют теодолиты высочоточные (Т1), точные (Т2, Т5), технические (Т15, Т30, Т60). Цифры в шифре означают среднюю квадратическую погрешность измерения горизонтального угла одним приемом в секундах.

По конструктивным особенностям исполнения выделяют теодолиты традиционные, с компенсатором на вертикальном круге – К, автоколлимационные – А, с трубой прямого изображения – П, маркшейдерские – М, электронные – Э. Шифр 4Т30П означает четвертую модель тридцатисекундного теодолита с трубой прямого

изображения. Шифр 3Т2КА означает третью модель двухсекундного теодолита с компенсатором на вертикальном круге и с автоколлимационным окуляром. Шифр Т10Э означает первую модель электронного теодолита с ценой деления дисплея 10 секунд. Теодолиты в старом, традиционном, исполнении снабжались трубами обратного изображения и цилиндрическим уровнем на алидаде вертикального круга (Т2, 2Т2).

Теодолиты последних моделей всех типов имеют съемную подставку, позволяющую выполнять измерения по трехштативной методике, встроенный оптический центрир, трубу прямого изображения.

## 4.2. Основные части геодезических приборов

### 4.2.1. Лимбы и алидады

**Лимб** служит рабочим эталоном для измерения горизонтальных и вертикальных углов и представляет собой круговую шкалу с равными делениями, нанесенную на стеклянный круг специальной делительной машиной. Лимбы градуируются в градусной или градовой мере. Лимбы теодолита Т30 первой серии разделены через 10 минут, теодолитов 2Т30, 3Т30, 4Т30, теодолитов Т15 и Т5 всех серий – через 1 градус, теодолитов Т2 всех серий – через 20 минут. Все градусные деления подписываются. Угловая величина одного деления лимба называется его *ценой деления*.

Вертикальные и горизонтальные круги устроены одинаково. Обычно вертикальный круг имеет меньший диаметр, чем горизонтальный.

Центр кольца делений горизонтального круга должен быть точно совмещен с осью вращения прибора, а центр вертикального круга – с осью вращения трубы.

Лимбы электронных теодолитов содержат несколько тысяч кодовых штрихов, которые считываются специальными устройствами. Отсчет в цифровой форме выдается на дисплей и может быть автоматически записан в электронную память – накопитель информации.

**Алидадой** называют часть теодолита, соосную с лимбом и несущую элементы отсчетного устройства и трубу. Ось вращения алидады горизонтального круга называется осью вращения теодолита. Несовпадение оси вращения теодолита с центром лимба называется эксцентриситетом алидады.

#### 4.2.2. Отсчетные микроскопы

Отсчетные микроскопы – это оптические приспособления, позволяющие получать изображение отдельных участков лимба, различать малые интервалы шкал с высокой точностью. Отсчетные микроскопы состоят из двух собирательных оптических систем – объектива и окуляра. В плоскость, где с помощью объектива получается изображение штрихов лимба, помещают стеклянную пластинку-сетку. Сетку вместе с проецирующимися на нее штрихами лимба рассматривают с помощью окуляра. В целом микроскоп дает увеличенное мнимое обратное изображение на расстоянии наилучшего зрения (250 мм) от глаза.

В теодолитах отсчетные микроскопы помещают внутри полых осей и стоек (колонок), поддерживающих трубу.

**Штриховой микроскоп** – простейший отсчетный микроскоп с одним штрихом, нанесенным на сетку в качестве индекса, с помощью которого десятые доли интервалов лимба определяют оценкой на глаз. Штриховой микроскоп применялся в первой модели теодолита Т30 и в некоторых нивелирах, снабженных стеклянным горизонтальным кругом.

У шкалового микроскопа на сетке наносят шкалу, видимая длина которой должна точно равняться расстоянию между изображениями соседних штрихов лимба. Оцифровка шкалы всегда направлена навстречу оцифровке делений лимба. Индексом для отсчета по шкале служит проецирующийся на нее штрих лимба.

На шкале теодолитов моделей 2Т30, 3Т30, 4Т30 нанесено 12 делений, цена деления 5', точность отсчета 0,5'.

На шкале теодолитов моделей Т5К, 2Т5К, 3Т5К и Т15 60 делений, цена деления 1', точность отсчета 0,1'.

Оптические микроскопы – штриховые и шкаловые – позволяют наблюдать лимб только с одной стороны. В отсчет, выполненный с помощью таких микроскопов, входит погрешность от эксцентриситета алидады. В современных теодолитах эта погрешность во много раз меньше точности отсчета и ей всегда можно пренебречь. В поле зрения этих микроскопов передаются одновременно изображения и горизонтального, и вертикального кругов.

В теодолитах Т1, Т2 всех моделей используют отсчетные микроскопы с оптическими микрометрами. Оптическая система таких микроскопов содержит пары подвижных отклоняющих элементов и шкалу для определения их перемещения. Отклоняющими элементами

могут служить плоскопараллельные пластинки, оптические клинья, длиннофокусные линзы.

Особенностью микроскопов-микрометров является возможность наблюдения сразу двух диаметрально противоположных частей лимба. При этом влияние на отсчет эксцентриситета алидады устраняется полностью.

#### 4.2.3. Зрительные трубы

**Зрительные трубы** геодезических приборов служат для рассматривания удаленных предметов, визирования на них и отсчитывания по шкалам реек.

Зрительные трубы всех современных геодезических приборов снабжены устройством для внутренней фокусировки. Фокусировка трубы заключается в совмещении изображения наблюдаемого объекта, даваемого объективом, с плоскостью сетки нитей. Это достигается перемещением с помощью кремальеры фокусирующей отрицательной линзы, расположенной между объективом и сеткой нитей.

*Сетка нитей* — плоскопараллельная стеклянная пластинка с нанесенными на ней перекрестиями и другими штрихами. Сетка нитей закреплена на постоянном расстоянии от объектива в кольцевой оправе, играющей роль диафрагмы.

*Объектив* дает действительное обратное уменьшенное изображение. Окуляр выполняет роль лупы при рассматривании изображения, даваемого объективом. Перемещение окуляра, т. е. фокусировка трубы по глазу наблюдателя, достигается с помощью диоптрийного кольца.

*Линия VV*, соединяющая оптический центр объектива с центром сетки нитей, называется визирной осью трубы.

*Визирование* состоит в совмещении визирной оси с наблюдаемой точкой. Точность наведения трубы характеризуется погрешностью визирования:

$$m_{\text{виз}} = 60^2 / \Gamma^x,$$

где  $\Gamma^x$  — увеличение трубы, крат.

Увеличение трубы показывает, во сколько раз увеличиваются размеры предмета, рассматриваемого в трубу, по сравнению с размерами того же предмета, видимого невооруженным глазом. Увеличение труб теодолитов: Т30 — 20<sup>x</sup>, Т15 — 25<sup>x</sup>, Т5, Т2 — 30<sup>x</sup>, Т1 — 40<sup>x</sup>.

#### 4.2.4. Уровни и компенсаторы

В геодезических приборах для установки осей в горизонтальное и вертикальное положение используются *уровни* (обыкновенные и электронные) и *самоустанавливающиеся компенсаторы*.

Обыкновенный уровень представляет собой стеклянную ампулу, заполненную эфиром. Свободная от эфира часть ампулы называется *пузырьком*. Различают уровни круглые (установочные) и цилиндрические (точные).

**Круглый уровень** – это вертикально расположенная цилиндрическая трубка. Внутренняя часть верхней крышки уровня отшлифована по сферической поверхности. На внешнюю поверхность крышки наносят одну или две концентрические окружности с интервалом 2 мм. Центр окружностей называется *нульпунктом уровня*. Нормаль  $UU$  к внутренней поверхности крышки уровня в нульпункте называется *осью круглого уровня*. Использование круглого уровня основано на свойстве его оси занимать *вертикальное* (отвесное) положение, если пузырек уровня располагается симметрично относительно нульпункта (*пузырек в нульпункте*).

Юстировка круглого уровня выполняется с помощью специальных *юстировочных* (исправительных) винтов в его оправе и заключается в установлении оси уровня параллельно оси вращения прибора.

*Ценой деления уровня* называется центральный угол, на который отклоняется ось уровня при перемещении пузырька на одно деление (2 мм). В геодезических приборах используют круглые уровни с ценой деления 2...20'. С помощью круглого уровня выполняется предварительная, приближенная установка оси вращения прибора в отвесное положение – *горизонтирование*. Точное горизонтирование выполняется с помощью цилиндрических уровней и компенсаторов.

**Цилиндрический уровень** – это горизонтально расположенная цилиндрическая слегка изогнутая стеклянная трубка. Ее внутренняя поверхность имеет *тороидальную* форму и в вертикальном продольном сечении дает дугу окружности. На внешнюю поверхность рабочей части уровня наносят шкалу делений с интервалом 2 мм. Средняя точка шкалы – нульпункт. Касательная  $UU$  к внутренней поверхности продольного сечения ампулы уровня в нульпункте называется *осью цилиндрического уровня*.

Использование цилиндрического уровня основано на свойстве его оси занимать горизонтальное положение, если пузырек уровня располагается симметрично относительно нульпункта. В теодолитах

используют цилиндрические уровни с ценой деления  $10...60^2$ . Их устанавливают на приборах по-разному и используют для различных целей:

– *уровень при алидаде горизонтального круга* служит для точного горизонтирования прибора. Его закрепляют параллельно оси вращения трубы (Т5, Т2 всех моделей) или перпендикулярно к ней (Т30, Т15 всех моделей). Юстировка уровня выполняется с помощью специальных винтов в его оправе и состоит в установке оси уровня *перпендикулярно* оси вращения прибора;

– *уровень при трубе* (Т30, Т15 всех моделей) служит для приведения визирной оси трубы в горизонтальное положение и нивелирования с помощью теодолита. Его юстировка состоит в установке оси уровня *параллельно* визирной оси трубы;

– *уровень при алидаде вертикального круга* устанавливался в теодолитах старой конструкции (Т2, 2Т2) для контроля горизонтальности отсчетного индекса вертикального круга.

В современных приборах используют электронные уровни. Электронный уровень обычно представляет собой круглый уровень, снабженный датчиком для точного измерения отклонения оси уровня от вертикали.

В электролитическом уровне при изменении уровня электролита в ампуле изменяется сопротивление электрических цепей – плеч уровня.

В оптико-жидкостном уровне заполняющая ампулу жидкость играет роль линзы, отклоняющей луч. Под уровнем расположена цифровая фотоприемная матрица.

В электронных уровнях обоих типов при отклонении оси вращения от вертикали вырабатывается управляющий электрический сигнал. Микропроцессор вычисляет и автоматически вводит поправки в измеренные углы.

**Самоустанавливающиеся компенсаторы** – это оптико-механические маятники, заменяющие в теодолитах цилиндрические уровни при алидаде вертикального круга (Т5К всех моделей, 3Т2КП). Систематическая погрешность компенсации, т. е. установки в горизонтальное положение отсчетного индекса вертикального круга, составляет  $0,5...2''$ . В современных электронных тахеометрах устанавливают *двухосевые* компенсаторы, контролирующие вертикальность оси вращения прибора.

#### 4.2.5. Прочие части, приспособления, принадлежности

**Становым винтом** прибор закрепляется на штативе. Подъемные винты служат для горизонтирования прибора. Закрепительные винты служат для закрепления подвижных частей прибора. Наводящие винты служат для точной установки подвижных частей. Закрепительные и наводящие винты устраиваются соосно (Т5, Т2) или раздельно (Т30, Т15). В некоторых приборах вместо пары винтов (закрепительный + наводящий) используется один – бесконечная червячная передача. Юстировочные (исправительные) винты служат для выверки и юстировки приборов. Эти винты вращают специальной иглой-шпилькой или отверткой. Юстировочные винты обычно устанавливаются парами. При юстировке сначала ослабляют один винт, а затем подтягивают другой.

Для центрирования теодолита над вершиной измеряемого угла используют шнуровые, оптические и лазерные центриры. Оптические центриры встроены в алидадную часть теодолитов Т5 и Т2 всех моделей, а в теодолитах 4Т30 и 4Т15 закрепляются на подставке. Точность центрирования шнуровым центриром – отвесом 3...10 мм, оптическим центриром 0,5...2 мм. Лазерными центрирами снабжаются современные электронные теодолиты и тахеометры. Видимый (красный) лазерный луч заменяет шнур, центрирование таким лучом выполняется быстро и точно.

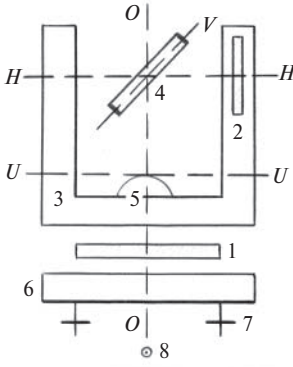
Для выполнения измерений геодезические приборы устанавливают на штативы, которые выпускаются деревянными и металлическими, с раздвижными или цельными ножками. Чем точнее измерения, тем тяжелее должен быть штатив.

При точных угловых измерениях на точках, угол между которыми нужно измерить, устанавливаются специальные визирные цели – визирные марки. Визирная марка – это металлическая пластинка с четким геометрически правильным рисунком черного цвета, расположенным на желтом или розовом фоне симметрично относительно вертикальной оси марки. Визирная марка имеет стандартную ось и устанавливается в съемную подставку теодолита, которая центрируется над точкой с помощью оптического центрира. Марки могут снабжаться призмой полного внутреннего отражения для измерения расстояний с помощью светодальномера, оптическим центриром, подсветкой для измерений в темное время суток.

Большинство теодолитов снабжаются буссолью для измерения магнитных азимутов, специальными окулярными насадками для работы при значительных углах наклона и другими приспособлениями.

### 4.3. Геометрическая схема теодолита

В процессе измерений ось вращения теодолита  $OO$  (рис. 4.1) должна быть отвесной, проходить через центр шкалы горизонтального круга 1 и вершину измеряемого угла 8. Плоскость лимба 1 должна быть горизонтальной, а визирная (коллимационная) плоскость вертикальной.



- $OO$  – ось вращения прибора,  
 $UU$  – ось цилиндрического уровня,  
 $HH$  – ось вращения трубы,  
 $VV$  – визирная ось трубы,  
 1 – горизонтальный круг,  
 2 – вертикальный круг,  
 3 – алидадная часть теодолита,  
 4 – зрительная труба,  
 5 – цилиндрический уровень,  
 6 – подставка,  
 7 – подъемный винт.  
 8 – вершина измеряемого угла

Рис. 4.1

Для выполнения этих *геометрических условий* оси теодолита должны занимать следующее положение:

- ось цилиндрического уровня  $UU$  должна быть перпендикулярна оси вращения прибора  $OO$ ;
- визирная ось трубы  $VV$  должна быть перпендикулярна горизонтальной оси вращения трубы  $HH$ ; неперпендикулярность указанных осей называется *коллимационной погрешностью*;
- горизонтальная ось вращения трубы  $HH$  должна быть перпендикулярна оси вращения прибора  $OO$ .

Действия, в результате которых проверяется выполнение указанных геометрических условий, называются поверками теодолита.

**Устранение обнаруженных несоответствий во взаимном положении осей называется юстировкой** (исправлением).

Поверки и юстировка теодолитов излагаются в паспортах приборов.

Вертикальный круг 2 может располагаться слева или справа от трубы. Эти положения обозначают соответственно Л и П. Измере-

ние горизонтальных и вертикальных углов выполняют симметрично: половину при круге Л, а вторую половину при круге П. Это приводит к повышению точности за счет устранения погрешностей, вносимых недостаточным соответствием взаимного положения осей теодолита.

## 4.4. Измерение углов

Перед измерением углов теодолит устанавливают в рабочее положение: центрируют, горизонтируют, фокусируют трубу по глазу. В точках, между которыми измеряют угол, устанавливают визирные цели.

### 4.4.1. Измерение горизонтальных углов и направлений

Для исключения влияния коллимационной погрешности и наклона оси вращения трубы каждый угол измеряют при двух положениях вертикального круга – слева (Л) и справа (П) от трубы. Измерения при одном положении вертикального круга называют полуприёмом. Однократное измерение угла при двух положениях вертикального круга называют приёмом.

Способ измерения зависит от количества направлений при вершине угла. Наиболее часто число направлений равно двум, т. е. при вершине измеряется один угол. Допустимое значение расхождения угла в полуприемах зависит от типа теодолита и назначения работы и обычно не должно превышать удвоенной точности отсчета по лимбу (1' для теодолита 2Т30 и 0,2' для теодолита 3Т5К).

Если число направлений на пункте больше двух, то их измеряют *способом круговых приемов*. Одно из направлений (с наилучшей видимостью) выбирают в качестве начального – первого. Трубу по очереди наводят на все направления. Заканчивают полуприём повторным наведением трубы на первое направление – замыканием горизонта. Назначение замыкания горизонта – контроль неподвижности лимба в течение полуприема.

Если разность отсчетов  $\Delta$  на первое направление в начале и конце полуприема не превосходит допуск, то его распределяют с обратным знаком на все направления, но чаще просто вычисляют среднее из наблюдений на начальное направление.

В первом полуприеме алидаду вращают по ходу часовой стрелки, во втором – в обратном направлении с целью уменьшения влияния на результаты измерений внешних условий.

Журнал измерения горизонтальных направлений  
способом круговых приемов

Пункт 18

2-й прием

Теодолит 2Т5К

Название направлений	Отсчеты по горизонтальному кругу			Л–П	$\frac{Л+П}{2}$	Приведенные значения направлений
	Л	І	П			
					<u>45°-12,1'</u>	
1	45° 12,4'	225° 11,6'	+0,8'	45° 12,0'	0° 00,0'	
2	106° 28,9'	286° 27,6'	+1,3'	106° 28,2'	61° 16,1'	
3	240° 48,1'	60° 46,5'	+1,6'	240° 47,3'	195° 35,2'	
4	348° 31,5'	168° 30,5'	+1,0'	348° 31,0'	303° 18,9'	
1	45° 12,6'	225° 11,8'	+0,8'	45° 12,2'	–	
	$\Delta_{Л} = +0,2'$	$\Delta_{П} = -0,2'$				

Повышение точности достигается измерением горизонтальных направлений несколькими приемами. Для равномерного распределения отсчетов по всей шкале лимба перед каждым следующим приемом горизонтальный круг смещают на угол  $\frac{180^\circ}{n} + \delta$ , где  $n$  – число приемов,  $\delta$  – 5' или 10'.

Число приемов измерений – допустимые значения незамыкания горизонта и колебания направлений в отдельных приемах регламентированы для каждого типа теодолита и вида работ инструкциями /7, 8, 9/. Приемы, не удовлетворяющие допускам, повторяют. В результате обработки получают ряд равноточно измеренных направлений, разность любой пары которых дает ряд равноточно измеренных углов.

Современные тахеометры позволяют измерять отдельный угол *способом повторений*: угол несколько раз откладывают на горизонтальном круге, а отсчёт берут только один раз в конце полуприёма. При таком способе измерений влияние погрешностей визирования и отсчитывания заметно ослабляется.

На точность измерения горизонтальных направлений влияют погрешности прибора и визирования, внешние условия, неточность центрирования прибора и визирных целей. Совместное их влияние не должно превосходить погрешности отсчета по лимбу.

#### 4.4.2. Вертикальный круг теодолита, измерение углов наклона

Вертикальный круг теодолита устроен так же, как и горизонтальный, наглухо скреплен с трубой и вращается с ней на одной горизонтальной оси. Оцифровка вертикального круга в теодолитах 2Т30...3Т5КП секторная.

При такой оцифровке (рис. 4.2) знак отсчета соответствует знаку угла наклона, если вертикальный круг располагается слева от трубы (Л), и противоположен знаку угла наклона при правом расположении круга (П).

Угол наклона вычисляют по формуле

$$v = (Л - П)/2. \quad (4.1)$$

Пример:  $Л = 5^\circ 12'$ ;  $П = -5^\circ 14'$ ;  $v = +5^\circ 13'$ .

Очевидно, что при горизонтальном положении визирной оси отсчет по вертикальному кругу должен быть равен нулю.

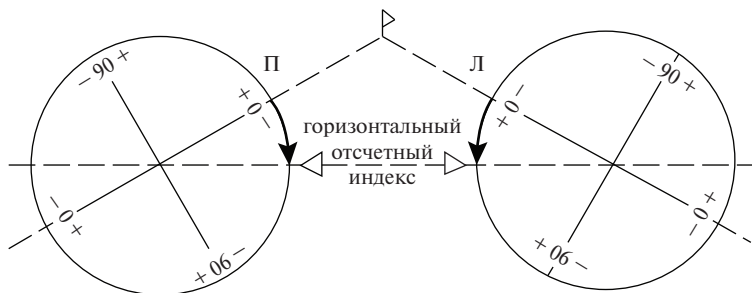


Рис. 4.2

Иногда это условие не выполняется: неточно посажен вертикальный круг на ось вращения трубы, неточно расположена сетка нитей. Отсчет по вертикальному кругу, когда визирная ось горизонтальна, а ось вращения прибора вертикальна, называется *местом нуля* (МО). Место нуля вычисляется по формуле

$$МО = (Л + П)/2. \quad (4.2)$$

В примере  $МО = -1'$ .

Место нуля — это постоянная по величине, т.е. систематическая, погрешность отсчета по вертикальному кругу. Как любую система-

тическую погрешность, влияние места нуля можно устранить одним из трех способов:

– юстировкой: на вертикальном круте наводящим винтом трубы устанавливают отсчет, равный вычисленному значению угла наклона, а центр сетки нитей совмещают с наблюдаемой точкой с помощью вертикальных юстировочных винтов сетки нитей или поворотом оптического клина;

– применением правильной методики измерений: отсчеты берут при двух положениях вертикального круга – левом и правом, а угол наклона вычисляют по формуле (4.1);

– введением поправки в результаты измерений, выполненных при одном положении вертикального круга: из формулы (4.2) получим

$$\text{П} = 2\text{МО} - \text{Л}; \quad \text{Л} = 2\text{МО} - \text{П}. \quad (4.3)$$

Подставляя (4.3) в (4.1), получим  $\nu = \text{Л} - \text{МО}$ ;  $\nu = \text{МО} - \text{П}$ . (4.4)

Погрешность измерения углов наклона несколько больше погрешности измерения горизонтальных углов вследствие влияния вертикальной рефракции. Уменьшение этого влияния достигают измерением прямых и обратных углов наклона.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Расстояния измеряют при выполнении любых геодезических работ.

*Прямые* (непосредственные) измерения выполняют с помощью лент, рулеток. При *косвенных* измерениях, выполняемых с помощью оптических или электронных дальномеров, расстояние вычисляют по непосредственно измеренным углам, времени, другим расстояниям.

В настоящее время основным прибором для измерения расстояний является светодальномер.

### 5.1. Непосредственное измерение расстояний

Непосредственное измерение выполняется путем прямого укладывания мерного прибора вдоль измеряемой линии.

Мерные приборы: стальные ленты, стальные и тесьмяные рулетки.

Стальная землемерная 20-метровая лента ЛЗ-20 – штриховой прибор. Цена деления ленты 10 см, отсчет берется на глаз с точностью 1 см. Для работы лента снабжается комплектом из 6-ти шпилек.

Шкаловые стальные рулетки с эмалевым покрытием и ценой деления 1 мм выпускаются длиной 10, 20, 30, 50 и 100 м.

Шкаловые тесьмяные рулетки с ценой деления 1 см выпускаются длиной 10, 20, 30 и 50 м.

Устройство лент и рулеток, технология измерений этими приборами подробно описаны в любом учебнике геодезии и здесь опущены.

До начала измерений определяют действительную длину мерного прибора, сравнивая рабочую ленту (рулетку) с образцовым мерным прибором. Такое сравнение называется компарированием. Величина  $\Delta l = l - l_o$ , где  $l$  – действительная длина мерного прибора при температуре компарирования  $t_k$ ,  $l_o$  – номинальная длина мерного прибора, называется поправкой за компарирование.

Уравнением мерного прибора называется выражение вида

$$l = l_o + \Delta l_k \text{ при температуре } t_k.$$

Например,  $l = 20 \text{ м} - 3 \text{ мм}$  при  $t_k = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Поправку за компарирование вводят, когда длина мерного прибора отличается от номинальной более чем на 1/10 000.

Если температура при измерении расстояния значительно отличается от температуры компарирования, то вычисляют поправку за температуру по формуле  $\Delta l_t = l_o \cdot \alpha(t_u - t_k)$ , где  $\alpha$  – термический коэффициент. Для 20-метровой стальной ленты  $\Delta l_t = 0.24(t_u - t_k)$ , мм/градус.

Поправку вводят, если разность температуры воздуха при компарировании и измерении линий превышает 8 °С.

Общую длину линии, измеренной лентами (рулетками), определяют по формуле

$$D = N(l_0 + Dl_k + Dl_t) + r, \quad (5.1)$$

где  $N$  – целое число уложений ленты (рулетки),  $r$  – остаток (домер), меньший длины ленты.

Точность непосредственного измерения линий зависит от рельефа местности, характера почвенно-растительного покрова и находится в пределах 1:3000...1:1000. Для контроля и повышения точности линии измеряют лентами (рулетками) дважды – в прямом и обратном направлениях.

## 5.2. Измерение расстояний

### с помощью оптических дальномеров, нитяный дальномер

Все оптические дальномеры – это приборы геометрического типа, работающие по схеме, показанной на рис. 5.1. На одном конце измеряемой линии устанавливается прибор, на другом – базисная рейка.

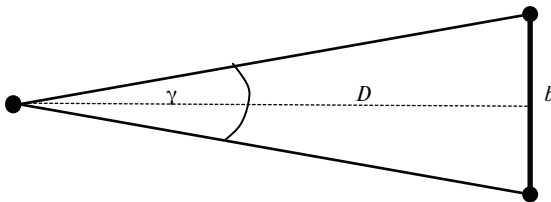


Рис. 5.1

Из рисунка следует формула  $D = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}$ ,

где  $D$  – определяемое расстояние,  $\gamma$  – угол, под которым из точки установки дальномера виден базис  $b$ .

Так как  $D \gg b$ , то угол  $\gamma$  всегда мал. Тогда  $\operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} = 2 \operatorname{ctg} \gamma$  и

$$D = b \cdot \operatorname{ctg} \gamma. \quad (5.2)$$

В формуле (5.2) либо базис  $b$ , либо угол  $\gamma$  можно сделать постоянным. Соответственно этому различают дальномеры с постоянным базисом и постоянным углом.

### 5.2.1. Оптические дальномеры с постоянным базисом

Базис представляет собой деревянную или металлическую рейку длиной 1,5...3 м, которую можно устанавливать горизонтально или вертикально. Угол  $\gamma$  измеряется с помощью теодолита или специального прибора.

Точность измерения расстояний дальномерами с постоянным базисом зависит от типа прибора и находится в пределах 1:1000...1:25 000.

В настоящее время оптические дальномеры с постоянным базисом практически полностью вытеснены светодальномерами – приборами значительно более точными и надежными.

### 5.2.2. Оптический дальномер с постоянным углом – нитяный

Дальномер такого типа представляет собой два дополнительных штриха (две нити) на сетке нитей трубы, симметричных относительно центрального штриха. Такой дальномер называют *нитяным*. С помощью нитяного дальномера расстояние измеряют по вертикально установленной рейке. Геометрическая схема нитяного дальномера показана на рис. 5.2.

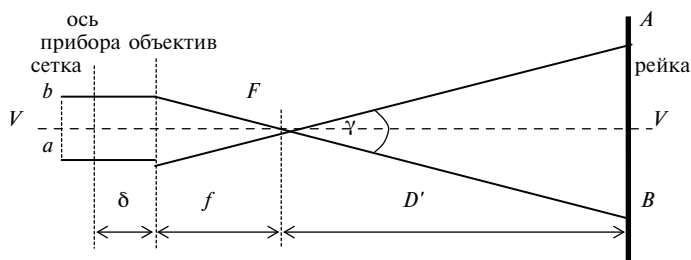


Рис. 5.2

Угол  $\gamma$  делают равным  $0,573^\circ$ , так что  $\operatorname{ctg} \gamma = 100$ . Эту величину называют коэффициентом дальномера. Формула (5.2) приобретает вид

$$D = kb = 100b .$$

Длина базиса обычно выражается в сантиметровых делениях рейки, т. е.  $AB = b = n$  см. Тогда

$$D = kn = 100 n, \quad (5.3)$$

т. е. каждому сантиметру на рейке между дальномерными штрихами соответствует метр на местности.

Нитяный дальномер прост, надежен. Им снабжаются трубы всех геодезических приборов. Точность нитяного дальномера порядка 1:300.

Из рис. 5.2 следует

$$D = D' + f + \delta = D' + c .$$

Оптическую систему труб современных приборов рассчитывают так, чтобы постоянное слагаемое  $c$  было близким к нулю. Поэтому для определения расстояния достаточно использовать формулу (5.3).

### 5.3. Измерение расстояний с помощью электронных дальномеров

#### 5.3.1. Виды электронных дальномеров в зависимости от способа измерения времени

Электронными называют дальномеры, в которых для измерения расстояний используется электромагнитное излучение, т.е. свет или радиоволны. В этих приборах осуществляется определение длины по времени  $t$  прохождения электромагнитными колебаниями двойного  $2D$  или одинарного  $D$  измеряемого расстояния. В первом случае используется косвенный способ измерения времени, во втором — прямой. Приборы, в которых *время определяется косвенным способом*, называются светодальномерами или радиодальномерами. *Прямое измерение времени* используется в спутниковых навигационных системах.

### 5.3.2. Светодальномеры, их точность, типы

Если над одним концом измеряемой линии установить приемопередатчик электромагнитных колебаний, а над другим – отражатель этих колебаний (п/п и отр на рис. 5.3), то расстояние  $D$  можно определить по формуле

$$D = Vt/2, \quad (5.4)$$

где  $V$  – скорость электромагнитных колебаний в момент измерений.

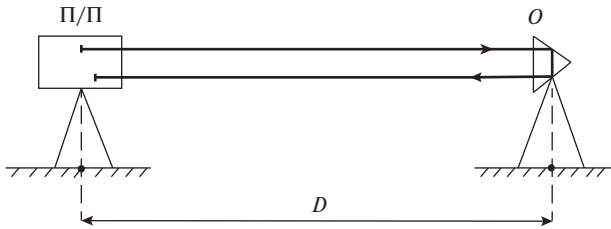


Рис. 5.3

Прибор, работающий по указанной схеме и использующий электромагнитные колебания светового диапазона, называется светодальномер.

Скорость  $v$  определяют по формуле

$$v = \frac{c}{n}, \quad (5.5)$$

где  $c$  – скорость электромагнитных колебаний в вакууме,  $n$  – показатель преломления среды ( $n$  всегда больше 1).

Время  $t$  измеряется косвенным способом. Для этого непрерывное излучение преобразуется в световой сигнал – модулируется по амплитуде  $A$ .

При амплитудной модуляции яркость света меняется по гармоническому закону или импульсами периодом  $T$ . Все современные светодальномеры – приборы импульсного типа. Время  $t$  можно выразить через период  $T$  и число периодов  $(N + \Delta)$ , уложившихся в двойном измеряемом расстоянии  $2D$ :

$$t = T(N + \Delta) = (N + \Delta)/f \quad (5.6)$$

где  $N$  – целое число,  $\Delta < 1$ ,  $f = 1/T$ .

Величина  $f$  называется частотой модуляции или частотой следования импульсов. Подставив выражение (5.6) в формулу (5.4), получим

$$D = 0.5v(N + \Delta)/f, \quad (5.7)$$

$$D = 0.5\lambda(N + \Delta); \quad (5.8)$$

$$\lambda = v/f, \quad (5.9)$$

где  $\lambda$  – фазовый цикл, т.е. длина волны модулированного излучения или расстояние между смежными импульсами (*межимпульсный интервал*).

Формула (5.7) аналогична формуле (5.1) измерения расстояния стальной лентой или рулеткой. Поэтому светодальномер иногда называют электронной рулеткой.

Сказанное выше можно пояснить так. Любой мерный прибор содержит два элемента: переносчик единицы меры и саму единицу меры, т.е. деления равной длины. На лентах, рулетках, рейках переносчиком единицы меры служит стальная (тесьяная) лента или деревянный брусок, а при электромагнитных способах измерений переносчиком единицы меры служит электромагнитное излучение (световой луч). Наложение на луч делений равной длины достигается *модуляцией* излучения.

Колебания заданной частоты вырабатывает высокостабильный генератор. В большинстве отечественных и зарубежных светодальномеров частота модуляции  $f = 15$  МГц, что по формуле (5.9) соответствует  $\lambda = 20$  м.

Определение целого числа фазовых циклов  $N$  в формулах (5.7, 5.8) называется разрешением неоднозначности. Для этого измерения последовательно выполняют на нескольких фиксированных частотах, например,

$$f_1 = 15 \text{ МГц}, \quad f_2 = 1.5 \text{ МГц}, \quad f_3 = 0.15 \text{ МГц},$$

что соответствует  $0.5\lambda_1 = 10$  м,  $0.5\lambda_2 = 100$  м,  $0.5\lambda_3 = 1000$  м.

При определении дробной части  $\Delta$  используется цифровой способ измерения временных интервалов с помощью цифровых фазометров. Сущность цифрового способа состоит в сравнении измеряемо-

го интервала с образцовым интервалом, воспроизводящим единицу времени. Это достигается заполнением временного интервала  $\Delta T$  в формуле (5.6) короткими электрическими импульсами  $t$  так, что  $\Delta T = nt$ , и подсчете количества импульсов  $n$ .

В светодальномерах типа СТ5, СТ10 длина импульса заполнения близка к 1 см, поэтому число импульсов, определенное цифровым фазометром, равно числу сантиметров в величине  $\Delta\lambda$  формулы (5.8). Среднее из многократных измерений этой величины выдается на цифровое табло прибора с тремя десятичными знаками.

В более полном виде формулу (5.8) следует записать так:

$$D = 0.5\lambda(N + \Delta) + \delta \quad (5.10)$$

где  $\delta$  – постоянная поправка, присущая дальномеру любого типа.

Величина  $\delta$  отражает несовпадение центров излучения, отражения и приема сигнала с отвесными линиями, проходящими через концы измеряемого отрезка. Эта величина определяется по чертежам приборов или по измерениям линий известной длины – базисов. В процессе измерений значение  $\delta$  уточняется. Для этого вводится режим оптического короткого замыкания – измерение пути луча в самом приборе, а прибор снабжается специальным отражателем, надеваемым на объектив.

Для оценки точности светодальномерных измерений подставим (5.5) в (5.8):

$$D = c(N + \Delta)/2fn, \quad (5.11)$$

а затем определим полный дифференциал этой функции, как показано в п. 3.3. Для этого прологарифмируем и продифференцируем формулу (5.11):

$$\ln D = \ln c - \ln 2 - \ln f - \ln n + \ln(N + \Delta);$$

$$dD/D = dc/c - df/f - dn/n + d\Delta/N.$$

Учитывая, что из формулы (5.8)  $N \cong 2D/\lambda$ , получим

$$dD/D = dc/c - df/f - dn/n + 0.5\lambda \cdot d/D.$$

Перейдем от дифференциалов к квадратам средних квадратических погрешностей

$$m_D^2 = (0.5\lambda)^2 m_\Delta^2 + (m_c^2 / c^2 + m_f^2 / f^2 + m_n^2 / n^2) D^2. \quad (5.12)$$

Величинами  $m_c/c = 10^{-9}$  и  $m_f/f = 10^{-11}$  можно пренебречь ввиду их малости, а так как  $n \approx 1$ , то  $m_n/n = m_n$  и формула (5.12) принимает вид

$$m_D^2 = (0.5\lambda)^2 m_\Delta^2 + m_n^2 D^2 \quad (5.13)$$

или 
$$m_D^2 = a^2 + b^2 D^2. \quad (5.14)$$

Окончательный вид формулы для оценки точности светодальномерных измерений

$$m_D = a + bD, \quad (5.15)$$

где  $a = 0.5\lambda m_\Delta$ ,  $b = m_n$ .

Величина первого слагаемого в формуле (5.15) не зависит от длины измеряемой линии. Для уменьшения  $a$  нужно уменьшать  $\lambda$ . Пример:  
 – при  $f = 15$  МГц;  $0.5\lambda = 10$  м;  $m_\Delta = 5 \cdot 10^{-4}$  получим  $a = 5$  мм;  
 – при  $f = 150$  МГц;  $0.5\lambda = 1$  м;  $m_\Delta = 5 \cdot 10^{-4}$  получим  $a = 0,5$  мм.

Именно такие частоты используются в светодальномерах средней и повышенной точности СТ5 и СП2.

Величина второго слагаемого пропорциональна длине измеряемой линии. Частная погрешность  $m_n$  отражает неточность знания коэффициента преломления среды по трассе распространения светового луча и составляет примерно  $10^{-6}$ , т. е. 1 мм на 1 км длины. В современных светодальномерах и электронных тахеометрах величина второго слагаемого устанавливается в специальной строке установок с надписью *ppm* (пропромилле, т. е.  $10^{-6}$ ). Коэффициент преломления  $n$  зависит от метеоданных, т. е. по трассе луча необходимо измерять температуру, давление, влажность воздуха. При этом наибольшее влияние оказывает погрешность измерения температуры. При измерении коротких линий (до 1 км) температуру измеряют только на точке установки приемопередатчика.

Стандартизованы три типа светодальномеров:

- СГ (геодезический) – для измерения расстояний до 20 км со средней погрешностью не более 30 мм;
- СТ (топографический) – для измерения расстояний до 5 (10) км со средней погрешностью не более 10 (15) мм;
- СП (прикладной) – для измерения расстояний до 2 км со средней погрешностью не более 3 мм.

## Технические характеристики выпускаемых светодальномеров:

Тип	Марка	$D_{\max}$ , км	$a$ , мм	$b$ , мм/км
СГ	СГ20	20	10	1
СТ	СТ5 (СТ10)	5 (10)	10 (5)	1
СП	СП2	2	0.5	1

Конструкция светодальномеров непрерывно совершенствуется. **Современный светодальномер** – это компактный полностью автоматизированный прибор, выдающий обработанные результаты измерений в цифровой форме на табло. Время измерений – единицы секунд независимо от длины измеряемой линии. Наблюдатель должен только навести прибор на отражатель. В некоторых типах светодальномеров точное наведение на отражатель тоже выполняется автоматически.

Повышение мощности излучателя светодальномера привело к возможности получения устойчивого отраженного сигнала от диффузной поверхности, т.е. к возможности измерять расстояния без отражателя. Безотражательные дальномеры выпускаются рядом зарубежных фирм под названием *электронная рулетка*. Они сразу получили широкое применение в строительстве при измерении расстояний до труднодоступных объектов (стен, потолков и т. п.). Огромное преимущество таких приборов – полная безопасность выполнения геодезических работ.

Светодальномеры всех типов выпускаются обычно в виде насадки, закрепляемой на колонках трубы или на самой трубе теодолита. Но наиболее распространены встроенные светодальномеры, составляющие единый прибор с электронным (цифровым) теодолитом. Такие приборы получили название *электронный тахеометр* – общая измерительная станция (total station) и выпускаются практически всеми приборостроительными фирмами мира. Углы такими приборами измеряются с точностью 1...6", линии с точностью 1...3 мм. Мощный микропроцессор позволяет прямо на станции выполнять полную обработку результатов измерений. В качестве отражателя может использоваться призма полного внутреннего отражения, отражающая пленка (катафот), диффузная поверхность. При работе с разными отражающими поверхностями требуется разная мощность излучателя. Вид отражателя указывается в специальной строке установок, а прибор сам выбирает мощность излучения, соответствующую типу отра-

жателя. Дальность действия дальномеров в безотражательном режиме постоянно растет и в настоящее время достигает 350 м.

Для удобства наведения на цель электронные тахеометры снабжаются лазерным указателем направления – видимым красным лучом, соосным с визирной осью трубы, – и другими приспособлениями, облегчающими и упрощающими работу геодезиста.

#### 5.4. Вычисление горизонтальных проложений измеренных линий

Горизонтальное проложение измеренной линии можно вычислить по углу наклона  $\nu$  или по превышению  $h$ . При этом вычисляют либо само горизонтальное проложение, либо поправку за наклон  $\Delta D = d - D$ .

$$d = D \cos \nu, \quad (5.16)$$

$$\Delta D = d - D = D \cos \nu - D = -2D \sin^2(\nu/2). \quad (5.17)$$

Формулу для вычисления поправки за наклон по превышению получают из рис. 5.4:

$$d^2 + h^2 = D^2 \Rightarrow d^2 - D^2 = -h^2 \Rightarrow (d - D)(d + D) = -h^2.$$

Так как  $d - D = \Delta D$ , а  $(d + D) \approx 2D$ , то

$$\Delta D = -\frac{h^2}{2D}. \quad (5.18)$$

Знак «минус» в формулах (5.17, 5.18) означает, что поправка за наклон всегда вычитается из измеренной линии.

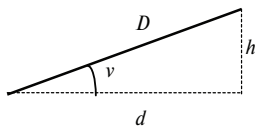


Рис. 5.4

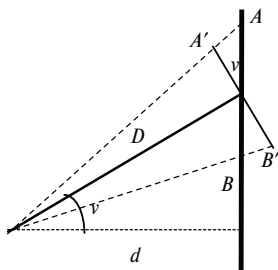


Рис. 5.5

Формулы (5.16, 5.17, 5.18) используются для вычисления горизонтального проложения при измерении расстояния лентой или светодальномером.

При измерении расстояния нитяным дальномером формулу (5.16) нужно преобразовать, так как формулы (5.1) и (5.3) выведены в предположении, что дальномерная рейка перпендикулярна к визирной оси трубы, а сама визирная ось горизонтальна. Практически же приходится визировать на рейку наклонным лучом (рис. 5.5). При этом на рейке вместо отрезка  $A'B'$  увидим отрезок  $AB = n$  сантиметровых делений, где  $A$  и  $B$  – видимые проекции дальномерных штрихов на рейку. Величина  $D' = 100n$ , прочитанная по рейке, называется дальномерным расстоянием.

Так как  $A'B' = AB \cdot \cos \nu = n \cdot \cos \nu$ , то наклонное расстояние  $D$  от прибора до рейки определится по формуле

$$D = D' \cos \nu = 100n \cdot \cos \nu. \quad (5.19)$$

Подставляя (5.19) в (5.16), получим формулу

$$d = D' \cos^2 \nu = 100n \cdot \cos^2 \nu \quad (5.20)$$

## 6. СПУТНИКОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК (геодезическое использование спутниковых навигационных систем)

### 6.1. Принцип работы и устройство спутниковой радионавигационной системы

Для определения трех пространственных координат точки  $M$  по трем исходным пунктам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  нужно измерить три расстояния  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ . Такой способ определения положения точек называется пространственной линейной засечкой (рис. 6.1).

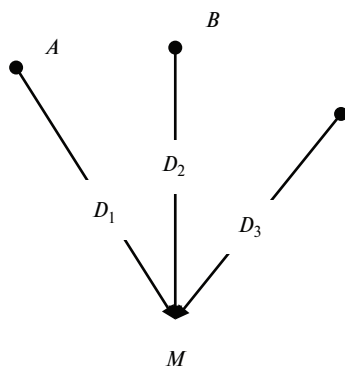


Рис. 6.1

Если пункты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  вынесены в космос и расположены на ИСЗ, то способ определения положения точки  $M$  по расстояниям до спутников называется спутниковой засечкой, а система, реализующая такую засечку, называется спутниковой радионавигационной системой (СРНС), т. е. расстояния измеряют с помощью радиосигналов. Другое название таких систем – позиционные.

Спутниковый метод – это принципиально новая технология выполнения геодезических работ, кардинально изменившая подход к построению, за-

креплению и долговременному сохранению геодезических опорных сетей, а во многих случаях и к самой геодезической съемке.

В настоящее время происходит интенсивное внедрение спутниковых систем в разнообразные сферы деятельности, в том числе и на железнодорожном транспорте. В развитых странах (США, Германия, Италия и др.) приняты государственные программы оснащения спутниковыми приемниками каждого локомотива для непрерыв-

ного контроля (мониторинга) фактического положения поездов и скорости их движения, создания новой системы сигнализации и связи в дополнение к системам автоблокировки. Это дает возможность кардинально решить проблему безопасности движения.

Спутниковая позиционная система позволяет определять положение (т. е. выполнять позиционирование) в любое время в любом месте в любую погоду с высокой точностью.

В 80-х годах XX века в США была создана СРНС NAVSTAR GPS (глобальная позиционная система). В 1993 году она была развернута полностью и предоставлена в бесплатное пользование всем странам мира.

Примерно в то же время в России создана СРНС ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система). В 1995 году она была открыта для гражданского применения.

В Европе создаётся СРНС GALILEO, аналогичную систему разрабатывает Япония.

Все СРНС примерно одинаковы и включают в себя три обязательных блока:

- наземный блок управления и контроля;
- космический блок – созвездие навигационных спутников (НС);
- блок пользователей – приемники сигналов навигационных спутников.

**Блок управления и контроля** – это командно-измерительный комплекс. Он выполняет наблюдение за движением НС, управляет режимами работы аппаратуры и параметрами передаваемых спутниками сигналов, следит за стабильностью бортовой шкалы времени. Командно-измерительный комплекс состоит из ведущей контрольной станции, координатно-вычислительного центра (КВЦ), станций траекторных измерений и управления (СТИ), наземного водородного эталона времени и частоты с относительной нестабильностью  $10^{-14}$ , обеспечивающего синхронизацию всех процессов в системе.

Периодически при пролете НС над СТИ производится наблюдение за спутником. Результаты измерений обрабатываются в КВЦ, определяются и прогнозируются координаты спутника на орбите (эфемериды), которые затем передаются в память бортовой ЭВМ спутника, а оттуда в виде кадра служебной информации – потребителю.

Состав космического блока:	ГЛОНАСС	GPS
Число НС в системе	24	24
Число орбит	3 (через 120°)	6 (через 60°)

Число НС на орбите	8 (через 45°)	4 (через 90°)
Тип орбиты	круговая	круговая
Высота орбиты, км	19100	20145
Наклон орбиты к экватору	64,8°	55°
Период обращения	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 56,9 мин
Система координат	ПЗ-90	WGS-84

Количество и расположение НС в созвездии обеспечивает в любой точке Земли в любое время радиовидимость не менее четырех спутников.

На каждом спутнике находятся по два атомных стандарта частоты и времени, генератор стандарта частоты и времени, генератор опорной частоты с суточной нестабильностью  $10^{-13}$ , радиопередатчик с модулятором несущих частот, приемник для связи с комплексом управления, бортовая ЭВМ, солнечные батареи, система ориентации и коррекции орбиты.

Спутники непрерывно излучают радиосигналы на частотах  $L_1$  и  $L_2$ .

Все спутники системы GPS излучают сигналы одинаковой частоты:

– в диапазоне  $L_1$  – 1575,4 МГц, чему соответствует длина волны 19 см;

– в диапазоне  $L_2$  – 1227,6 МГц, чему соответствует длина волны 24 см.

В системе ГЛОНАСС каждый спутник излучает сигнал своей частоты:

– в диапазоне  $L_1$  – 1602...1615 МГц;

– в диапазоне  $L_2$  – 1246...1256 МГц;

– длины волн имеют примерно то же значение.

Несущие частоты модулированы сигналом, который несет следующие сообщения:

– параметры орбиты спутника, позволяющие вычислить на любой момент его геоцентрические координаты  $X_i, Y_i, Z_i$ ;

– поправку времени;

– данные для вычисления ионосферной поправки в результаты измерений.

Кроме этого, радиосигнал несет *дальномерные коды* (метки времени), позволяющие измерять расстояния.

**Приемник спутниковых сигналов** – это исключительно сложный и дорогой прибор. Он выбирает нужные для измерений спутники, обес-

печивающие засечку наилучшей геометрической формы, принимает и обрабатывает информацию со спутников с помощью встроенного программного обеспечения. В результате определяются координаты точки установки приемника и скорость его движения на поверхности Земли, в воздухе или околоземном космическом пространстве.

В настоящее время разработано множество различных приемников для разных целей. Отдельный класс составляют геодезические спутниковые приемники — приборы для высокоточного (единицы мм) определения координат.

Спутниковый приемник включает два блока: антенну и приемовычислитель. Приемовычислитель содержит кварцевый стандарт частоты с нестабильностью  $10^{-7}$ ; генерирует точно такие же несущие частоты, дальномерные коды (метки времени), как и спутник; хранит принятую информацию; сбрасывает накопленные данные в компьютер для дальнейшей обработки.

Приемники сигналов системы GPS выпускаются всеми ведущими приборостроительными фирмами мира. В последнее время зарубежные фирмы выпускают приемники сигналов обеих систем — GPS и ГЛОНАСС. В практике геодезических работ России пока используются только приемники зарубежного производства.

Максимальное число спутников над горизонтом — 12. Сигнал каждого спутника принимается отдельным каналом. Соответственно максимальное число каналов — 12. Приемник может принимать сигналы только на частоте  $L_1$  (одночастотный) или на обеих частотах —  $L_1$  и  $L_2$  (двухчастотный). Если приемник работает со спутниками обеих систем — GPS и ГЛОНАСС на обеих частотах, то это может быть 24-канальный двухчастотный приемник.

Основа спутникового метода позиционирования — измерение расстояний между спутниками и приемником.

Позиционирование, т. е. определение координат места установки спутникового приемника, сводится к решению системы уравнений, в которых определяемые неизвестные выражены через измеренные расстояния.

Расстояние  $D$  определяют по времени  $t$ , за которое радиосигнал проходит от спутника до приемника:

$$D = V \cdot t. \quad (6.1)$$

Скорость распространения радиоволн определяется по формуле:

$$V = c/n, \quad (6.2)$$

где  $c$  – скорость радиоволн в вакууме (299 792 458 м/с),  $n$  – показатель преломления среды, в которой распространяются радиоволны.

Скорость электромагнитных колебаний в вакууме известна с точностью, достаточной для обеспечения любых измерений.

Для измерения времени при радиодальномерных измерениях используют два способа – прямой (абсолютный) и косвенный (фазовый).

## 6.2. Прямой способ измерения времени

Прежде всего определим, какие отрезки времени приходится определять и с какой точностью.

Расстояние 20 000 км от спутника до приемника радиоволна проходит примерно за 0,07 с. Составим таблицу временных интервалов и соответствующих им расстояний:

1с → 300 000 км	$10^{-3}$ с → 300 км	$10^{-6}$ с → 300 м
$10^{-7}$ с → 30 м	$10^{-8}$ с → 3 м	$10^{-12}$ с → 0,3 мм
$10^{-13}$ с → 0,03 мм	$10^{-14}$ с → 0,003 мм	

Напомним, что наземная служба времени обеспечивает точность  $10^{-13}$ – $10^{-14}$ , стандарт частоты спутников  $10^{-12}$ – $10^{-13}$ , а кварцевый стандарт приемника  $10^{-6}$ – $10^{-8}$ .

Задача определения времени сводится к измерению задержки сигнала спутника в приемнике. Для этого приемник вырабатывает точно такой же опорный сигнал с метками времени (дальномерными кодами), как и спутник, точно в одно и то же время. Решение задачи выполняется в три этапа:

- захват сигнала спутника соответствующим каналом приемника;
- выбор меток времени и установление их соответствия в сигнале спутника и опорном сигнале приемника;
- измерение временной задержки  $t$  (рис. 6.2).

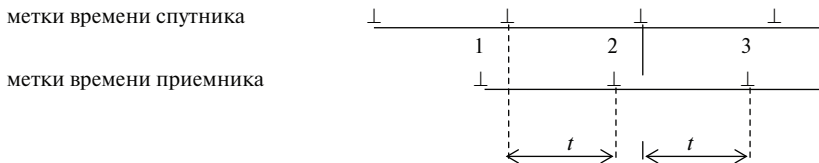


Рис. 6.2

Для измерения временной задержки  $t$  с достаточной точностью необходимо иметь в приемнике атомный стандарт частоты (часы) такого же уровня, как на спутнике. Однако это экономически нерентабельно. Используя кварцевый стандарт с нестабильностью  $10^{-7} \dots 10^{-8}$ , нельзя прямо измерить расстояние с точностью лучше  $30 \dots 3$  м, а добиться абсолютной синхронизации часов с разным ходом принципиально невозможно. Поэтому измеряемый отрезок времени  $t$  будет состоять из двух элементов:

$$t = t^{\text{ист}} + \Delta t, \quad (6.3)$$

где  $t^{\text{ист}}$  — истинная величина отрезка времени, за который радиосигнал проходит расстояние от спутника до приемника;

$\Delta t$  — поправка часов приемника относительно часов спутника.

Так как сама величина  $t$  незначительна, то поправку  $\Delta t$  для всех  $n$  одновременно измеряемых расстояний до  $n$  спутников можно считать одинаковой.

Подставив (6.3) в (6.1), получим расстояние до  $i$ -го спутника:

$$D_i = D_i^{\text{ист}} + \Delta D. \quad (6.4)$$

Измеряемые расстояния  $D_i$  в спутниковых определениях называются псевдодальностями, а сам рассматриваемый метод решения задачи иногда называется псевдодальномерным.

В пространственной системе координат расстояние  $D_i$  определяется по формуле

$$D_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad (6.5)$$

где  $X_i, Y_i, Z_i$  — координаты спутника,

$X, Y, Z$  — координаты приемника.

При определении положения точки линейной засечкой по трем спутникам получим три измеренных линии и четыре неизвестных:  $X, Y, Z, \Delta t$ .

Для нахождения четвертого неизвестного необходимо четвертое измерение, т. е. одновременно нужно наблюдать не менее четырех спутников.

Для оценки точности и получения надежного решения в геодезии принято выполнять избыточные измерения, т.е. необходимо одновременно наблюдать пять и более спутников.

По условиям прохождения радиосигнала в нижних слоях атмосферы обычно не используют спутники, находящиеся на высотах ниже

10° над горизонтом. Таких спутников может быть до пяти. С учетом сказанного рассчитывают необходимое число спутников в созвездии:

- минимальное число наблюдаемых спутников – 4...5
- максимальное число отсекаемых спутников – 4...5
- итого минимальное число видимых спутников – 9
- минимальное число спутников в системе – 18

Увеличение числа спутников в созвездии до 24-х дает возможность наблюдать одновременно 5...8 спутников и выбирать из измерений те, которые обеспечивают наибольшую точность определения местоположения.

В системе ГЛОНАСС на 2004 г. работало только 6 спутников, т. е. практически эту систему использовать нельзя. Ожидается её повторный ввод в строй в 2008-2010 гг.

### 6.3. Косвенный способ измерения времени (фазовые измерения при работе со спутниковыми системами)

Высокую, приемлемую для геодезических работ, точность при использовании СРНС получают с помощью фазовых измерений непосредственно на несущих частотах  $L_1$  и  $L_2$ . Такие измерения выполняются специальными геодезическими приемниками. В этом способе измерения ведут не по меткам времени (кодам), а так же, как в случае светодальномерных измерений, т. е. измерением фазы несущей частоты, длина волны которой порядка 20 см.

Полное изменение фазы  $\varphi$  сигнала, проходящего расстояние от спутника до приемника, будет

$$\varphi = 2\pi (N + \Delta),$$

а расстояние  $D$  будет определяться по известной формуле из гл. 5:

$$D = \lambda (N + \Delta), \quad (6.6)$$

где  $N$  – целое число,  $\Delta < 1$ .

Определение целого числа  $N$  называется разрешением неоднозначности. Определение дробной части  $\Delta$  называется измерением фазового домера (фазовой задержки) и выполняется с относительной погрешностью 1/100...1/400. При длине волны несущей порядка 20 см это соответствует 2...0,5 мм, т. е. точность фазовых измерений исключительно высока.

В разделе 5.3.2 было показано, что разрешение неоднозначности в современных светодальномерах обычно выполняется способом последовательного уточнения определяемого расстояния измерением на нескольких фиксированных (кратных) частотах с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , имеющих обычно соотношение 100:10:1. Числа  $N$  здесь невелики и определение их не представляет затруднений.

Второй способ – измерения с плавной перестройкой частоты, когда число неоднозначности  $N$  плавно изменяется на единицу (увеличивается или уменьшается), а в расстоянии укладывается целое число волн, т. е.  $\Delta = 0$ .

Этому случаю соответствуют выражения для расстояния:

$$\begin{aligned} D &= \lambda_1 N; \\ D &= \lambda_2 (N \pm 1); \\ D &= \lambda_3 (N \pm 2); \\ &\dots \end{aligned} \tag{6.7}$$

При известных значениях  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  в уравнениях (6.7) только два неизвестных:  $D$  и  $N$ . Для их определения достаточно составить два уравнения. Для контроля таких уравнений составляют больше двух.

Например:  $D = 60$  м;

$$\lambda_1 = 30 \text{ м}; N = 2; \lambda_2 = 20 \text{ м}; N + 1 = 3; \lambda_3 = 15 \text{ м}; N + 2 = 4 \text{ и т. д.}$$

Этот способ применялся во многих светодальномерах первого поколения. Идея плавного изменения числа  $N$  лежит в основе способа разрешения неоднозначности при фазовых спутниковых измерениях и выглядит так: вместо плавного изменения частоты при измерении одного расстояния можно выполнить измерения на одной частоте плавно изменяющегося расстояния.

В таком случае система уравнений (6.7) примет вид:

$$\begin{aligned} D_1 &= \lambda(N + \Delta_1); \\ D_2 &= \lambda(N + 1 + \Delta_2); \\ D_3 &= \lambda(N + 2 + \Delta_3); \\ &\dots \\ D_{n+1} &= \lambda(N + n + \Delta_{n+1}). \end{aligned} \tag{6.8}$$

Как только приемник захватил сигнал спутника, цифровой фазометр начинает непрерывно измерять величину фазового сдвига

и считать число переходов фазы через нуль, т. е. измерять величину  $(n + \Delta_{n+1})$ . Тогда число неоднозначности  $N$  остается постоянным для всех расстояний  $D_i$  от приемника до летящего спутника и может быть определено из системы (6.8).

Начальное значение  $D_i$ , а с ним и приближенное значение числа  $N$ , определяется измерением по меткам времени (дальномерным кодам).

Переход от расстояния  $D_i$  к расстоянию  $D_{i+1}$  должен выполняться плавно, без сбоев в приеме сигнала, чтобы не было срывов (пропусков единицы) в счете числа  $n$ .

Ранее указывалось, что при любых спутниковых измерениях появляется дополнительная неизвестная величина — поправка  $\Delta t$  часов приемника относительно часов спутника, которая одинакова для расстояний до всех одновременно наблюдаемых спутников. Таким образом, для фазового способа при одной серии измерения расстояний  $D_i^k$  до каждого из  $k$  одновременно наблюдаемых спутников неизвестными будут три координаты точки,  $k$  чисел  $N$  и одна поправка  $\Delta t$ :

$$Q = 3 + k + 1.$$

При выполнении  $M$  серий измерений число неизвестных будет  $Q = 3 + k + M$ , а всех измерений будет выполнено  $k \cdot M$ .

Очевидно, должно выполняться условие  $k \cdot M \geq 3 + k + M$ , откуда

$$M \geq \frac{3+k}{k-1}. \quad (6.9)$$

По формуле (6.9) необходимое число серий  $M$  для разного числа  $k$  одновременно наблюдаемых спутников составит:

$k$	2	3	4	5	6	7	8
$M$	6	4	3	2	2	2	2

На самом деле выполняется значительно большее число серий из-за того, что разрешение неоднозначности при спутниковых измерениях — исключительно сложная задача, так как  $N$  — очень большое число. Действительно, если  $\lambda = 0,2$  м,  $D = 20\,000$  км, то  $N = 100\,000\,000$ , а вычисление этого числа нужно выполнить с точностью  $\Delta N < 0,5$ .

Эту задачу решают с привлечением дополнительной информации, получаемой аналитическим путем из комбинации измерений.

Для этого образуют комбинированные волны из обеих несущих частот:  $L_1 + L_2$  и  $L_1 - L_2$ . Кроме того, образуют разности фаз последовательных измерений до одного спутника (первые разности) при измерениях двумя приемниками, разности фаз при измерениях до двух спутников (вторые разности), разности фаз между сериями измерений (третьи разности). Все это позволяет разрешить неоднозначность в единицы секунд. Задача разрешения неоднозначности называется *инициализацией измерений*.

## 6.4. Способы определения положения точек (позиционирования)

Способы определения положения приёмника делят на абсолютные и относительные. Абсолютными способами определяют координаты точек. Относительными способами находят приращения координат или расстояние (вектор) между двумя точками. Относительные способы иначе называют векторными (baselines). И в том, и в другом способах основные измерения выполняют точным – фазовым – методом. Одновременно с фазовыми измерениями для нахождения приближенных значений координат и определения числа  $N$  неоднозначности выполняют измерения абсолютным методом, т. е. измеряют расстояния по дальномерным кодам.

Точность способов существенно различна: от нескольких десятков метров до единиц миллиметров. Наибольшую точность обеспечивают относительные дифференциальные способы.

### 6.4.1. Абсолютные способы определения положения

Абсолютные определения делят на *автономные* и *дифференциальные*.

Автономность нужно понимать в том смысле, что положение точки определяется независимо от измерений на других точках. Таким образом, появляется возможность отойти от привычного понятия сети как системы пунктов, связанных между собой взаимной видимостью и поэтому занимающих вполне определенное геометрическое положение, часто далекое от объекта работы и поэтому неудобное.

Автономно положение точки определяют пространственной линейной засечкой. Определение координат сводится к составлению четырех уравнений типа (6.5), где неизвестные координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$

и поправка  $\Delta t$  к часам приемника выражены через четыре измеренных расстояния  $D_i, i = 1...4$ .

Все вычисления производятся микропроцессором приемника практически мгновенно, результат обновляется на табло 1–2 раза в секунду.

Точность определения координат зависит, очевидно, от точности стандартов частоты спутника и приемника, точности знания коэффициента преломления по трассе прохождения радиосигнала, точности знания координат спутников (эфемерид) в момент измерений, продолжительности наблюдений. Общая погрешность абсолютного определения положения точки с помощью СРНС составляет 15...30 метров.

Точность определения абсолютного положения можно повысить до 1...3 метров за счет выполнения дифференциальных измерений (DGPS).

Автономное определение координат сопровождается значительными погрешностями, но большинство из них имеет систематический характер и может быть исключено путем введения поправок.

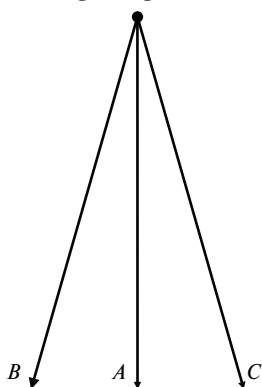


Рис. 6.3

Смысл дифференциального способа состоит в использовании двух спутниковых приемников: один из них — базовая станция — устанавливается на пункте  $A$  с известными координатами, а другой — подвижная станция — перемещается по точкам  $B, C \dots$  (рис. 6.3), координаты которых требуется определить. Расстояния  $AB, AC$  между приемниками (обычно  $< 10$  км) несоизмеримо меньше расстояний до спутника и поэтому радиосигналы от спутника до точек  $A, B, C$  идут по практически одинаковому пути, испытывая одинаковые задержки и искажения.

На базовой станции измеряют расстояния до спутников и сравнивают их с расстояниями, вычисленными по известным координатам. Разности измеренных и вычисленных расстояний называются дифференциальными поправками. Эти поправки передаются на подвижную станцию для исправления измерений. Передача осуществляется сразу по дополнительному цифровому каналу радиосвязи или после окончания измерений. В первом случае обработка измерений на подвижной стан-

ции выполняется сразу, т. е. в режиме реального времени (RT DGPS). Во втором случае требуется дополнительная обработка измерений с помощью ЭВМ. Такой режим называется постобработкой (postprocessing).

Дифференциальный способ используют и при абсолютном, и при фазовом способах измерений.

Дифференциальные поправки быстро стареют, поэтому базовый приемник производит непрерывные измерения расстояний и запись их в накопитель информации в течение всего периода работы подвижной станции.

В настоящее время во многих странах ведутся большие работы по созданию густой сети базовых станций с непрерывно работающими приёмниками. Это позволяет повысить точность абсолютных определений до 1 м.

#### 6.4.2. Относительные способы определения положения точек

Спутниковая аппаратура предназначена для работы в режимах «Статика» и «Кинематика». Точные измерения выполняют относительными способами.

Статический метод — основной и наиболее точный. Он состоит в накоплении результатов измерений двумя приемниками в течение продолжительного времени и последующей обработкой с помощью ЭВМ. При использовании одночастотных приемников требуется несколько часов работы на определяемой точке. При использовании двухчастотных приемников время сокращается до 10–20 минут и менее (быстрая статика).

Одна из станций установки приемника, местоположение которой выбрано в качестве исходного, считается базовой. Второй приемник перемещается по определяемым пунктам. При последующей обработке формируют разности измерений, выполненных двумя приемниками, определяют приращения координат и вектор, соединяющий станции. Разности координат свободны от большинства искажений. Таким образом, относительный способ есть определение не координат, а их приращений.

Дифференциальные поправки при этом не вычисляют, они автоматически устраняются из разностей.

Наилучшие результаты получаются при одновременной работе не двух, а трех приемников, два из которых подвижные. В этом случае появляются избыточные измерения и возможность надежного контроля результатов.

Псевдостатический метод заключается в повышении точности за счет повторных измерений (реокупации). Идея этого метода состоит в наблюдении спутников, расположенных иначе, то есть с другой геометрической формой засечки. Так как спутники движутся медленно, то заметное изменение их положения происходит примерно через час. Измерения организуют так, что на каждой определяемой точке приемник работает примерно 5–10 минут, а по прошествии 1–2 часов измерения на всех определяемых точках повторяют.

Статический метод требует наличия 4–5 спутников с хорошей геометрией и высоким качеством сигнала.

Кинематический метод — это работа в подвижном режиме. Идея этого метода состоит в ускоренном разрешении неоднозначности (инициализации) на базовой станции. Способ инициализации зависит от класса приёмников. Инициализация выполняется за 10–20 минут. После этого рабочий приёмник последовательно переносят на определяемые точки, где выполняют измерения в течение 5...30 секунд. В процессе съёмки подвижный приемник должен быть включен и связь со всеми наблюдаемыми спутниками должна поддерживаться постоянно. В случае потери сигнала (нарушения фазовой синхронизации) необходимо вернуться на точку, которая была ранее определена. Такой способ кинематического метода называется «стоя/иду».

Если не делать остановки на точках, а задать режим фиксации координат через заданные промежутки времени, то получится метод непрерывной кинематики, который позволяет определять положение точек относительно базовой станции с сантиметровой точностью.

При измерениях таким методом можно производить съёмку местности. Современные приёмники спутниковых сигналов комплектуются пакетами прикладных программ, позволяющих формировать цифровую модель местности и выдавать ее в дальнейшем с помощью ЭВМ и плоттера в виде плана местности.

Приёмники спутниковых сигналов непрерывно совершенствуются: появилась возможность работы со слабыми сигналами и низко расположенными спутниками, что, в свою очередь, приводит к возможности выполнять измерения вблизи стен, деревьев и других препятствий, экранирующих сигналы спутников, т.е. к расширению диапазона применения GPS-способа.

## 6.5. Обработка материалов спутниковых измерений

Получаемые из спутниковых определений координаты дают абсолютное положение точки в пространственной всемирной системе прямоугольных координат с началом в центре масс Земли. Эти координаты могут быть перевычислены в геодезические эллипсоидальные (широту, долготу, высоту над поверхностью эллипсоида) или прямоугольные координаты в какой-либо проекции эллипсоида на плоскость, например, в проекции Гаусса-Крюгера.

В СРНС GPS используется всемирная система геоцентрических координат WGS-84, в СРНС ГЛОНАСС – система координат ПЗ-90 (параметры Земли 1990 г.). Параметры преобразования координат из системы ПЗ-90 в систему WGS-84 достаточно точно известны:

$$\Delta x = -0,3 \text{ м}; \quad \Delta y = 2,2 \text{ м}; \quad \Delta z = 1,0 \text{ м}.$$

В настоящее время в России принята государственная программа установления связи между эллипсоидом Красовского и всемирным эллипсоидом, являющимся основой системы WGS-84, путем определения координат ряда пунктов государственной геодезической сети в системе WGS-84.

Пока же, до решения этой проблемы, преобразование координат, получаемых из спутниковых наблюдений, в системы, используемые на территории России, производится интерполяционным способом. Для этого на объекте работы определяют координаты не менее четырех пунктов государственной геодезической сети с помощью спутниковых приемников в статическом режиме. По разностям координат пунктов в двух системах: WGS-84 и местной – строят графики поправок, которые используют для трансформации координат, определяемых из спутниковых наблюдений, в местную систему.

Аналогично находят поправки за переход от отметок, определяемых при спутниковых наблюдениях, к отметкам в Балтийской системе.

Все современные спутниковые приемники снабжены стандартными программами предварительной и окончательной обработки измерений.

Предварительная обработка заключается в определении приращений геоцентрических координат каждого определяемого пункта по отношению к базовой станции и самих координат в системе WGS-84.

Окончательная обработка состоит в трансформации координат WGS-84 в местную систему.

## 7. НИВЕЛИРОВАНИЕ

Нивелированием, или вертикальными съемками называется определение превышений и высот точек местности.

Основных методов нивелирования два: *геометрическое и тригонометрическое*. Геометрическое нивелирование – это определение превышений горизонтальным лучом. Такое нивелирование выполняется с помощью нивелира и реек. Тригонометрическое нивелирование – это определение превышения наклонным лучом. Такое нивелирование выполняется с помощью теодолита. Точность геометрического нивелирования 0,2...50 мм/км, тригонометрического нивелирования 4...20 см/км.

### 7.1. Геометрическое нивелирование, нивелирный ход

Если в точках  $A$  и  $B$  установить отвесно рейки с делениями (линейки), а между рейками провести горизонтальный визирный луч (рис. 7.1), то превышение  $h$  можно определить по формуле

$$h = a - b, \quad (7.1)$$

где  $a$  и  $b$  – это расстояния по отвесной линии от точек  $A$  и  $B$  до горизонтального визирного луча. Прибор, дающий горизонтальный визирный луч, называется нивелир. Расстояния  $a$ ,  $b$  называются отсчетами по рейкам. Отсчет  $a$  называется задним, отсчет  $b$  – передним. Тогда превышение есть разность заднего и переднего отсчетов по рейкам.

Место установки нивелира называется станцией. Расстояние от нивелира до рейки называют плечом. Обычно нивелир устанавливают в середине между рейками, т. е. нивелируют с равными плечами. Если отметка  $H_A$  точки  $A$  известна, то отметку точки  $B$  можно вычислить через превышение:

$$H_B = H_A + h. \quad (7.2)$$

Отметку ГП визирного луча называют горизонтом прибора. Из рис. 7.1 следует

$$\text{ГП} = H_A + a = H_B + b. \quad (7.3)$$

Горизонт прибора – одно из важнейших и наиболее часто используемых в практике понятий. Через горизонт прибора отметку точки  $B$  можно вычислить по формуле

$$H_B = \text{ГП} - b. \quad (7.4)$$

Для передачи отметки на большие расстояния используют последовательное нивелирование, т. е. прокладывают нивелирный ход (рис. 7.2).

При этом нивелируемая линия  $AB$  разбивается на части, каждая из которых нивелируется с отдельной станции. Последовательно берут отсчеты по рейкам  $a_i, b_i$  и вычисляют превышения  $h_i = a_i - b_i$ , сумму превышений  $\sum h_i$  и отметку точки  $B$

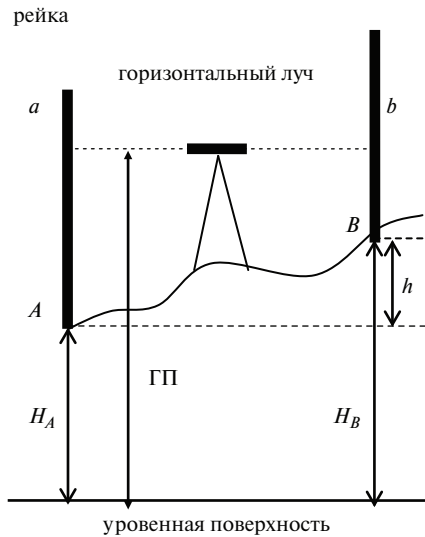


Рис. 7.1.

$$H_B = H_A + \sum h_i.$$

Общие для смежных станций точки (точка 1 для станций 1 и 2) называются связующими. Отсчеты на них по одной и той же рейке берут дважды: сначала передний  $b_i$ , затем задний  $a_{i+1}$ . Отметки этих точек вычисляют по формуле (7.2).

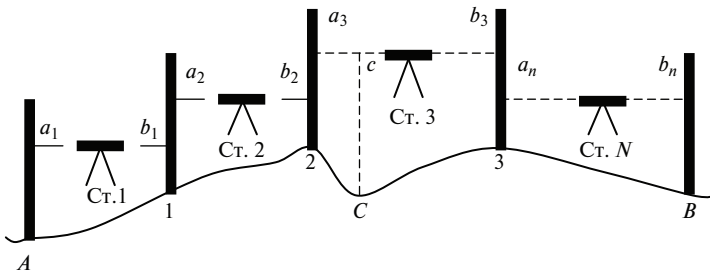


Рис. 7.2

Для характеристики профиля при прокладке нивелирного хода определяют отметки характерных точек местности. Для этого на них устанавливают рейку (точка  $C$ ) и берут отсчет ( $c$ ). Такие точки называют промежуточными, их отметки вычисляют по формуле (7.4) через горизонт прибора.

## 7.2. Нивелиры и рейки, их типы

### 7.2.1. Устройство нивелиров

Нивелир – прибор для определения превышений горизонтальной линией визирования.

По точности нивелиры делят на высокоточные (Н-05), точные (Н-2, Н-3) и технические (Н-5, Н-10). Число в обозначении марки (шифре) прибора означает среднюю квадратическую погрешность (в миллиметрах) измерения превышения на один километр двойного хода (прямо-обратно). Например, с помощью нивелира Н-3 можно определить превышение между двумя точками, расстояние между которыми равно 1 км, со средней квадратической погрешностью не более 3 мм.

По способу приведения визирной оси в горизонтальное положение различают нивелиры с цилиндрическим уровнем (Н-05, Н-3, Н-5) и нивелиры с компенсатором (Н-2К, Н-3К, Н-10К).

У уровенных нивелиров визирная ось трубы устанавливается горизонтально с помощью скрепленного с трубой точного цилиндрического уровня. Приведение в нульпункт пузырька этого уровня перед отсчетом по рейке выполняется с помощью специального элевационного винта.

У нивелиров с компенсатором приближенное горизонтирование прибора выполняется с помощью круглого (малоточного) уровня, а точно визирная ось трубы устанавливается в горизонтальное положение автоматически с помощью специального оптико-механического маятника – компенсатора.

Например, в новом нивелире 3Н-2КЛ Уральского оптико-механического завода (рис. 7.3) впервые применен компенсатор в виде плоского свободно подвешенного зеркала  $A$ . Прямоугольная призма 1 с сеткой 3 закреплена на объективе 4, а вторая призма 2 – на корпусе трубы. При отклонении оси вращения прибора от вертикального положения к смещенной сетке 3 приходит луч от отсчета, соответствующего горизонтальному положению визирной оси. Одновременно

зеркало *A* используется вместо отрицательной линзы в качестве фокусирующего элемента. Оптический клин 5 служит для юстировки положения визирной оси.

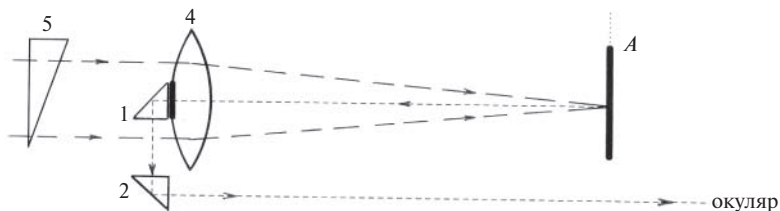


Рис. 7.3

Большинство современных нивелиров имеют горизонтальный лимб, позволяющий измерять и откладывать горизонтальные углы. В обозначении марки таких приборов добавлена буква Л, например 3Н-5Л, 3Н-2КЛ.

Автоматизация процесса нивелирования идет по пути создания цифровых нивелиров, в которых отсчет по рейке производится автоматически, запоминается и обрабатывается в накопителе информации. Работа наблюдателя сводится только к установке прибора и наведении на рейку.

Если перед окуляром трубы вместо глаза наблюдателя установить источник лазерного излучения, то на выходе трубы нивелира получим горизонтальный визирный луч, который будет проецироваться на рейку в виде более или менее четкой яркой точки. Такое устройство называется лазерным нивелиром. Главное достоинство этих приборов – видимый визирный луч. Отсюда другое название лазерного нивелира – лазерный указатель направления (ЛУН).

Лазерные нивелиры, как и обычные, выпускаются с цилиндрическими уровнями и с компенсаторами, при этом последним отдается предпочтение. С помощью различных оптико-механических систем луч можно поворачивать на  $90^\circ$ , разворачивать в плоскость. Серия таких приборов названа лазерными приборами для строительства и получила за рубежом широчайшее распространение. Одна только фирма Амман Лазертехник, Швейцария за последние 15 лет выпустила более 100 различных модификаций лазерных приборов:

- указатели горизонтальных и вертикальных направлений и плоскостей;

– указатели горизонтальных и наклонных направлений для укладки трубопроводов, проходки тоннелей и т. п.;

– нивелиры, задающие сразу две взаимно перпендикулярные плоскости;

– лазерные центриры и т. д.

Схемы осей нивелиров разных типов показаны на рис. 7.4, 7.5.

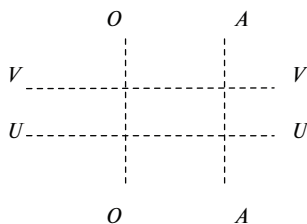


Рис. 7.4

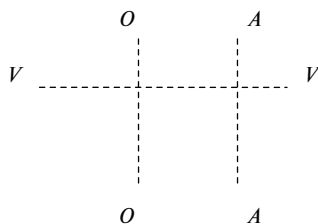


Рис. 7.5

В процессе нивелирования оси прибора должны занимать следующее положение:

– визирная ось трубы в момент отсчета по рейке должна быть горизонтальна (главное условие любого нивелира); для нивелира с цилиндрическим уровнем это условие можно записать так: визирная ось  $VV$  должна быть параллельна оси цилиндрического уровня  $UU$ ;

– ось круглого уровня  $AA$  должна быть параллельна оси вращения прибора  $OO$ .

### 7.2.2. Проверка главного условия нивелира

Эта проверка выполняется способом двойного нивелирования двух точек, расстояние между которыми  $d$  выбирают порядка 50–75 м. Первое нивелирование выполняется из середины, второе – с неравными плечами.

На точках  $A$  и  $B$  устанавливают рейки, между ними точно в середине устанавливают нивелир, приводят его в рабочее положение и берут отсчеты по рейкам  $a_1$  и  $b_1$ . Вычисляют правильное значение превышения

$$h_1 = a_1 - b_1.$$

Переносят нивелир и устанавливают его перед точкой  $B$  на расстоянии 1,5–2 м. Приводят прибор в рабочее положение, берут отсчеты по тем же рейкам  $a_2$ ,  $b_2$  и снова вычисляют превышение:

$$h_2 = a_2 - b_2.$$

Вычисляют разность полученных превышений  $x = h_1 - h_2$  и угол  $i$  негоризонтальности визирной оси нивелира (в секундах) по формуле

$$i = 2 \cdot 10^5 \cdot x / d.$$

По действующим инструкциям допустимая величина угла равна  $10''$ , что соответствует 2,5 мм в отсчете по рейке при  $d = 50$  м.

Если значение угла негоризонтальности превышает допуск, производят юстировку нивелира. Для этого вычисляют правильный отсчет  $a'_2$  на дальнюю рейку, при котором визирная ось будет горизонтальной

$$a'_2 = a_2 + x = b_2 + h_1.$$

Пример:  $a_1 = 1578$        $b_1 = 1225$        $h_1 = + 353$   
 $a_2 = 1420$        $b_2 = 1090$        $h_2 = + 330$

$$x = + 23 > 2,5 \text{ мм} \quad a'_2 = 1420 + 23 = 1090 + 353 = 1443.$$

При юстировке нивелиров с компенсатором центр сетки нитей совмещают с правильным отсчетом  $a'_2$ , вращая вертикальные юстировочные винты сетки нитей. Таких винтов может быть два или один.

При юстировке нивелиров с цилиндрическим уровнем правильный отсчет устанавливают на рейке с помощью элевационного винта. При этом пузырек цилиндрического уровня отклонится от нуля. Вращая шпилькой вертикальные юстировочные винты этого уровня, возвращают пузырек в нульпункт. Юстировочные винты расположены под крышкой всегда слева от окуляра.

Для контроля после выполнения юстировки поверку повторяют. Например:  $a_3 = 1444$   $b_3 = 1090$   $h_3 = + 354$   $x = h_1 - h_3 = - 1 \text{ мм} < 2,5 \text{ мм}$ .

### 7.2.3. Нивелирные рейки

В комплект любого нивелира входит пара реек. Нивелиры Н-05 должны снабжаться рейками РН-05, нивелиры Н-2, Н-3 – рейками РН-3, нивелиры Н-5, Н-10 – рейками РН-10.

Рейки РН-3, РН-10 – это обычно деревянные (металлические, пластмассовые) бруски (цельные, складные, раздвижные) длиной 3 м с сантиметровыми делениями. Точность отсчета по шкалам таких реек 1 мм. Рейки обычно двусторонние с двумя шкалами – основной и дополнительной. На основной шкале с началом рейки (пяткой)

совпадает отсчет 0, на дополнительной начало счета сдвинуто на величину, превышающую длину рейки. Рейка РН-05 представляет собой коробку, внутри которой натянута лента из специальной стали – инвара, термический коэффициент которого практически равен нулю. На ленте нанесены две шкалы штрихов – основная и дополнительная. Дополнительная шкала сдвинута относительно основной на 2,5 мм. Расстояние между осями смежных штрихов 5 мм соответствует одному делению рейки. Нивелирование по таким рейкам производится способом *совмещений*, при котором с помощью специального оптического микрометра визирную ось трубы совмещают с осью штриха рейки, а величину перемещения измеряют по шкале микрометра с точностью 0,05 мм.

В последнее время стали выпускаться пластмассовые раздвижные рейки с метровыми секциями. Секций может быть от трех до шести. На одной стороне таких реек нанесена обычная шкала с сантиметровыми делениями, на другой стороне – шкала с миллиметровыми делениями.

На рейках, которыми комплектуются цифровые нивелиры, вместо равномерной метрической шкалы нанесен специальный штрихкод, изображение которого проецируется на цифровое фотоприемное устройство нивелира. Такая рейка при нивелировании должна быть достаточно ярко освещена.

### 7.3. Основные источники погрешностей геометрического нивелирования, ослабление их влияния

Нивелирование сопровождается накоплением систематических и случайных погрешностей, которые возникают от недостатков нивелира и реек, несовершенства глаза наблюдателя, изменения визирного луча под влиянием внешней среды. Для ослабления влияния этих погрешностей нивелир тщательно юстируют, при нивелировании используют специальную методику измерений, в результаты измерений вводят поправки.

#### Влияние негоризонтальности визирного луча в момент отсчета по рейке

Из-за неточного выполнения главного условия любого нивелира визирная ось трубы в момент отсчета всегда будет отклонена от горизонтального положения на угол  $i$  (рис.7.6). Вследствие этого на зад-

ней рейке увидим отсчет  $a_1$ , отличающийся от отсчета  $a_0$  на величину  $x_1$ , а на передней рейке – отсчет  $b_1$ , отличающийся от отсчета  $b_0$  в ту же сторону на величину  $x_2$ .

Выразим превышение между точками через видимые отсчеты:

$$h = a_0 - b_0 = (a_1 + x_1) - (b_1 + x_2) = (a_1 - b_1) + (x_1 - x_2).$$

Если нивелир установлен точно в середине между рейками, то

$$x_1 = x_2 \quad \text{и} \quad h = a_0 - b_0 = a_1 - b_1.$$

**Вывод:** при нивелировании из середины влияние невыполнения главного условия нивелира на результат исключается.

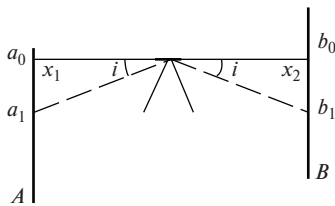


Рис. 7.6

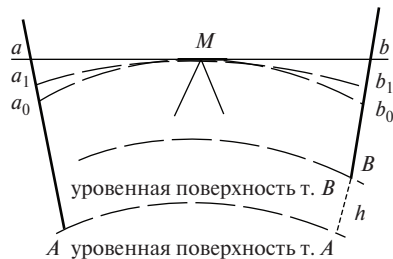


Рис. 7.7

### Влияние кривизны Земли и рефракции

Превышение между точками – это расстояние между урвненными поверхностями точек  $A$  и  $B$  (рис. 7.7). Для его определения нужно брать отсчет по рейкам не горизонтальным лучом ( $a, b$ ), а урвненной кривой нивелира  $a_0Mb_0$ . Расстояния  $aa_0 = v_1$  и  $bb_0 = v_2$  есть поправки в отсчеты за кривизну Земли.

Вследствие искривления в приземных слоях воздуха визирный луч пойдет не по прямой, а по рефракционной кривой  $a_1Mb_1$  и вместо отсчетов  $a, b$  увидим отсчеты  $a_1, b_1$ . Расстояния  $a_1a = r_1$  и  $b_1b = r_2$  есть поправки в отсчеты за рефракцию. Эти поправки тем меньше, чем выше над поверхностью проходит визирный луч, т. е. чем больше отсчеты по рейкам.

Выразим отсчеты  $a_0, b_0$  через видимые отсчеты  $a_1, b_1$  и поправки за кривизну Земли и рефракцию:

$$a_0 = a_1 + r_1 - v_1; \quad b_0 = b_1 + r_2 - v_2.$$

Тогда

$$h = a_0 - b_0 = (a_1 - b_1) + (r_1 - r_2) - (v_1 - v_2).$$

Если нивелир установлен точно в середине между рейками, то

$$r_1 \approx r_2, v_1 = v_2 \text{ и } h = a_0 - b_0 = a_1 - b_1.$$

**Вывод:** при нивелировании из середины влияние кривизны Земли устраняется полностью, а влияние рефракции существенно ослабляется.

Из сказанного следует, что нивелирование из середины является основным способом выполнения геометрического нивелирования, при котором полностью устраняются основные систематические погрешности. Чем точнее выполняемое нивелирование, тем точнее должно соблюдаться равенство расстояний от нивелира до реек и тем большим должен быть минимальный допустимый отсчет по рейке. Эти показатели регламентируются инструкциями и наставлениями.

#### Влияние на отсчет неперпендикулярности рейки

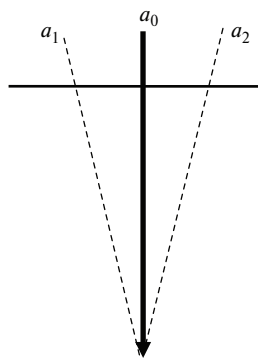


Рис. 7.8

На рис. 7.8 показано: если рейка в момент отсчета неперпендикулярна, то отсчеты  $a_1$ ,  $a_2$  будут больше отсчета  $a_0$ , соответствующего отвесному положению рейки.

Из этого следует методика работы: рейку покачивают в вертикальной плоскости, проходящей через нивелир, и выбирают наименьший отсчет.

В точных работах рейку в отвесное положение устанавливают с помощью укрепленного на ней круглого уровня.

#### Личные погрешности наблюдателя

Личные погрешности наблюдателя возникают при оценке на глаз среднего положения пузырька уровня и десятых долей наименьшего деления шкалы рейки. Повышение точности приведения пузырька цилиндрического уровня в нульпункт достигается применением специальной призмочной контактной системы (нивелир Н-3) или зеркала (нивелир Н-5) /5/. Для уменьшения погрешности от-

считывания по шкалам нивелиры снабжают трубами повышенного увеличения ( $30\times$  у нивелиров Н-3, Н-3К, Н-2К,  $40\times$  у нивелира Н-05) и специальными оптическими микрометрами (нивелир Н-05).

#### Влияние неправильности длины и разности нулей в комплектной паре реек

В комплект нивелира входят две рейки. Если величина метровых интервалов рейки не соответствует номинальной, то в результатах нивелирования появится систематическая погрешность, пропорциональная величине общего превышения по ходу. Как любой мерный прибор, рейки компарируют и определяют среднюю для всех шкал комплекта длину метра, а результаты исправляют поправкой за компарирование.

Если на точку последовательно поставить рейки комплекта и взять отсчеты по основным и дополнительным шкалам, то разность отсчетов по основным шкалам должна равняться нулю, а по дополнительным шкалам 100 мм. Невыполнение этого условия есть погрешность в превышении за разность высот нулей пары реек. Для компенсации этой (систематической) погрешности при нивелировании используют чередование реек и, кроме того, в точных работах делают число станций в ходе четным.

На рис. 7.2 показано, что при переходе нивелира со станции 1 на станцию 2 задняя рейка из точки А переходит в точку 2 и становится передней, а рейка в точке 1 остается на месте. О чередовании реек свидетельствует чередование знаков ( $\pm 100$  мм) в разности превышений, определенных на станции по основным и дополнительным шкалам пары реек.

Накопление всех перечисленных погрешностей регламентируется для каждого типа прибора инструкциями и наставлениями по производству нивелирования разной точности.

### 7.4. Тригонометрическое нивелирование

Тригонометрическое нивелирование используют там, где геометрическое нивелирование затруднено: при передаче отметки через болота, озера, реки, в горных районах, — или где не требуется высокой точности определения превышения.

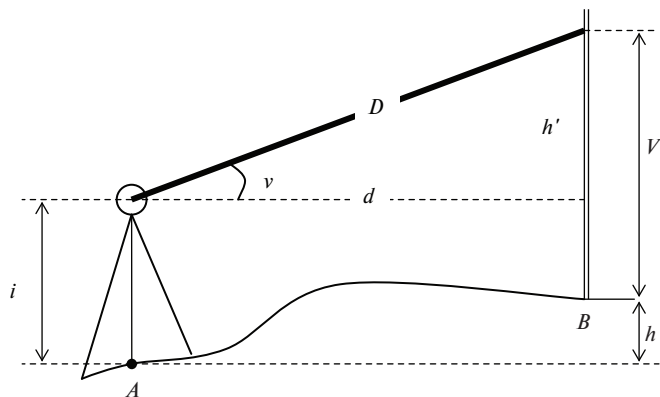


Рис. 7.9

Если в точке  $A$  местности установить теодолит, а в точке  $B$  — рейку (или веху) и навести трубу на отсчет по рейке  $V$ , то из рис. 7.9 следует

$$h + V = h' + i,$$

откуда превышение  $h$  между точками  $A$  и  $B$   $h = h' + i - V$ , (7.5) где  $h'$  — превышение, вычисленное по углу наклона  $v$  и расстоянию  $D$ ,  $i$  — высота прибора.

Если центр сетки наведен на отсчет по рейке  $V = i$ , то  $h = h'$ .

Если расстояние измеряется светодальномером или лентой, то

$$h' = D \cdot \sin v, \quad (7.6)$$

если расстояние измеряется нитяным дальномером по рейке, то (см. 6.3.3)

$$D = D' \cdot \cos v$$

$$\text{и} \quad h' = D' \cdot \cos v \cdot \sin v = 0,5 D' \cdot \sin 2v, \quad (7.7)$$

где  $D'$  — дальномерное расстояние.

Таким образом, тригонометрическое нивелирование состоит в измерении угла наклона  $v$ , расстояния  $D$ , высоты прибора  $i$ , высоты наведения центра сетки на рейку  $V$  (высоты визирования).

Как и при геометрическом нивелировании, на результаты тригонометрического нивелирования оказывают влияние кривизна Зем-

ли и рефракция, т.е. искривление визирного луча в приземных слоях воздуха. Поэтому при расстояниях больше 300 м в результаты тригонометрического нивелирования вводят поправку  $f$  за кривизну Земли и рефракцию, вычисляемую по формуле

$$f = 0,067 D^2, \text{ см,}$$

где  $D$  — расстояние в сотнях метров:

$f$ , см	1	2	3	4	5
$D$ , сотни м	3,9	5,5	6,8	7,8	8,7

Влияние кривизны Земли исключается полностью, а влияние рефракции в значительной мере компенсируется, если измерение углов наклона выполнять в прямом и обратном направлении.

Наибольшее применение тригонометрическое нивелирование получило при съемке рельефа (например, съемка «больных» мест земляного полотна железной дороги).

Современный прибор для выполнения тригонометрического нивелирования — электронный тахеометр. Одним из режимов работы электронного тахеометра является режим тригонометрического нивелирования, при котором на табло сразу появляются значения  $D, d, h$ .

## 8. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОПОРНЫЕ СЕТИ

Геодезическая опорная сеть (ГОС) – совокупность закрепленных на местности пунктов, координаты которых известны.

### 8.1. Назначение, принцип построения, виды и классификация ГОС, закрепление пунктов ГОС

Главным назначением ГОС является создание возможности выполнения любых геодезических работ в единой системе координат и высот и их надежного контроля.

ГОС создаются по основному метрологическому принципу перехода от общего к частному, т. е. по принципу перехода от фигур с длинными сторонами и высокой точностью измерений к фигурам с более короткими сторонами и измерениям меньшей точности. При этом достигается экономия средств и возможность работы многих исполнителей.

ГОС делят на плановые и высотные. Для выполнения специальных задач могут создаваться геодезические сети специального назначения, например создаваемая сейчас специальная реперная система для контроля плана и профиля железнодорожного пути.

По государственной классификации ГОС делят на:

- государственную геодезическую сеть;
- геодезические сети сгущения 1-го и 2-го разрядов;
- съемочные сети.

Пункты плановых ГОС закрепляют на местности подземными (или стенными) центрами и наземными знаками. Центр долговременно сохраняет координаты пункта. Знак обозначает положение пункта на местности, может служить высоким штативом для установки геодезического прибора и визирной цели. Такие знаки называются сигнал или пирамида.

Конечный продукт построения ГОС – закрепленные на местности пункты и каталог их координат и высот.

## 8.2. Методы построения плановых ГОС

При любых геодезических работах измеряют только два элемента: углы и линии. Комбинация этих двух элементов дает три способа определения положения точки относительно исходной линии:

- способ угловой засечки, когда положение точки определяется двумя углами;
- способ линейной засечки, когда положение точки определяется двумя линиями;
- полярный способ, когда положение точки определяется углом и линией.

Этим трем способам соответствуют три традиционных метода построения плановых ГОС: триангуляция, трилатерация и полигонометрия. Координаты пунктов при использовании любого из этих методов вычисляют по формулам прямой геодезической задачи, причем обязательно должны быть известны три элемента: координаты первого (исходного) пункта и дирекционный угол первой (исходной) стороны.

**Триангуляция** – сеть примыкающих друг к другу треугольников, в которых измеряются все углы и некоторые стороны – базисы. Смысл триангуляции – определение положения точки способом угловой засечки. Триангуляция известна более 500 лет и до недавнего времени являлась главным методом построения опорных сетей во всем мире. Основным прибор для построения триангуляции – теодолит.

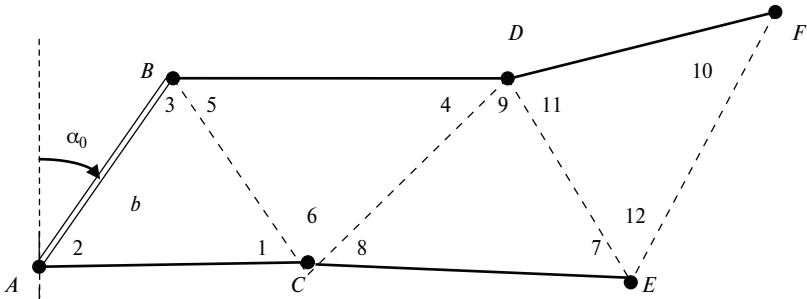


Рис. 8.1

На рис. 8.1 показана цепочка треугольников триангуляции, в которой известны координаты пункта  $A(x_A, y_A)$ , дирекционный угол  $\alpha_{AB}$  и длина  $d_{AB}$  стороны  $AB$  (базиса) и измерены все углы. Требуется

найти координаты пунктов  $B, C, \dots F$  по формулам прямой геодезической задачи:

$$\begin{aligned}
 x_B &= x_A + d_{AB} \cos \alpha_{AB}; \\
 y_B &= y_A + d_{AB} \sin \alpha_{AB}; \\
 x_C &= x_B + d_{BC} \cos \alpha_{BC}; \\
 y_C &= y_B + d_{BC} \sin \alpha_{BC}; \\
 &\dots \\
 x_F &= x_E + d_{EF} \cos \alpha_{EF}; \\
 y_F &= y_E + d_{EF} \sin \alpha_{EF}.
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Линия  $ABCDEF$ , соединяющая все определяемые пункты, называется *ходовой*. Задача сводится к нахождению длин и дирекционных углов сторон ходовой линии. Длины сторон вычисляются последовательно от треугольника к треугольнику по теореме синусов, при этом сторона предыдущего треугольника служит базисом для решения последующего треугольника:

$$\begin{aligned}
 d_{BC} &= d_{AB} \frac{\sin 2}{\sin 1}; \\
 d_{CD} &= d_{BC} \frac{\sin 5}{\sin 4} = d_{AB} \frac{\sin 2 \cdot \sin 5}{\sin 1 \cdot \sin 4}; \\
 &\dots \\
 d_{EF} &= d_{ED} \frac{\sin 11}{\sin 10} = d_{AB} \frac{\sin 2 \cdot \sin 5 \cdot \sin 8 \cdot \sin 11}{\sin 1 \cdot \sin 4 \cdot \sin 7 \cdot \sin 10}.
 \end{aligned} \tag{8.2}$$

Дирекционные углы сторон последовательно вычисляются по формуле передачи (п. 2.4.2, формула 2.1):

$$\begin{aligned}
 \alpha_{BC} &= \alpha_{AB} + 180^\circ - 3; \\
 \alpha_{CD} &= \alpha_{BC} + 180^\circ + 6 = \alpha_{AB} - 3 + 6 + 180^\circ n; \\
 &\dots
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

$$\alpha_{EF} = \alpha_{DE} + 180^\circ + 12 = \alpha_{AB} - 3 + 6 - 9 + 12 + 180^\circ n,$$

где  $n$  – число передач дирекционного угла.

**Трилатерация** – сеть примыкающих друг к другу треугольников, в которых измеряются все стороны. Смысл трилатерации – определение положения точки линейной засечкой. Основным прибор для построения трилатерации – светодальномер.

Пусть на рис. 8.1 изображена цепочка треугольников трилатерации, в которой известны координаты пункта  $A(x_A, y_A)$ , дирекционный угол  $\alpha_{AB}$  и измерены длины всех сторон. Для определения координат пунктов  $B, C, \dots, F$  по формулам (8.1) углы треугольников, входящие в формулы (8.3), вычисляются по измеренным сторонам с помощью теоремы косинусов:

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2AB \cdot BC \cos 3;$$

$$BD^2 = BC^2 + CD^2 - 2BC \cdot CD \cos 6;$$

...

$$DF^2 = DE^2 + EF^2 - 2DE \cdot EF \cos 12;$$

откуда

$$3 = \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2AB \cdot BC};$$

...

(8.4)

$$12 = \arccos \frac{DE^2 + EF^2 - DF^2}{2DE \cdot EF}.$$

**Полигонометрия** – линейно-угловой ход, в котором измерены все стороны и все углы между смежными сторонами. Смысл полигонометрии – определение положения точек полярным способом. Основным прибор для построения полигонометрии – электронный тахеометр.

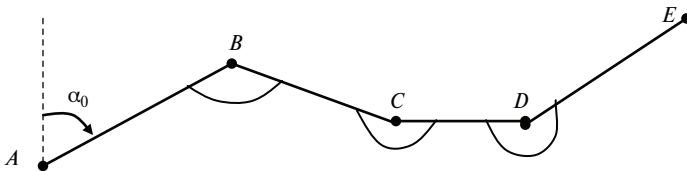


Рис. 8.2

На рис. 8.2 показан полигонометрический ход, для которого известны координаты пункта  $A(x_A, y_A)$ , дирекционный угол  $\alpha_{AB}$ , измерены все стороны и углы между смежными сторонами (правые или левые). Для определения координат пунктов  $B, C, D, E$  сначала вычисляют дирекционные углы по формулам (8.3), а затем находят координаты по формулам (8.1).

Триангуляция и трилатерация требуют построения на местности треугольников выгодной геометрической формы, т. е. близких к равносторонним, при этом должна обеспечиваться видимость на все смежные пункты. Это приводит к необходимости располагать пункты ГОС на возвышениях, а в закрытой местности строить высокие сигналы.

Основное достоинство метода триангуляции состоит в надежном контроле качества всех измерений и высокой жесткости создаваемой сети: в каждом треугольнике выполняется избыточное измерение, приводящее к появлению условного уравнения.

В треугольнике трилатерации нет избыточных измерений, поэтому для надежного контроля приходится вводить дополнительные связи — диагонали.

Метод полигонометрии более гибкий, он требует видимости только по двум смежным направлениям и позволяет располагать пункты ГОС в местах, наиболее благоприятных для их последующего использования.

Триангуляция была главным методом создания ГОС всех классов и разрядов до появления электронных дальномеров. Внедрение в практику светодальномеров сделало основным методом полигонометрии, особенно при создании местных сетей сгущения и съемочных сетей.

Метод трилатерации применяется редко, в основном при создании опорных сетей специального назначения.

Во всех традиционных методах обязательна взаимная видимость между смежными пунктами.

На современном этапе основным для построения ГОС становится спутниковый метод. Он не требует обязательной взаимной видимости между пунктами.

### 8.3. Государственная плановая геодезическая сеть

Государственная геодезическая сеть является носителем государственной геодезической системы координат.

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

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

- установление и распространение государственной системы координат на всей территории страны и поддержание ее на уровне современных и *перспективных* требований;
- геодезическое обеспечение картографирования территории страны;
- геодезическое обеспечение изучения земельных ресурсов;
- обеспечение решения задач геодинамики, навигации, метрологии.

Созданная к современному периоду ГГС включает в себя: *космическую геодезическую сеть* (КГС) из 26-ти пунктов при средних расстояниях между ними 1000...1500 км. Пункты этой сети определены по наблюдениям ИСЗ отечественной системы ГЕОИК. КГС задает общеземную геоцентрическую систему координат;

— *доплеровскую геодезическую сеть* (ДГС) из 110 пунктов при средних расстояниях между ними 500...700 км. Пункты этой сети определены по наблюдениям ИСЗ системы ТРАНЗИТ (США). ДГС распространяет общеземную систему координат;

— *астрономо-геодезическую сеть 1 и 2 класса* (АГС) из 164 000 пунктов при средних расстояниях между ними 12 км. АГС задает на территории страны геодезическую *референциную* систему координат и распространяет общеземную систему координат;

— *геодезические сети 3 и 4 классов* из 170 000 пунктов при средних расстояниях между пунктами 3 класса 6 км, 4 класса — 3 км. Сети 3 и 4 классов создаются для обеспечения доступности и точности передачи координат потребителям.

ГГС — главная плановая основа топографических съемок всего масштабного ряда.

Положение пунктов ГГС определяется в двух системах координат — общеземной и референционной. Пункты ГГС в этих двух системах задаются:

- пространственными прямоугольными координатами  $X, Y, Z$ ;
- геодезическими эллипсоидальными координатами  $B, L$ ;

– прямоугольными координатами  $x$ ,  $y$  в проекции Гаусса эллипсоида на плоскость, вычисленными по шестиградусным зонам.

Отметки всех пунктов ГГС определяют из геометрического или тригонометрического нивелирования.

Точность взаимного положения пунктов ГГС в системе координат СК–95 составляет 2–4 см при расстояниях 10–15 км, 10–20 см при расстояниях 100–200 км и 0,5–0,8 м при расстояниях порядка 1000 км.

Площадь территории России составляет 17,1 млн кв. км. Общее количество пунктов ГГС 1, 2, 3 и 4 классов – 445 тысяч, средняя плотность – один пункт на 38 кв. км. Для поддержания ГГС на современном уровне выполняется периодическое обследование и восстановление пунктов и знаков.

Об истории создания ГГС, её схеме и программе, типах центров пунктов и знаков можно прочитать в любом учебнике геодезии.

## 8.4. Государственная нивелирная сеть

Наряду с ГГС создана государственная нивелирная сеть (ГНС). Нормальные высоты пунктов ГНС определяются в Балтийской системе, исходным началом которой является нуль Кронштадтского футштока.

Метод создания ГНС – геометрическое нивелирование.

Созданная к современному периоду ГНС включает в себя:

– высокоточную сеть нивелирования I и II классов, состоящую из 110 полигонов I класса общей протяженностью 115 000 км и 850 полигонов II класса общей протяженностью 340 000 км. Любая точка территории страны удалена от линий I и II классов не более чем на 75 км. Нивелирная сеть I и II классов распространяет по всей охваченной ею территории единую Балтийскую систему высот. По результатам нивелирования I и II классов определены разности уровней морей;

– нивелирные сети III и IV классов, проложенные внутри полигонов сети высших классов и служащие для обеспечения съемок всех масштабов и инженерных изысканий.

Нивелирные сети закрепляют на местности постоянными знаками: фундаментальными реперами и рядовыми знаками, к которым относятся грунтовые реперы, стенные марки и реперы. Фундаментальные реперы устанавливаются через 50...80 км на линиях I и II классов. Рядовые реперы и марки устанавливают на линиях ни-

велирования всех классов через 5...7 км. Каждому нивелирному знаку присваивают номер. На территории России общее количество нивелирных знаков, закрепляющих ГНС, более 512 000, средняя плотность – один нивелирный знак на 34 кв. км.

Линии государственного нивелирования проложены вдоль всех железных дорог России.

## 8.5. Геодезические сети сгущения

Геодезические сети сгущения создаются различными организациями для дальнейшего сгущения до необходимой плотности геодезической основы при крупномасштабных съемках и выполнении инженерно-геодезических работ. Нормативы плотности определяются соответствующими инструкциями.

**Плановые сети сгущения** 1 и 2 разрядов создают преимущественно методом полигонометрии в виде самостоятельных сетей или как дальнейшее сгущение ГГС. В последнем случае линии полигонометрии прокладывают между пунктами ГГС отдельными ходами или системами с узловыми точками. Измерения в сетях сгущения 1 и 2 разрядов выполняют электронными тахеометрами, точными теодолитами, топографическими светодальномерами. Пункты плановых сетей сгущения закрепляются постоянными центрами упрощенной конструкции, типы которых указываются в инструкциях по производству работ. На незастроенных территориях над центром или рядом с ним устанавливают опознавательный знак в виде металлической пирамидки или бетонного столба с надписью: «Геодезический пункт. Охраняется государством». Отметки всех пунктов плановых сетей сгущения должны быть определены из геометрического нивелирования.

**Техническое нивелирование.** Высотные сети сгущения создают методом *геометрического* нивелирования технической точности. Знаки линий технического нивелирования могут быть совмещены с центрами пунктов плановых сетей или представлять собой рядовые реперы грунтового или стенного типа.

Линии технического нивелирования прокладывают между двумя исходными реперами отдельными ходами или системами с узловыми точками.

Длины ходов технического нивелирования определяются в зависимости от высоты сечения рельефа. Для производства технического

нивелирования используют нивелиры типа Н-3, Н-5, Н-10 уровенные или с компенсатором в комплекте с шашечными рейками.

Нивелирование выполняют в одном направлении. Допустимая длина визирного луча 200 м. Невязки ходов и полигонов не должны превышать

$$f_h = 50\sqrt{L}, \text{ мм},$$

где  $L$  – длина хода (полигона) в километрах.

В процессе технического нивелирования попутно нивелируют отдельные характерные точки местности, включая их в ход в качестве промежуточных.

## 8.6. Построение геодезических опорных сетей с использованием спутниковых измерений, спутниковое нивелирование

В гл. 6 показано, что использование в геодезических целях спутниковых навигационных систем позволяет по-новому подходить к вопросам построения геодезических опорных сетей. Спутниковыми методами можно строить любые опорные сети: государственные, сети сгущения, съемочные – и производить саму съемку.

Спутниковые методы по сравнению с традиционными обладают рядом преимуществ. Это: возможность оперативной и точной передачи координат на любые расстояния; необязательная взаимная видимость между пунктами, что позволяет располагать пункты в местах, наиболее благоприятных для их сохранности и последующего использования, без сооружения геодезических знаков; снижение требований к плотности геодезической основы, позволяющее в десятки раз сократить число опорных пунктов; простота организации работ, особенно в труднодоступных и климатически сложных районах; высокий уровень автоматизации, отсутствие технической зависимости от времени суток, года, погодных условий; большие возможности для объединения плановой и высотной геодезической основы на базе использования единой технологии.

Спутниковая технология успешно используется при объединении существующих местных условных систем координат, при создании метрологической основы геоинформационных систем, при построении каркаса высокоточных специальных сетей с погрешностями взаимного положения пунктов 1–2 см на расстояниях 3–5 км.

Однако использование американской системы GPS, работающей во всемирной системе координат WGS–84, требует знания координат пунктов российских ГОС в системе WGS–84. До решения проблемы установления связи между российской референсной системой и системой WGS–84 можно пользоваться способом, показанным в п. 6.5, или вычислять координаты пунктов в местной системе по измеренным приращениям координат.

При использовании спутниковой технологии определяются широта, долгота и геодезическая высота, т.е. высота над поверхностью отсчетного эллипсоида. Определение геодезических высот точек по результатам спутниковых измерений называется спутниковым нивелированием. Нормальная высота точки равна разности геодезической высоты и высоты квазигеоида над отсчётным эллипсоидом. Для использования спутникового нивелирования необходима точная карта высот квазигеоида. Для построения такой карты на территории страны наряду с ГГС и ГНС создана государственная гравиметрическая сеть. Спутниковые измерения, данные высокоточного нивелирования и гравиметрические высоты квазигеоида дают возможность создания и распространения более точной единой системы высот.

### 8.7. Геодезические опорные сети специального назначения

Наряду с государственной геодезической сетью для решения некоторых ведомственных задач могут создаваться геодезические опорные сети специального назначения. Обычно это сети повышенной точности и специальной формы. Примером может служить создаваемая с 1998 г. для сети железных дорог России реперная система контроля положения пути в профиле и в плане. Эта сеть создается на линиях со скоростным движением первоначально на участках капитального и усиленного среднего ремонта.

Назначение реперной системы — контроль геометрических параметров железнодорожного пути, контактной сети, искусственных и других сооружений при их проектировании, строительстве, реконструкции, ремонтах и эксплуатации. Реперная система при работе выправочных машин должна обеспечить постановку пути в проектное положение, снизить затраты на эксплуатацию пути, добиться плавности хода подвижного состава при высоких скоростях, предотвратить преждевременное расстройство колеи.

Реперная система железнодорожной линии подразделяется на опорную геодезическую сеть (ОГС) и рабочую сеть (РС).

ОГС состоит из главных и промежуточных пунктов. Главные пункты располагаются попарно через 500...1000 м с расстоянием между парами 5...10 км, промежуточные через 250...500 м. Пункты располагаются в полосе отвода железной дороги и закрепляются грунтовыми центрами по типу центров пунктов государственной геодезической сети. Исходными для построения ОГС должны служить пункты государственной геодезической сети 1 и 2 классов и реперы государственной нивелирной сети I и II классов.

Реперы рабочей сети закладываются через 100...140 м на прямых и через 50...70 м на кривых непосредственно в земляном полотне дороги, массивных металлических и бетонных конструкциях, а также в опорах контактной сети (ОКС). Таким образом, на кривых участках пути рабочие реперы будут расположены на каждой ОКС, на прямых – через одну ОКС. Рабочие реперы закладываются так, чтобы обеспечивалась возможность измерений до головки рельса с помощью простейших инструментов (рейки, рулетки, шаблона), возможность установки на репере датчиков для автоматического считывания характеристик геометрии пути, возможность наблюдений за состоянием и деформациями земляного полотна и других сооружений транспорта.

Средние квадратические погрешности взаимного положения соседних пунктов реперной системы не должны превышать:

- для рядовых пунктов ОГС 8 мм в плане и 5 мм по высоте;
- для рабочих реперов 5 мм в плане и 3 мм по высоте.

Для обеспечения этих нормативов потребуется выполнять массовые высокоточные геодезические измерения с помощью спутниковых систем, электронных тахеометров, точных нивелиров.

## 9. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ МЕСТНОСТИ

### 9.1. Виды съемок, выбор масштаба и высоты сечения рельефа

По виду получаемой продукции геодезические съемки обычно делят на горизонтальные, вертикальные и топографические.

При производстве инженерно-геодезических изысканий выполняют все виды съемок. При строительстве и содержании железных дорог также выполняют все виды геодезических съемок, но наиболее часто — вертикальную съемку (нивелирование) с получением профиля железнодорожного пути.

Результат горизонтальной съемки — контурный план местности, на котором не показывают рельеф.

Результат топографической съемки — топографический план местности, на котором показаны контуры (ситуация) и рельеф в горизонталях с заданной высотой сечения.

Масштаб горизонтальной и топографической съемки и высота сечения рельефа зависят от типа местности, вида и назначения плана (карты) и устанавливаются действующими инструкциями и СНиП. От стадии технического проекта до стадии строительства и эксплуатации сооружения масштаб съемки укрупняется, а высота сечения уменьшается.

Для проектирования железных дорог на стадии технического проекта используют планы масштаба 1:5000, для разработки генеральных схем реконструкции железнодорожных узлов — планы масштаба 1:2000, для проектирования переустройства существующих и составления рабочих чертежей новых железнодорожных станций и узлов — планы масштаба 1:1000, для проектирования переустройства сложных горловин станций и составления рабочих чертежей порталов тоннелей — планы масштаба 1:500.

Чем сложнее и плотнее застройка территории, тем крупнее должен быть масштаб съемки. Точность геодезических измерений должна соответствовать точности масштаба съемки. Она также регламентируется действующими инструкциями, руководствами, наставлениями.

Высота сечения рельефа на планах зависит от крутизны склонов местности, масштаба съемки. Так, для планов масштабов 1:500 и 1:1000 используется, в основном, сечение рельефа через 0,5 м; для планов масштабов 1:2000 и 1:5000 – 1 и 2 м. Чем меньше высота сечения, тем подробнее изображается рельеф местности. Средние квадратические погрешности съемки рельефа относительно ближайших точек геодезических сетей не должны превышать  $1/3$  –  $1/2$  высоты сечения рельефа.

Результаты съемок всех видов могут быть представлены в графическом виде или в виде цифровой модели местности.

Для показа на контурных и топографических планах элементов местности используют действующие условные знаки.

Для решения отдельных отраслевых задач в дополнение к основным создают специализированные топографические планы, на которых различные элементы местности показывают с разной подробностью и точностью. Технические требования к таким планам излагаются в ведомственных инструкциях и руководствах, например, которые обязательно согласуются с Федеральной службой геодезии и картографии России. Для изображения специфической для данной отрасли нагрузки используют специальные условные знаки.

На топографических планах изображаются:

- пункты геодезических сетей;
- здания и постройки;
- промышленные объекты;
- железные, шоссейные и грунтовые дороги всех видов и сооружения при них;
- гидрография;
- объекты гидротехнического и водного транспорта;
- рельеф местности с применением горизонталей, отметок точек и специальных условных знаков для показа крутых склонов;
- растительность;
- грунты и микроформы земной поверхности;
- границы и ограждения.

## 9.2. Горизонтальная съемка

Горизонтальной съемкой называется комплекс геодезических работ, выполняемых для получения контурного (ситуационного) плана местности. Такая съемка выполняется, например, для составле-

ния плана железнодорожной станции. Съемку выполняют с пунктов планового съемочного обоснования – съемочных сетей. Выше указывалось, что масштаб съемки зависит от назначения составляемого плана. Например, план железнодорожной станции (называемый масштабным планом) создается в масштабе 1:1000, а на сложные горловины или в стесненных условиях – в масштабе 1:500.

### 9.2.1. Плановая съемочная сеть, теодолитные ходы

Съемочная сеть создается с целью сгущения геодезической основы до плотности, обеспечивающей выполнение съемки. Плотность пунктов съемочной сети указана в СП 11-104-97 и составляет 10 и более пунктов на 1 кв. км. При изысканиях, строительстве и содержании железных дорог съемочную сеть обычно создают в виде системы теодолитных ходов. Основными приборами для этой цели служат электронные тахеометры, теодолиты, светодалномеры.

Теодолитные ходы прокладывают между пунктами государственной геодезической сети и сетей сгущения 1 и 2 разрядов в виде отдельных ходов и систем с узловыми точками (рис. 9.1). Для небольших участков, какими являются железнодорожные станции, съемочная сеть может создаваться как самостоятельная основа, без привязки к пунктам опорных сетей. Длины сторон проектируют от 20 до 350 метров, а длины ходов от 0,3 до 6 км в зависимости от масштаба съемки и допустимых относительных невязок. Висячие ходы (бесконтрольные) допускаются как исключение с тремя-четырьмя точками.

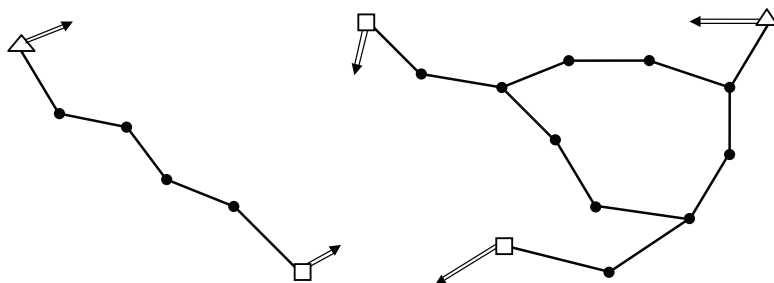


Рис. 9.1

Предельные погрешности положения пунктов съемочной сети относительно пунктов государственной сети и сетей сгущения 1 и 2

разрядов не должны превышать 0,2 мм в масштабе плана при съемке железнодорожных станций и 0,3 мм при съемке полосы местности при изысканиях железных дорог.

Не менее 20% пунктов съемочных сетей закрепляются постоянными знаками. В качестве постоянных грунтовых знаков используют рельсовую рубку, металлические трубки длиной не менее 80 см, бетонизируемые по всей длине или в нижней части. Остальные пункты съемочных сетей закрепляют только на период съемки трубками, костылями, кольями.

Углы в теодолитных ходах измеряют с точностью 30" одним приемом. Длины сторон теодолитных ходов измеряют с точностью 1:2000. Для приведения измеренных линий к горизонту одновременно с горизонтальными углами измеряют углы наклона.

### 9.2.2. Плановая привязка теодолитных ходов

Плановой привязкой называются геодезические работы, в результате которых определяют координаты начального пункта и дирекционный угол начальной стороны теодолитного хода. Назначение привязки – выполнение вычислений в единой системе координат и контроль измерений.

Схем привязки известно много, однако практически применяется только самая простая и надежная – теодолитный ход начинают на пункте  $A$  с известными координатами (рис. 9.2), а дирекционный угол на начальную сторону  $A-I$  передают от исходной стороны  $A-B$ . Для этого на исходном пункте  $A$  измеряют примычный угол  $\beta$  по правилу: от исходной до начальной стороны по часовой стрелке.

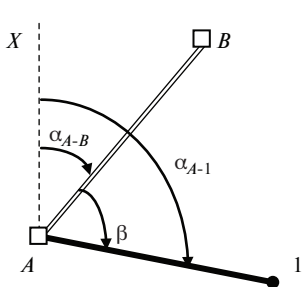


Рис. 9.2

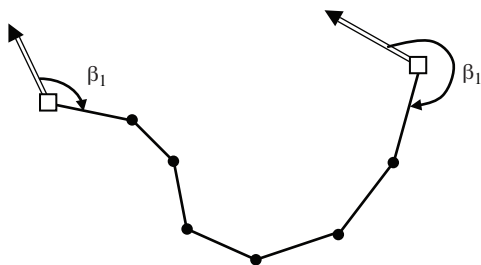


Рис. 9.3

Дирекционный угол начальной стороны  $A-1$  вычисляют по формуле

$$\alpha_{A-1} = \alpha_{A-B} + \beta, \quad \text{где } \alpha_{A-B} = \arctg \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}.$$

Для контроля выполняют повторную привязку в конце хода (рис. 9.3).

### 9.2.3. Обработка материалов построения плановых съемочных сетей

После проверки полевых журналов вычисляют координаты пунктов съемочных сетей, т. е. выполняют уравнивание. Уравнивание съемочных сетей производят упрощенными способами (см. п. 3.4): сначала уравнивают измеренные углы, затем вычисляют дирекционные углы сторон хода, вычисляют и уравнивают приращения координат отдельно по осям  $X$  и  $Y$ .

### 9.2.4. Способы съемки ситуации, абрис

Съемка ситуации выполняется с точек съемочной сети (станций съемки) теми же приборами, которыми создавалась съемочная сеть.

Выбор способа съемки зависит от характера местности и расположения контуров относительно съемочной сети. При съемках используют способы:

- прямоугольных координат (перпендикуляров);
- полярных координат;
- прямой угловой засечки;
- линейной засечки;
- створных промеров;
- обмер сооружения.

С появлением электронных тахеометров основным и практически единственным способом съемки контуров стал полярный способ.

В процессе съемки на каждой станции составляют абрис – глазомерную зарисовку местности с указанием (при надобности) промеров. От достоверности и подробности абрисов зависит качество составляемого плана.

### 9.2.5. Горизонтальная съемка железнодорожной станции

Съемку железнодорожной станции выполняют для получения плана, координат элементов станционной ситуации, ведомостей стрелочных переводов, путей, зданий и сооружений. Съемку выполняют, как правило, с точностью масштаба 1:1000, соблюдая требования Руководства. Геодезическое обоснование станции создают в виде системы ходов, включающую в себя один или несколько ходов полигонометрии 2-го разряда и опирающихся на них теодолитных ходов. Относительная линейная невязка в ходах полигонометрии 2-го разряда не должна превышать 1:5000, а в теодолитных ходах — 1:2000. Угловые невязки в ходах полигонометрии не должны превышать  $20''\sqrt{n}$ , а в теодолитных ходах —  $1'\sqrt{n}$ , где  $n$  — число углов в ходе. Длины ходов между узловыми точками не должны превышать 400 м в горловинах и 1200 м на остальных участках станции. Длина висячих ходов не должна превышать 150 м при одной точке поворота. Длины сторон в ходах не должны быть больше 350 м и меньше 40 м. Точки ходов закрепляют так, чтобы не повредить подземные коммуникации.

Для зданий и сооружений, находящихся в пределах путевого развития, определяют координаты не менее двух углов и определяют габариты приближения строений — расстояния до оси пути с точностью 1 см.

Координаты точек съемочного обоснования вычисляют, как правило, в станционной системе координат (см. п. 2.3.5).

### 9.2.6. Обработка материалов горизонтальной съемки

Камеральные работы при горизонтальной съемке включают обработку журналов съемки и составление ситуационного (контурного) плана.

Если обработка съемки и построение плана выполняется с помощью ЭВМ, то сначала составляют цифровую модель местности, а затем получают план с помощью графопостроителя. В современном производстве используются программные комплексы «Топоград» фирмы Геокад, Киев, «КРЕДО» фирмы Кредо-Диалог, Минск, «Каскад» ПО Инжгеодезия, Новосибирск, «Microstation» фирмы Autodesk и многие другие, позволяющие полностью автоматизировать весь процесс обработки материалов съемки.

Если обработка съемки производится вручную, то сначала разбивают координатную сетку, затем наносят точки съемочной сети по их

координатам, наносят контурные точки, рисуют ситуацию в соответствии с абрисами. Способы построения контурных точек соответствуют способам съемки. После проверки вычерчивают план с применением действующих таблиц условных знаков.

Средние погрешности в положении на плане четких контуров относительно ближайших точек съемочной сети не должны превышать 0,5 мм. На территориях с капитальной застройкой предельные погрешности во взаимном положении на плане точек ближайших контуров (углов зданий и т.п.) не должны превышать 0,4 мм.

### 9.3. Методы топографической съемки, тахеометрическая съемка

Топографическая съемка — это комплексная съемка ситуации и рельефа. Подход к выбору масштаба съемки и высоты сечения рельефа показан в п. 9.1. В зависимости от применяемых приборов и размера снимаемой территории используют разные методы съемки: *фототопографический, тахеометрический, мензульный*.

Основным (государственным) методом съемки является фототопографический. Он используется для составления карт и планов больших территорий по материалам аэрофотосъемки и наземной фотосъемки местности.

Тахеометрический и мензульный методы используются при съемке небольших участков, где применение фототопографического метода экономически нецелесообразно.

При мензульной съемке план полностью составляется в полевых условиях на бумаге, прикрепляемой к переносному столику — мензуле. Это наиболее точный, но и наиболее трудоемкий метод. Применяется в настоящее время крайне редко.

При съемке узких полос вдоль линейных сооружений и на площадках наиболее часто применяется тахеометрическая съемка, при которой положение снимаемых точек определяют прибором — тахеометром — в полярной системе координат. При одном визировании на снимаемую точку определяют расстояние, горизонтальный и вертикальный углы. Превышение определяют методом тригонометрического нивелирования. Съемку ведут при одном положении вертикального круга.

### 9.3.1. Приборы для тахеометрической съемки

Тахеометр — это теодолит, снабженный дальномером какого-либо типа: оптическим или электронным.

Основным современным прибором для выполнения тахеометрической съемки является *электронный тахеометр* — автоматический прибор, представляющий собой комбинацию электронного теодолита с цифровым отсчетом, светодальномера и мощного микропроцессора для обработки измеренной информации. Такие приборы выпускают все ведущие приборостроительные фирмы мира, в том числе Уральский оптико-механический завод (ЗТа5).

После установки прибора на точке съемочной сети (точка  $A$  на рис. 9.2) и наведения трубы на другую точку сети (точка  $B$ ) в память прибора вводят координаты точки установки тахеометра  $x_A, y_A, H_A$ , дирекционный угол  $\alpha_0$  направления  $A-B$  (или координаты точки  $B$ ), высоту прибора  $i$ , высоту отражателя  $V$ .

На снимаемой точке 1 (съемочном пикете) устанавливают веху с отражателем. После визирования на отражатель при левом положении вертикального круга вся дальнейшая работа выполняется в автоматическом режиме:

- прибор измеряет и запоминает расстояние  $D$  и отсчеты по горизонтальному ЛГ и вертикальному ЛВ кругам;
- вычисляет горизонтальный, вертикальный и дирекционный углы на снимаемую точку

$$\beta = ЛГ - c; \quad v = ЛВ - МО; \quad \alpha = \alpha_0 + \beta;$$

вычисляет горизонтальное проложение и превышение

$$d = D \cos v; \quad h = D \sin v;$$

вычисляет прямоугольные координаты снимаемой точки

$$x_1 = x_A + d \cos \alpha; \quad y_1 = y_A + d \sin \alpha; \quad H_1 = H_A + h + i - V.$$

Большинство современных электронных тахеометров имеют встроенный режим определения и хранения значений коллимационной погрешности трубы  $c$  и места нуля вертикального круга  $МО$ . Если это не предусмотрено, то работу на станции начинают с определения значений  $c$  и  $МО$ .

Основные режимы съемки при работе с электронным тахеометром:

- режим полярных координат – на табло выдаются значения измеренных расстояния, горизонтального и вертикального углов;
- режим тригонометрического нивелирования – на табло выдаются значения измеренного расстояния и вычисленных горизонтального проложения и превышения;
- режим прямоугольных координат – на табло выдаются вычисленные значения  $x$ ,  $y$ ,  $H$ .

Количество выдаваемой информации зависит от числа строк дисплея и постоянно увеличивается.

Все современные электронные тахеометры снабжаются электронным журналом – накопителем информации, откуда измеренные и вычисленные данные могут передаваться в компьютер для дальнейшей обработки. Результатом работы электронного тахеометра является цифровая модель местности.

К устаревшим, редко используемым в настоящее время приборам относится оптический *номограммный тахеометр*. Это, например, отечественный тахеометр 2ТН и приборы серии Delta бывшего народного предприятия Карл Цейс.

Самым простым тахеометром является обычный теодолит в комплекте с нивелирной рейкой. Углы измеряют с помощью горизонтального и вертикального кругов теодолита, расстояние отсчитывают по рейке с помощью нитяного дальномера. Горизонтальные проложения и превышения вычисляют по тахеометрическим формулам (5.20) и (7.7).

### 9.3.2. Плано-высотная основа тахеометрической съемки

Тахеометрическая съемка выполняется с пунктов съемочной сети – съемочных станций, координаты и отметки которых известны. Обычно положение пунктов съемочных сетей определяют прокладкой теодолитно-нивелирных или теодолитно-высотных ходов. Требования к способам и точности определения положения съемочных станций в плане аналогичны п. 9.2.1. Отметки точек теодолитно-нивелирных ходов определяют из геометрического нивелирования, точек теодолитно-высотных ходов – из тригонометрического нивелирования. Выбор вида ходов зависит от масштаба и назначения съемки, принятой высоты сечения рельефа.

При наличии приборов съемочное обоснование тахеометрической съемки может создаваться с помощью приемников спутниковых сигналов, однако между смежными станциями необходима прямая видимость.

### 9.3.3. Съемка ситуации и рельефа

Последовательность работы при тахеометрической съемке местности не зависит от типа используемого тахеометра и состоит в следующем:

- тахеометр устанавливают на съемочной станции, приводят в рабочее положение. Устанавливают трубу в положение «вертикальный круг слева», ориентируют лимб отсчетом  $0^{\circ}00'$  на другую съемочную станцию, считая это направление начальным. Измеряют и записывают высоту прибора, устанавливают на эту высоту отражатель;

- рейку (или отражатель) последовательно устанавливают на характерных точках ситуации и рельефа (съемочных пикетах), определяя их полярные координаты. Количество съемочных пикетов на станции зависит от характера рельефа и сложности ситуации, расстояние между ними не должны превышать 2...3 см на плане;

- по окончании съемки на станции контролируют ориентирование лимба, т. е. вновь наводят трубу на начальное направление и проверяют неизменность отсчета по горизонтальному кругу.

При съемке ситуации в зависимости от характера местности, вида и расположения контуров кроме полярного способа используют другие способы горизонтальной съемки, описанные в п. 9.2.2.

На каждой станции одновременно с измерениями составляют абрис. В абрисе показывают номер съемочной станции, начальное направление, все съемочные пикеты с их номерами, все снятые контуры, сопровождая их пояснительными надписями и условными знаками. Закончив съемку на станции, по абрису проверяют, все ли элементы ситуации и рельефа сняты, достаточна ли густота съемочных пикетов. От достоверности и подробности абрисов зависит качество составляемого плана.

При современной технологии тахеометрической съемки, когда вместе с электронным тахеометром используется портативный персональный компьютер (notebook), абрис не ведется. В этом случае цифровая модель местности, получаемая в процессе съемки, сразу преобразуется в план, который выдается на экран компьютера и тут же в полевых условиях редактируется и дополняется.

#### 9.3.4. Обработка материалов тахеометрической съемки

Камеральные работы включают вычисление координат и отметок съемочных станций, обработку журналов тахеометрической съемки и составление топографического плана.

На ЭВМ обработка съемки и составление топографического плана производится с помощью упомянутых ранее специальных программ. Примером может служить модуль «CREDO-TER» программного комплекса «КРЕДО».

## 10. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ТРАССИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В данной главе рассматривается только один этап инженерно-геодезических изысканий — полевое трассирование.

### 10.1. Разбивка трассы на местности

Трассой называется ось проектируемого линейного сооружения на уровне бровки земляного полотна, обозначенная на местности, нанесенная на карту или заданная координатами основных точек в цифровой модели местности. Основные точки трассы — это начало, конец, вершины углов поворота. В плане трасса состоит из прямых, сочлененных кривыми постоянного и переменного радиусов, а в продольном профиле — из линий разной крутизны, сочлененных вертикальными кривыми.

Разбивку трассы начинают с выбора начала трассы — точки ПК 0. Так как трасса уже нанесена на карту, то выбор ПК 0 состоит в отыскании на местности обозначенной на карте точки. Это делают промерами от местных предметов или прокладкой теодолитных ходов от пунктов геодезических опорных сетей, т. е. выполняют плановую геодезическую привязку. Начало трассы закрепляют столбом.

Аналогично находят и закрепляют главные точки трассы — вершины углов поворота ВУ.

После выбора ВУ 1 готовят трассу к измерениям: расчищают створ линии ПК 0 — ВУ 1, под теодолит через 300...500 м (но не реже чем через 1 км) столбами закрепляют створные знаки, а между ними выставляют вехи.

Затем приступают к разбивке пикетажа. Пикетаж — это система обозначения и закрепления точек трассы на местности. Пикет — это 100-метровый отрезок, считаемый по горизонтальному проложению. Начало и конец пикета закрепляют колом и сторожкой. Для разбивки пикетажа по трассе производят измерение расстояний с помощью 20-метровой стальной ленты или светодальномера. В наклонные рас-

стояния вводят поправки, всегда прибавляя их к измеренным расстояниям. Точность измерений 1:2000. Нумерацию пикетов ведут от нуля, поэтому номер пикета — это расстояние в сотнях метров от начала трассы до кола, закрепляющего начало пикета.

Кроме пикетов по трассе кольями и сторожками отмечают все места перегибов ската, пересечения трассы с естественными и искусственными препятствиями: реками, угодьями, подземными, наземными и надземными коммуникациями. Такие точки называют плюсовыми (плюсами). Их положение определяют промером от начала пикета и обозначают, например, ПК12 + 67. Такую запись называют пикетажным положением или пикетажным обозначением точки. Пикетажное положение с точностью до целого метра показывают на сторожке, устанавливаемом возле точки.

Если пикетаж разбивают с двух сторон, то в месте стыка возникает пикет меньше 100 метров, называемый резаным или неправильным.

Если местность поперек трассы имеет уклон больше 0.20, то поперек трассы закрепляют точки на расстоянии 50...100 м в обе стороны — разбивают поперечники. Назначение поперечников — уточнение поперечного профиля поверхности для проектирования земляного полотна и всех сооружений, идущих параллельно трассе. При необходимости поперечники разбивают на каждом пикете.

В вершинах углов поворота теодолитом Т30 или Т5 одним полным приемом (с точностью 30") измеряют правый по ходу угол между сторонами трассы и вычисляют углы поворота трассы:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{левый}} &= \beta - 180^\circ, \text{ если измеренный угол больше } 180^\circ; \\ \theta_{\text{правый}} &= 180^\circ - \beta, \text{ если измеренный угол меньше } 180^\circ.\end{aligned}$$

Углом поворота называется угол между продолжением предыдущего и последующим направлением трассы.

Не реже чем через 30 км для контроля измерений выполняют плановую привязку основных точек трассы к пунктам геодезических опорных сетей.

В процессе разбивки пикетажа производят глазомерную и полуинструментальную съемку местности вдоль трассы. При этом используют экер, рулетку, ленту. Результаты съемки в виде абриса в масштабе 1:5000, 1:2000 или 1:1000 заносят в пикетажный журнал. Трассу в пикетажном журнале показывают спрямленной, пикеты на странице нумеруют снизу вверх, углы поворота показывают стрелками. Около вершины угла выписывают ее пикетажное положение, например, ВУ 1 ПК 13 + 52,05, величину и направление угла поворота.

В пикетажном журнале выполняют все пикетажные расчеты, связанные с разбивкой кривых.

**Вывод:** при закреплении трассы на местности измеряют линии и углы, т. е. по трассе прокладывают теодолитный ход, точками которого являются вершины углов поворота. Это дает возможность вычислить координаты вершин углов, если в начале и конце трассы выполнена геодезическая привязка.

## 10.2. Железнодорожные закругления

### 10.2.1. Виды и назначение железнодорожных кривых

Прямолинейные отрезки пути сопрягаются кривыми постоянного и переменного радиуса. Кривые постоянного радиуса называются круговыми, переменного – переходными. На железных дорогах используют круговые кривые с радиусами 200...4000 м и переходные кривые длиной 20...200 м.

При переходе состава с прямой на круговую кривую скачком появляется центробежная сила, вызывающая удар колес о наружный рельс. Для смягчения перехода круговую кривую сопрягают с прямой переходной кривой, радиус кривизны которой меняется от бесконечности до радиуса кривизны круговой кривой, чем обеспечивается постепенное нарастание центробежной силы и плавность движения состава. В качестве переходных кривых используют отрезки радиоидаальной спирали – клотоиды.

На железных дорогах России практически все кривые составные, т. е. состоят из круговой и двух переходных кривых.

Для уравнивания центробежной силы в пределах переходной кривой устраивают возвышение наружного рельса по отношению к внутреннему (выполняют «отвод возвышения») на величину  $h$ , зависящую от скорости движения. На железных дорогах России применяют возвышение в пределах 60...150 мм, а уклон отвода возвышения 1‰, т. е. возвышение изменяется на 1 см на каждые 10 м длины переходной кривой.

На рис. 10.1 показан план пути в кривой, а на рис. 10.2 – профиль рельсов в железнодорожной кривой.

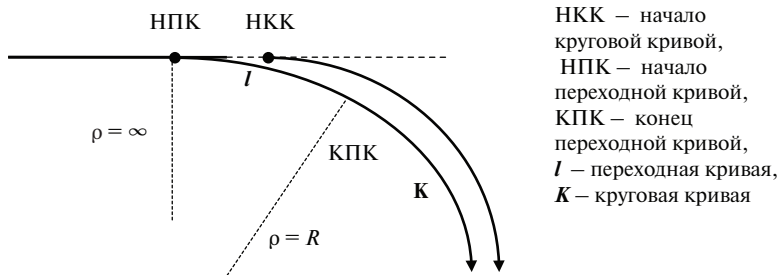


Рис. 10.1

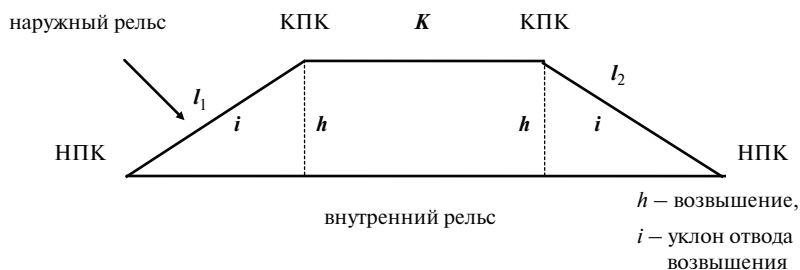


Рис. 10.2

### 10.2.2. Расчет и разбивка круговых кривых

При подходе к вершине угла поворота работы по разбивке пикетажа прекращаются, производится расчет кривой и закрепление на местности ее главных точек – начала кривой *НК*, середины кривой *СК*, конца кривой *КК*. Для этого определяют элементы кривой: тангенс, кривую, домер и биссектрису (рис. 10.3).

Тангенс *T* – это длина касательной от вершины угла до начала кривой или конца кривой. Кривая *K* – длина кривой от начала кривой до конца кривой. Домер *Д* – разность между длиной двух тангенсов и кривой. Биссектриса *Б* – расстояние от вершины угла до середины кривой.

Элементы кривой вычисляются как функции двух параметров: радиуса кривой *R* и угла поворота  $\theta$ :

$$T = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \quad K = \frac{\pi \cdot R \cdot \theta^\circ}{180^\circ}, \quad Д = 2T - K, \quad Б = \frac{R}{\cos \frac{\theta}{2}} - R. \quad (10.1)$$

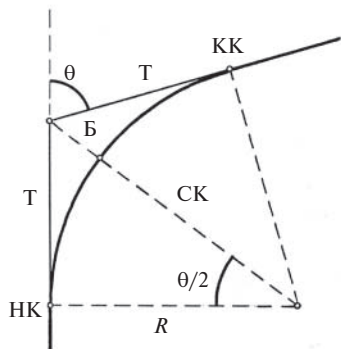


Рис. 10.3

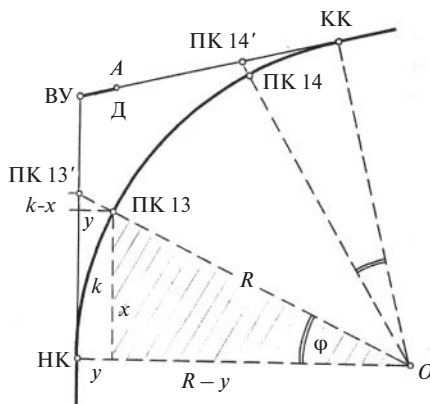


Рис. 10.4

Все элементы кривой являются линейными функциями радиуса, их вычисляют с помощью калькулятора или выбирают из специальных таблиц (Д. И. Власов, В. Н. Логинов «Таблицы для разбивки кривых на железных дорогах») с точностью 1 см.

Вычислив элементы кривой, вставляют кривую в пикетаж, т. е. вычисляют пикетажное положение главных точек кривой по формулам:

$$\begin{aligned} \text{ПК НК} &= \text{ПК ВУ} - Т; \text{ПК КК} = \text{ПК НК} + К; \\ \text{ПК СК} &= \text{ПК НК} + 0,5К; \end{aligned} \quad (10.2)$$

контроль:  $\text{ПК КК} = \text{ПК ВУ} + Т - Д; \text{ПК СК} = \text{ПК ВУ} - 0,5Д. (10.3)$

Точность пикетажных расчетов 1 см.

Пример:  $R = 300; ВУ \text{ ПК } 13 + 52,05; Т = 81,00; К = 158,23; Д = 3,77.$

По формулам (10.2) находим:

$$\text{НК} = 1352,05 - 81,00 = 1271,05 \Rightarrow \text{ПК } 12 + 71,05;$$

$$\text{КК} = 1271,05 + 158,23 = 1429,28 \Rightarrow \text{ПК } 14 + 29,28;$$

$$\text{СК} = 1271,05 + 79,12 = 1350,17 \Rightarrow \text{ПК } 13 + 50,17;$$

Контроль по формулам (10.3):

$$\text{КК} = 1352,05 + 81,00 - 3,77 = 1429,28 \Rightarrow \text{ПК } 14 + 29,28;$$

$$\text{СК} = 1352,05 - 1,88 = 1350,17 \Rightarrow \text{ПК } 13 + 50,17.$$

Для закрепления на местности главных точек кривой:

– от вершины угла в обе стороны по трассе откладывают значение  $T$  и закрепляют кольями точки НК и КК;

– разделив теодолитом пополам внутренний угол, по направлению биссектрисы откладывают значение  $B$  и закрепляют точку СК.

Главные точки кривой закрепляют как пикеты, на сторожках подписывают их пикетажное положение.

### 10.2.3. Перенос пикетов с тангенса на кривую, учет домера при разбивке пикетажа

Если между НК и ВУ попадают пикеты, то при разбивке кривой их переносят с тангенса на кривую. Расчет элементов переноса выполняют в прямоугольной системе координат, начало которой помещают в точку НК, а ось  $X$  совмещают с направлением тангенса  $T$  (рис. 10.4). Прямоугольные координаты пикета определяют по формулам

$$\begin{aligned}x &= R \sin \varphi; \\y &= R - R \cos \varphi; \\ \varphi &= k/R, \text{ радиан,}\end{aligned}\tag{10.4}$$

где  $k$  – длина кривой от НК до пикета.

В приведенном выше примере между точками НК и ВУ попадает ПК13, расстояние до которого от начала кривой  $k = \text{ПК } 13 - \text{ПК НК} = 28,95$  м.

Установив на калькуляторе переключатель в положение RAD, по формулам (10.4) получим:

$$\varphi = 28,95/300 = 0,0965; \quad x = 28,91; \quad y = 1,40.$$

Одновременно вычисляют «кривую без абсциссы» – отрезок  $(k - x) = 0,04$  м.

Вместо калькулятора можно использовать указанные ранее таблицы.

Вычислив элементы переноса, от предварительно закрепленной на тангенсе точки ПК 13' в сторону точки НК откладывают отрезок  $(k - x)$ , в полученной точке с помощью экера восстанавливают перпендикуляр к тангенсу, по направлению которого откладывают ординату  $y$  и закрепляют положение ПК 13 на кривой. Предварительно закрепленную на тангенсе точку ПК 13' убирают.

При продолжении разбивки пикетажа от вершины угла нужно учесть домер. Измерение линий ведут по касательным, т.е. по тангенсам, а счет расстояний ведут по кривой, которая короче двух тангенсов на величину домера. Вычислив элементы кривой, величину домера откладывают от вершины угла вперед и продолжают измерения от полученной точки (точка А на рис. 10.4), считая ее пикетажное положение таким же, как у вершины угла.

Если между точками ВУ и КК попадают пикеты, то их переносят на кривую тем же способом, рассчитывая элементы переноса по формулам (10.4). Начало прямоугольной системы координат помещают в точку КК.

В приведенном примере между ВУ и КК попадает ПК 14, для которого:

$$k = \text{ПК КК} - \text{ПК 14} = 29,28; \varphi = 29,28/300 = 0,0976; x = 29,23; y = 1,43.$$

После этого продолжают разбивку пикетажа до следующей вершины угла поворота трассы.

#### 10.2.4. Расчет и разбивка круговой кривой с двумя переходными кривыми

В каждой точке переходной кривой выполняется условие  $\rho s = C$ , где  $\rho$  – радиус переходной кривой в данной точке;  $s$  – длина переходной кривой от начала до данной точки;  $C$  – параметр переходной кривой.

В конце переходной кривой (рис. 10.1) параметр  $C = Rl$ , где  $l$  – полная длина переходной кривой.

Вставка переходных кривых приводит к удлинению кривой, изменению положения точек начала, середины и конца кривой. Последовательность вставки переходных кривых показана на рис. 10.5:

- назначают длину переходной кривой  $l$ ;
- круговую кривую с обеих сторон уменьшают на половину переходной кривой  $l/2$ ;
- оставшуюся часть круговой кривой ( $K - l$ ) сдвигают к центру кривизны на величину приращения биссектрисы  $B_p$ , называемую центральной сдвижкой;
- для сохранения величины радиуса круговой кривой центр ее сдвигают из точки  $O$  в точку  $O'$  на величину  $B_p$ ; за счет этого тангенс увеличивается на величину  $T_p$  – приращение тангенса;
- с двух сторон вписывают по полной переходной кривой, за счет чего тангенс кривой еще удлиняется на величину  $m \approx l/2$ ;

– вычисляют суммированные элементы кривой:

$$T_c = T + T_p + m; \quad K_c = K + l; \quad B_c = B + B_p;$$

$$D_c = 2T_c - K_c = 2T + 2T_p + 2m - K - l = (2T - K) + 2T_p - 2(l/2 - m) = D + D_p,$$

где  $D_p = 2T_p - 2(l/2 - m)$ ;

вычисляют пикетажное положение главных точек кривой:

$$\text{ПК НК} = \text{ПК ВУ} - T_c; \quad \text{ПК КК} = \text{ПК НК} + K_c; \quad \text{ПК СК} = \text{ПК НК} + 0,5K_c;$$

контроль:  $\text{ПК КК} = \text{ПК ВУ} + T_c - D_c$ ;  $\text{ПК СК} = \text{ПК ВУ} - 0,5D_c$ .

Величина  $p$  называется сдвижкой круговой кривой относительно линии тангенса. Элементы переходной кривой:  $T_p, m, B_p$  – выбирают из тех же таблиц для разбивки кривых по длине переходной кривой  $l$ .

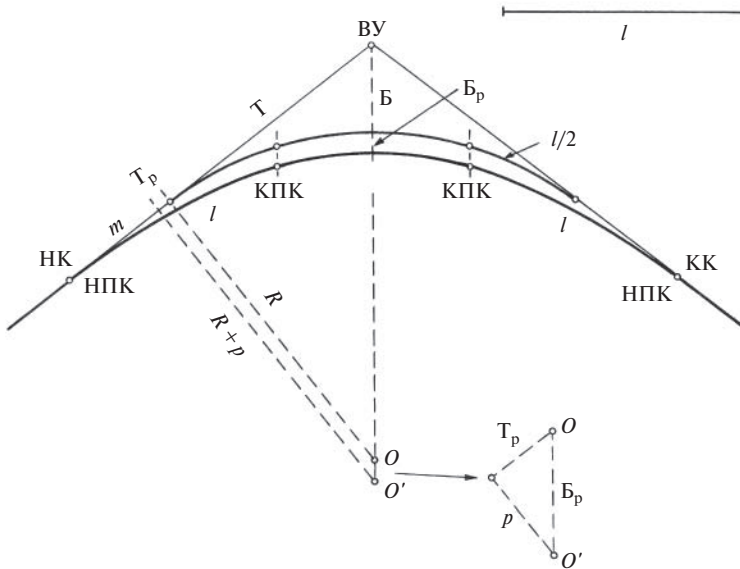


Рис. 10.5

Разбивку составных кривых на местности производят аналогично разбивке круговой кривой, используя суммированные элементы.

### 10.3. Нивелирование трассы и поперечников

Для определения отметок точек пикетажа и поперечников по трассе прокладывают ход технического нивелирования. Технология выполнения технического нивелирования была рассмотрена в п. 8.5. Нивелирование начинают с привязки трассы, прокладывая ход технического нивелирования от ближайшего репера государственной нивелирной сети (ГНС) до точки начала трассы – ПК 0. Для контроля нивелирования привязку трассы к реперам ГНС выполняют не реже чем через 30 км. В работе используют нивелиры Н-3, Н-5, Н-10 с двусторонними рейками. Нормальная длина визирного луча 150 м. Связующими могут быть любые точки по трассе – как пикеты, так и плюсовые. Если нет подходящей по расстоянию точки пикетажа, то в качестве связующей используют любую точку местности, закрепляя ее колом. Ее называют  $x$ -точкой. В этом случае все пикеты и плюсовые точки между связующими нивелируют как промежуточные.

Так как техническое нивелирование выполняется односторонним ходом, то для контроля трассу нивелируют двумя нивелирами. Первым нивелируют все пикеты, плюсовые точки, постоянные и временные реперы. Вторым – реперы, связующие точки и точки поперечных профилей. Контроль качества нивелирования выполняют по невязкам ходов. Невязку в ходе между реперами с известными отметками находят по формуле

$$f_h = \sum h - (H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}).$$

Допустимую невязку определяют по формуле доп  $f_h = 50\sqrt{L}$ , мм, где  $L$  – длина хода в километрах, а при трассировании новых дорог по формуле доп  $f_h = 30\sqrt{L}$ , мм.

При нивелировании двумя нивелирами расхождение сумм превышений, полученных из первого и второго нивелирования, не должно превышать величины  $50\sqrt{2L} = 70\sqrt{L}$ , мм.

По поперечникам прокладывают замкнутый ход, допустимая невязка составляет 50 мм на каждый поперечник независимо от его длины.

Высотной основой пронивелированной трассы служит сеть устанавливаемых вдоль нее постоянных и временных реперов. Постоянные реперы устанавливают через 15–30 км, временные через 2–5 км.

Временными реперами служат деревянные столбы с забитым в торец гвоздем, кордонные камни мостов, любые постоянные предметы вдоль трассы, не меняющие своей высоты.

#### 10.4. Съёмка полосы местности вдоль трассы

В результате прокладки по трассе теодолитно-нивелирного (магистрального) хода получают координаты и отметки всех точек пикетажа и поперечников. Таким образом, пикетаж может служить плано-высотным обоснованием съёмки. При необходимости с точек пикетажа и поперечников производится топографическая съёмка полосы местности вдоль трассы шириной по 100 м в обе стороны в масштабе 1:2000. В местах размещения будущих искусственных сооружений (ИССО) и на сложных участках выполняют съёмку в масштабах 1:1000 – 1:500.

#### 10.5. Камеральная обработка материалов трассирования

По материалам тахеометрической съёмки составляют топографические планы в масштабе 1:2000 с высотой сечения рельефа 0,5–1 м, а на участках пересечения трассы с препятствиями дополнительно составляют планы в масштабах 1:1000 – 1:500.

По материалам нивелирования строят продольные и поперечные профили. Профиль есть развертка трассы на вертикальную плоскость. Он представляет собой график в системе прямоугольных координат, на котором по горизонтальной оси откладывают расстояния, а по вертикальной – отметки точек. Масштабы на продольном профиле обычно принимают 1:10 000 для горизонтальных расстояний и 1:200 для отметок. На поперечных профилях горизонтальный масштаб принимают значительно более крупным, часто одинаковым с вертикальным масштабом (1:200). Вид сетки продольного профиля и число строк в ней принимают согласно ГОСТ 21.510-83\* и отраслевым стандартам.

## 10.6. Элементы проектирования плана и профиля дороги

План и профиль дороги проектируют на продольном профиле трассы так, чтобы они обеспечивали плавное, бесперебойное и безопасное движение поездов. Нормы проектирования, изучаемые в специальных курсах, определяют допустимую крутизну (уклоны) и длину элементов продольного профиля, величины радиусов круговых кривых, длины переходных кривых. Очертания трассы в плане и профиле должны быть экономически наиболее выгодными.

План дороги рассчитывают в графе продольного профиля «Прямые и кривые в плане». В ней показывают длины прямых и кривых участков, дирекционные углы или румбы прямых. Длину прямой вставки вычисляют как разность пикетажных положений начала следующей и конца предыдущей кривой.

Дирекционные углы прямых вставок находят по формулам  $\alpha_2 = \alpha_1 - \theta^л$  для левых или  $\alpha_2 = \alpha_1 + \theta^п$  для правых углов поворота.

Кривые показывают скобкой, внутри которой выписывают параметры  $(R, \theta)$  и основные элементы кривой  $(T, K, l)$ .

Результатом расчета продольного профиля является проектная линия, задаваемая проектными уклонами и проектными длинами элементов, а также проектными отметками бровки земляного полотна на всех точках пикетажа. Проектные отметки вычисляют по формуле (рис. 10. 6)

$$H_2^{np} = H_1^{np} + h^{np} = H_1^{np} + i^{np} \cdot d^{np},$$

где  $i^{np}$  — проектный уклон;  $d^{np}$  — проектное горизонтальное расстояние.

Для определения объемов земляных работ при строительстве земляного полотна на всех точках пикетажа вычисляют рабочие отметки  $h'$  как разность между проектной отметкой и отметкой земли:

$$h'_k = H_k^{np} - H_k.$$

Положительная рабочая отметка выражает высоту подсыпки, а отрицательная — глубину срезки грунта. Знаки рабочих отметок на профиле не пишут, а располагают положительные рабочие отметки над, а отрицательные — под проектной линией.

В местах пересечения проектной линии с линией профиля земли возникают точки нулевых земляных работ (нулевые точки). В нуле-

вых точках рабочая отметка равна нулю, т. е. выемка переходит в насыпь. Для подсчета объемов земляных работ необходимо знать длины отсеков — длины насыпей и выемок. Для этого рассчитывают положение нулевых точек и показывают на продольном профиле расстояния  $d_1$  и  $d_2$  (рис. 10.7) до ближайших точек пикетажа. Эти расстояния пропорциональны рабочим отметкам. Формулу для расчета расстояний получим способом параллельного переноса проектной линии, т.е. с помощью производной пропорции:

$$\frac{d_1}{h'_1} = \frac{d_2}{h'_2} = \frac{d_1 + d_2}{h'_1 + h'_2} = \frac{d}{h'_1 + h'_2},$$

откуда 
$$d_1 = \frac{h'_1}{h'_1 + h'_2} d \quad \text{и} \quad d_2 = \frac{h'_2}{h'_1 + h'_2} d.$$

Расстояния  $d_1$  и  $d_2$  вычисляют с точностью 1 м, рабочие отметки для этих расчетов берут по модулю. Контроль вычислений:  $d_1 + d_2 = d$ .

Пример:  $h'_1 = 1,87$  м,  $h'_2 = 1,03$  м,  $d = 50$  м;  $d_1 = 32$  м,  $d_2 = 18$  м.

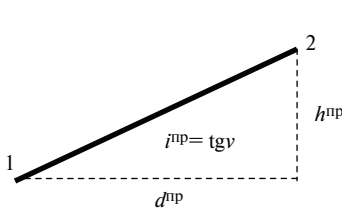


Рис. 10.6

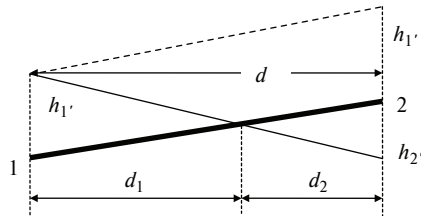


Рис. 10.7

Для уточнения объемов земляных работ, проектирования земляного полотна дороги и сооружений, располагающихся параллельно пути, строят поперечные профили. Детально все эти вопросы изучают в специальных курсах.

В настоящее время камеральная обработка материалов трассирования выполняется на ЭВМ с помощью специальных пакетов прикладных программ. Например, многофункциональный программный комплекс «КРЕДО» содержит ряд модулей, позволяющих полностью автоматизировать все работы, связанные с проектированием линейных

и площадных объектов. При этом всё графическое проектирование заменяется цифровым.

Модуль «CREDO-DAT» позволяет производить обработку геодезических измерений, выполненных любыми методами и приборами, импортировать данные с накопителей информации электронных тахеометров и приемников сигналов спутниковых навигационных систем, получать каталоги координат точек в любой координатной системе и картографической проекции.

Модуль «CREDO-TER» позволяет создавать цифровую модель местности и цифровой инженерно-топографический план с изображением рельефа горизонталями, строить разрезы и профили по любым направлениям, экспортировать полученные данные в принятый во всем мире графический пакет «AutoCAD» для вывода любых графических документов на графопостроитель.

Модули «CREDO-PRO», «CREDO-MIX», «CAD-CREDO» позволяют выполнять горизонтальное и вертикальное проектирование линейных и площадных объектов, искусственных сооружений, транспортных развязок в цифровой форме, вписывая их в ранее созданную ЦММ.

Возможности подобных программных продуктов постоянно расширяются.

# 11. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАЗБИВОЧНЫЕ РАБОТЫ

## 11.1. Задачи геодезических разбивочных работ

Геодезической разбивкой сооружения называются работы по перенесению проекта сооружения в натуру. Геодезические разбивочные работы являются составной частью технологического процесса любого строительства, они определяют форму, размеры и положение на местности всего сооружения и его отдельных частей. Геодезист на строительной площадке – контролер соблюдения проектных геометрических размеров сооружения.

Как указано в п. 1.1.6, этот вид работ изучается по специальной программе. В данном пособии рассмотрено только несколько вопросов, касающихся железнодорожного строительства.

## 11.2. Геодезическая основа разбивочных работ

В районе строительства заранее создается геодезическая опорная сеть – геодезическая разбивочная основа (ГРО), от пунктов которой будут выполняться разбивки. Отметки пунктов ГРО определяют из геометрического нивелирования. Пункты ГРО размещают так, чтобы они сохранились до конца строительства и чтобы на них можно было устанавливать геодезические приборы. Пункты ГРО закрепляются бетонными сваями, столбами, металлическими трубами с якорями, над пунктами устраивается ограждение.

В процессе строительства часть пунктов ГРО неизбежно уничтожается, их, по возможности, постоянно восстанавливают. Основные пункты ГРО должны сохраняться и после окончания строительства. Вид ГРО зависит от вида сооружаемого объекта.

**На перегоне** – это восстановленный пикетаж и поперечники в местах строительства искусственных сооружений, а также реперы нивелирования, заложенные в период изысканий.

**На железнодорожной станции** – это базисные ходы, т.е. система ходов полигонометрии, и реперы нивелирования.

**При строительстве мостов** – мостовая триангуляция.

**При строительстве метрополитенов и тоннелей** – высокоточная маркшейдерско-геодезическая опорная сеть на поверхности с подходными пунктами к шахтным стволам.

**При крупном промышленном строительстве** – строительная координатная сетка в виде системы квадратов и прямоугольников. Строительная сетка создается методом полигонометрии 1-го разряда или 4-го.

При возведении многоэтажных сооружений ГРО передается с этажа на этаж с помощью приборов вертикального проецирования, дающих отвесный визирный луч.

### 11.3. Подготовка данных для выноса проекта сооружения в натуру

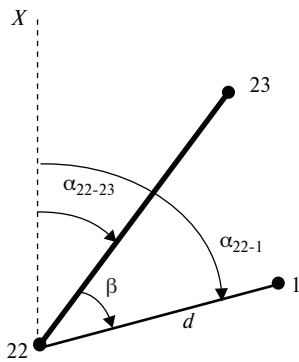


Рис. 11.1

Плановые разбивочные работы состоят в откладывании на местности проектных значений углов и расстояний – разбивочных элементов. Высотные разбивочные работы состоят в построении на местности проектных превышений. Определение разбивочных элементов называется подготовкой данных для выноса проекта сооружения в натуру. При подготовке данных используют проектную документацию, перечисленную в п. 11.3, данные готовят графическим, аналитическим или графоаналитическим способами.

**Графический** способ используют для подготовки выноса главных и основных осей с малой точностью. Разбивочные элементы определяют прямыми измерениями на генпланах, профилях. Точность графического способа соответствует графической точности чертежа, т. е. предельная погрешность измерения линии не должна превышать  $0,2 \cdot M$ , мм, где  $M$  – знаменатель масштаба чертежа. Таким способом определяют, например, положение вершин углов поворота трассы дороги.

При **аналитическом** способе данные получают расчетом по координатам пунктов ГРО и выносимых точек.

Например, для выноса в натуру точки 1 способом полярных координат от точек 22 и 23 ГРО (рис. 11.1) нужно вычислить горизонтальный угол  $\beta$  и горизонтальное проложение  $d$ .

Угол  $\beta$  равен разности дирекционных углов направлений:

$$\beta = \alpha_{22-1} - \alpha_{22-23}.$$

Дирекционный угол направления 22-1 и проложение находят по формулам обратной геодезической задачи:

$$\alpha_{22-1} = \arctg(\Delta y / \Delta x); \quad d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2};$$

$$\Delta x = x_1 - x_{22}; \quad \Delta y = y_1 - y_{22}.$$

Дирекционный угол направления 22-23 выбирают из каталога координат пунктов ГРО или вычисляют аналогично направлению 22-1.

Проектное превышение точки 1 над точкой 22 равно разности отметки точки ГРО и проектной отметки выносимой точки.

Точность подготовки данных этим способом соответствует точности задания координат и точности технологических расчетов.

При **графоаналитическом** способе часть данных (для первой точки) получают прямыми измерениями, а часть (для последующих точек) – расчетом. Точность графоаналитического способа соответствует точности графического способа.

Подготовка данных заканчивается составлением разбивочного чертежа, на котором показывают выносимые точки, пункты ГРО, от которых будет производиться разбивка, разбивочные элементы и их значения.

Точность геодезических разбивочных работ устанавливается Строительными нормами и правилами и техническим проектом. На погрешности положения выносимых точек будут влиять погрешности технологических расчетов, строительных работ, геодезических измерений. Последнюю принимают равной трети общей погрешности – строительного допуска.

## 11.4. Горизонтальная разбивка сооружений

Горизонтальная разбивка сооружений сводится к построению найденных при подготовке данных проектных горизонтальных углов и расстояний.

Наиболее просто эта работа выполняется с помощью электронных тахеометров.

Способы горизонтальной разбивки аналогичны способам горизонтальной съемки, которые рассматривались в п. 9.2.4. Наиболее часто применяются только три: способы прямоугольных и полярных координат и способ створной засечки. Покажем их на примерах.

**Пример 1.** Вынос оси бокового пути и предельного столбика от центра стрелочного перевода марки  $1/N = 1/9$  и оси основного пути.

Марка стрелочного перевода (марка крестовины) – это тангенс угла  $\alpha$ , на который боковой путь отклоняется от основного пути с помощью стрелочного перевода (рис. 11.2). Предельный столбик (ПС) – точка на биссектрисе угла  $\alpha$  (рис. 11.3), лежащая на половине минимального безопасного расстояния  $q$  между основным и боковым путями ( $q = 2,05$  м).

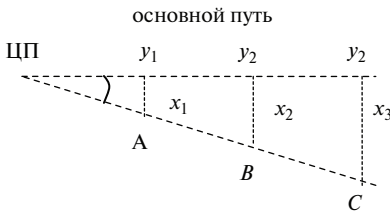


Рис. 11.2

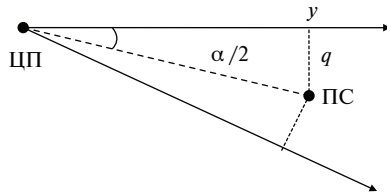


Рис. 11.3

Положение центра стрелочного перевода (ЦП) задается пикетажем и устанавливается на местности промерами вдоль основного пути от элементов станционной ситуации или путевого развития, привязанных к пикетажу.

Последовательность подготовки данных (ось  $Y$  направлена вдоль основного пути):

– из прямоугольного треугольника на рис. 11.2 следует

$$y = x \cdot \operatorname{ctg}\alpha = xN.$$

При шаге разбивки  $x = 1$  м получим:

$x$ , м	1	2	3	4
$y$ , м	9	18	27	36

– из прямоугольного треугольника на рис. 11.3 следует

$y = q \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2)$ . По малости угла  $\alpha$ :  $y = 2q \cdot \operatorname{ctg}\alpha = 4,10 \cdot N = 36,90$  м;

– вычисляют  $\alpha = \operatorname{arctg}(1/N) = \operatorname{arctg}(1/9) = 6^\circ 20,4'$ .

Последовательность разбивки *способом прямоугольных координат*:

– от ЦП вдоль оси основного пути откладывают отрезки 9, 18, 27... м. В полученных точках с помощью экера восстанавливают перпендикуляры, на которых откладывают соответственно 1, 2, 3...м и фиксируют точки *A, B, C...*, лежащие на оси бокового пути;

– откладывают от ЦП вдоль оси основного пути расстояние 36,90 м и по перпендикуляру 2,05 м, фиксируют точку, где будет установлен ПС;

– для контроля разбивки над точкой, закрепляющей ЦП, устанавливают теодолит и от направления основного пути откладывают угол  $\alpha$ . Построенные точки *A, B, C...* должны лежать на визирном луче. Откладывая угол  $\alpha/2$ , проверяют правильность разбивки ПС.

**Пример 2.** Разбивка стрелочной улицы.

Стрелочной улицей называется прямолинейный железнодорожный путь, на котором лежат центры стрелочных переводов парковых путей. При этом ЦП1 лежит на главном пути. Кроме марки перевода ЦП1 должны быть заданы междупутные расстояния  $E_1, E_2, E_3...$  (рис. 11.4).

Последовательность подготовки данных:

– по координатам пунктов ГРО (22 и 23 на рис. 11.4) и центров переводов ЦП<sub>2</sub>, ЦП<sub>3</sub>, ЦП<sub>4</sub>... аналитическим способом находят полярные расстояния  $d_1, d_2, d_3...$  и полярные углы  $\beta_1, \beta_2, \beta_3...$ , как показано в п. 11.5;

– по марке ЦП1 вычисляют угол крестовины  $\alpha = \arctg(1/N)$  и расстояния  $l_1 = E_1/\sin\alpha, l_2 = E_2/\sin\alpha, l_3 = E_3/\sin\alpha$  (рис. 11.5).

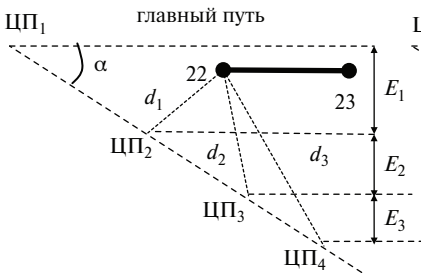


Рис. 11.4

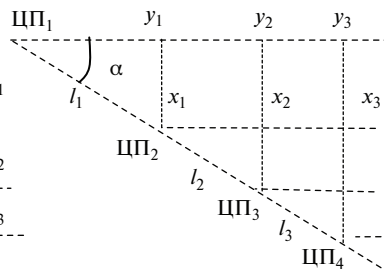


Рис. 11.5

1-й способ разбивки (рис. 11.4) – разбивка полярным способом от пунктов ГРО.

Установив теодолит над пунктом 22 ГРО, последовательно строят углы  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ , по полученным направлениям откладывают расстояния  $d_1, d_2, d_3$  и закрепляют точки ЦП<sub>2</sub>, ЦП<sub>3</sub>, ЦП<sub>4</sub>.

2-й способ разбивки (рис. 11.5) – разбивка способом полярных координат от ЦП1 и оси главного пути.

Установив теодолит над точкой ЦП<sub>1</sub>, от направления главного пути откладывают угол  $\alpha$  и получают направление стрелочной улицы. Откладывая по этому направлению отрезки  $l_1, l_2, l_3$ , закрепляют точки ЦП<sub>2</sub>, ЦП<sub>3</sub>, ЦП<sub>4</sub>. Контроль выполняют способом прямоугольных координат от ЦП1 и оси главного пути. Для этого сначала вычисляют абсциссы и ординаты центров стрелочных переводов аналогично предыдущему примеру:

$$x_1 = E_1; \quad y_1 = E_1 \operatorname{ctg} \alpha; \quad x_2 = E_1 + E_2; \quad y_2 = (E_1 + E_2) \operatorname{ctg} \alpha; \dots,$$

а затем сравнивают натурные и проектные данные.

**Пример 3.** Вынести на дно котлована углы 1, 2, 3, 4 здания прямоугольной формы от закрепленных на местности основных осей (рис. 11.6).

*A-A, B-B* – продольные, 1-1, 2-2 – поперечные оси здания.

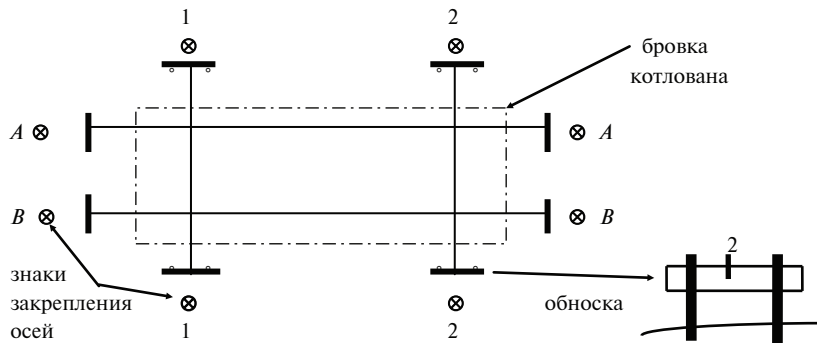


Рис. 11.6

Рис. 11.7

Оси здания закрепляются постоянными знаками за зоной земляных работ. Между знаком и бровкой котлована устраивается ку-сочечная обноска – доска, прибитая к двум столбам. Над знаком за-крепления оси устанавливается теодолит, с помощью которого ось переносится на обноску (рис. 11.7). Выкапывается котлован. Между противоположными частями обноска натягивается проволока –

*монтажная струна.* Пересечения струн отмечают проектное положение углов здания. В местах пересечения подвешиваются отвесы. Под отвесами на дне котлована закрепляются угловые точки здания.

Способом створной засечки разбивают искусственные сооружения (ИССО) при возведении земляного полотна железной дороги. В этом случае продольной осью ИССО будет трасса, знаками крепления оси – пикеты, а плюсовая точка будет лежать на поперечной оси сооружения.

## 11.5. Детальная разбивка кривых

При изысканиях закрепляют только главные точки кривой. При выносе проекта дороги в натуру кривую «рисуют» на местности, закрепляя на ней точки через равные промежутки. Расстояние между смежными точками на кривой называют шагом разбивки и принимают в зависимости от радиуса равным 5, 10, 20 м: чем больше радиус, тем больше шаг разбивки. Иногда и при изысканиях приходится строить не только главные точки кривой. Во всех таких случаях используют несколько геометрических приемов.

### 11.5.1. Геометрия кривой

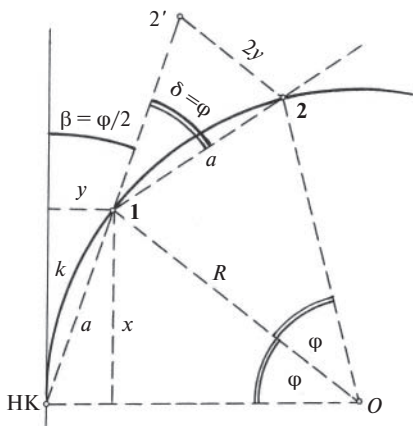


Рис. 11.8

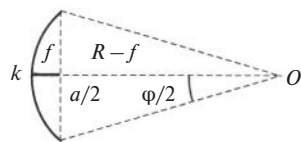


Рис. 11.9

На рис. 11.8, 11.9:

$R$  – радиус круговой кривой;

$k$  – шаг разбивки, длина кривой между смежными точками;

$a$  – хорда, стягивающая кривую  $k$ ;

$\varphi$  – центральный угол, соответствующий кривой  $k$ ;

$\beta$  – угол между касательной и хордой;

$\delta$  – угол между смежными хордами;

$f$  – стрела изгиба кривой  $k$ .

$x, y$  – прямоугольные координаты точки на кривой в системе координат, связанной с началом кривой и направлением тангенса (касательной).

1. Центральный угол  $\varphi$  :

– в радианах

$$\varphi = k / R; \quad (11.1)$$

– в градусах

$$\varphi^\circ = \frac{k \cdot \rho^\circ}{R} = \frac{k \cdot 180^\circ}{\pi \cdot R}; \quad (11.2)$$

– в минутах

$$\varphi' = \frac{k \cdot 180 \cdot 60'}{\pi \cdot R}. \quad (11.3)$$

2. Угол между касательной и хордой  $\beta = \varphi / 2.$  (11.4)

Используется при построении первой точки на кривой и касательной в конце кривой.

3. Угол между смежными хордами (угол поворота хорды)

$$\delta = \varphi. \quad (11.5)$$

Используется для построения второй и последующих точек на кривой.

$$\text{Длина хорды} \quad a/2 = R \sin(\varphi/2) \Rightarrow a = 2R \sin(\varphi/2). \quad (11.6)$$

Используется при разбивке кривой способами углов и продолженных хорд. Шаг разбивки подбирается таким, чтобы разность между кривой и хордой была меньше точности разбивки (5...10 мм).

5. Прямоугольные координаты точки на кривой (см. п. 10.3.3):

$$x = R \sin \varphi; \quad y = R - R \cos \varphi. \quad (11.7)$$

В пределах переходной кривой координаты находят по формулам:

$$x = s - \frac{s^5}{40C^4}; \quad y = \frac{s^3}{6C^2} - \frac{s^7}{336C^6}, \quad (11.8)$$

где  $s$  – длина переходной кривой от начала до данной точки;

$C$  – параметр переходной кривой (см. п. 10.3.4).

Используются при разбивке кривой способом прямоугольных координат.

Стрела изгиба, выраженная через хорду и радиус (рис. 11.9):

$$R^2 = (a/2)^2 + (R - f)^2 \Rightarrow 2Rf = (a/2)^2 + f^2.$$

При  $R = 500$  м,  $a = 20$  м  $\Rightarrow (a/2)^2 = 100$ ,  $f^2 = 0,01$ .

Поэтому с точностью до малой второго порядка  $f = \frac{a^2}{8R}$ . (11.9)

Из формулы (11.9) следует первый важный вывод: если на уложенном железнодорожном пути измерять стрелы изгиба от хорд заданной длины, то можно вычислить средний радиус круговой кривой по формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{a^2}{8f_{\text{ср}}}, \quad (11.10)$$

где  $f_{\text{ср}}$  – среднее значение стрелы изгиба.

Формула (11.10) используется при контроле разбивки кривой.

Стрела изгиба, выраженная через хорду и угол поворота (рис. 11.9):

$$\frac{f}{a/2} = \frac{\varphi/2}{\rho} = \frac{\pi}{360 \cdot 60} \varphi \Rightarrow f = n\rho, \quad \text{где } n = \frac{a}{2} \cdot \frac{\pi}{360 \cdot 60}.$$

Если  $f$  выразить в миллиметрах, то при  $a = 20$  м  $n = 1,4545$  и

$$f = 1,4545\varphi', \text{ мм.} \quad (11.11)$$

Из формулы (11.11) следует второй важный вывод:

$$\Sigma f = 1,4545\Sigma\varphi', \text{ мм,} \quad (11.12)$$

где  $\Sigma\varphi'$  – полный угол поворота кривой в минутах.

Формула (11.12) – одна из важнейших для инженера-путейца, она постоянно используется при контроле положения пути в кривой.

#### 11.5.2. Детальная разбивка кривой способом прямоугольных координат

Разбивка кривой этим способом описана в п. 10.3.3 – этим способом переносят пикеты на кривую при изысканиях. По заданным радиусу кривой  $R$  и шагу разбивки  $k$  прямоугольные координаты  $x$ ,  $y$  точек на кривой вычисляют по формулам (11.7, 11.8) или выбирают из ранее упоминавшихся таблиц для разбивки кривых, где для всех стандартных значений радиуса  $R$  приведены значения величин  $k-x$  и  $y$ . Разбивку ведут от начала и конца кривой до середины кривой.

Это основной, наиболее точный способ разбивки – положение последующих точек на кривой не зависит от точности выноса предыдущих, т. е. погрешности измерений не накапливаются. Способ применяется на равнинной открытой местности.

#### 11.5.3. Детальная разбивка кривой способом углов

Смысл этого способа показан на рис. 11.8. В точке НК устанавливают теодолит, от направления тангенса кривой откладывают угол  $\varphi/2$ , получают направление на первую точку. Отложив по этому направлению отрезок, равный длине хорды  $a$ , закрепляют точку 1 на кривой. Вторую и последующие точки на кривой получают линейно-угловой засечкой: теодолитом строят угол  $2\varphi/2$ , а из точки 1 рулеткой откладывают хорду  $a$  так, чтобы конец ее лежал на визирном луче.

Данные для разбивки по заданным радиусу  $R$  и шагу разбивки  $k$  вычисляют по формулам (11.2, 11.6) или выбирают из тех же таблиц. При разбивке переходных кривых длины хорд и углы вычисляют по координатам точек с помощью формул обратной геодезической задачи.

Этот способ используется при сооружении кривой в насыпи. Достоинством его является выполнение линейных измерений вблизи кривой. Недостатком способа является быстрое накопление погрешностей: положение каждой последующей точки зависит от точности построения всех предыдущих.

#### 11.5.4. Детальная разбивка кривой способом продолженных хорд

Смысл этого способа показан на рис. 11.8. Получив первую точку на кривой способом прямоугольных координат, продолжают створ линии НК-точка 1, откладывают на нем от точки 1 отрезок, равный длине хорды  $a$ , шпилькой отмечают точку 2'. Положение точки 2 на кривой получают линейной засечкой: из точки 2' рулеткой откладывают расстояние  $2y$ , а из точки 1 лентой откладывают хорду  $a$ . Аналогично получают следующие точки.

Такой способ иногда используют в выемках и тоннелях. Недостатком его является быстрое накопление погрешностей.

#### 11.5.5. Разбивка кривой в закрытой местности, кратные кривые

Шаг разбивки кривой кратен целому числу метров. Такие отрезки кривых называют кратными кривыми. При разбивке длинных кривых или при трассировании дороги в залесенной местности кривую разбивают на части равной длины (обычно пикет) и измерение линий ведут не по касательным, а по хордам, заменяя кривую вписанным многоугольником. При подготовке данных используют формулы (11.1–11.6). Поясним сказанное примером.

**Пример 4.** Требуется построить в лесу кривую с параметрами:  $R = 1000$  м,  $\theta = 20^\circ 22,4'$ , начало кривой на ПК4 (рис. 11.10). Разбивка кривой любым из приведенных ранее способов потребует значительных рубок.

Подготовка данных:

- по формуле (10.1) вычисляют длину кривой  $k = 355,57$  м, это составляет три пикета и остаток  $55,57$  м, т. е.  $k_1 = 100$  м и  $k_2 = 55,57$  м;
- по формуле (11.2) вычисляют углы поворота, соответствующие кривым  $k_1, k_2$ :  $\varphi_1 = 5^\circ 43,8'$ ,  $\varphi_2 = 3^\circ 11,0'$ , контроль:  $3\varphi_1 + \varphi_2 = \theta$ ;
- по формуле (11.6) вычисляют длины хорд, соответствующих кривым:

$$a_1 = 99,97 \text{ м}, \quad a_2 = 55,57 \text{ м}.$$

Последовательность разбивки (рис. 11.10):

- устанавливают теодолит Т5 в точке НК, ориентируют лимб на предыдущий пикет отсчетом  $180^\circ$  (по прямой назад);
- поворотом алидады устанавливают на горизонтальном круге отсчет  $\varphi_1/2 = 2^\circ 51,9'$  и по полученному направлению на ПК5 прорубают просеку;

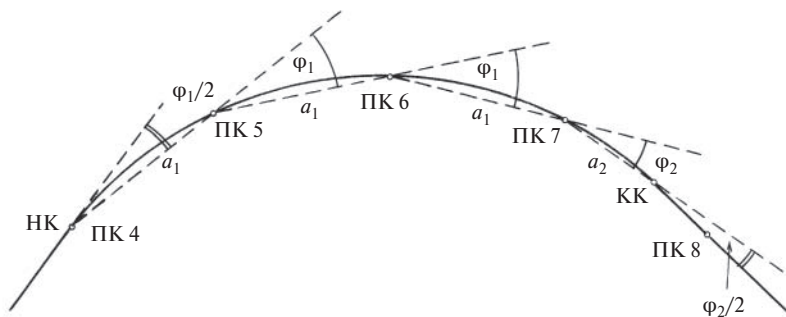


Рис. 11.10

– откладывают расстояние  $a_1 = 99,97$  м и закрепляют на кривой ПК5;

– переносят теодолит в полученную точку ПК5, ориентируют лимб отсчетом  $180^\circ$  назад на точку НК;

– поворотом алидады устанавливают на горизонтальном круге отсчет  $\varphi_1 = 5^\circ 43,8'$  и по полученному направлению на ПК6 прорубают просеку;

– откладывают хорду  $a_1 = 99,97$  м и закрепляют ПК6 на кривой;

– аналогично получают на кривой ПК7; таким образом была построена кривая длиной 300 м;

– переносят теодолит в точку ПК7, строят угол  $\varphi_2 = 3^\circ 11,0'$ , прорубают просеку, откладывают отрезок  $a_2 = 55,57$  м и фиксируют точку конца кривой с пикетажным положением ПК7 + 55,57;

– переносят теодолит в точку КК, строят аналогично предыдущему угол  $\varphi_2/2 = 1^\circ 35,5'$  и получают направление касательной, по которому продолжают разбивку пикетажа, т. е. откладывают отрезок  $100 - 55,57 = 44,43$  м и получают ПК8 на прямой.

При таком способе разбивки все измерения выполняются на узких просеках в непосредственной близости от кривой – стрела изгиба, найденная по формуле (11.9), не превышает 0,5 м.

Если потребуются детальная разбивка всей кривой, то ее выполняют в пределах уже построенных частей одним из ранее рассмотренных способов.

## 11.6. Вертикальная разбивка сооружений

Эта работа состоит в установке в проектное положение по высоте точек, которые до этого уже были выставлены в проектное положение в плане одним из ранее описанных способов. Вертикальная разбивка производится от точек высотной разбивочной основы – реперов, которых на строительной площадке обычно значительно больше, чем точек плановой основы.

### 11.6.1. Вынос в натуру заданной проектной отметки

В районе работы должен быть репер. Последовательность выноса:

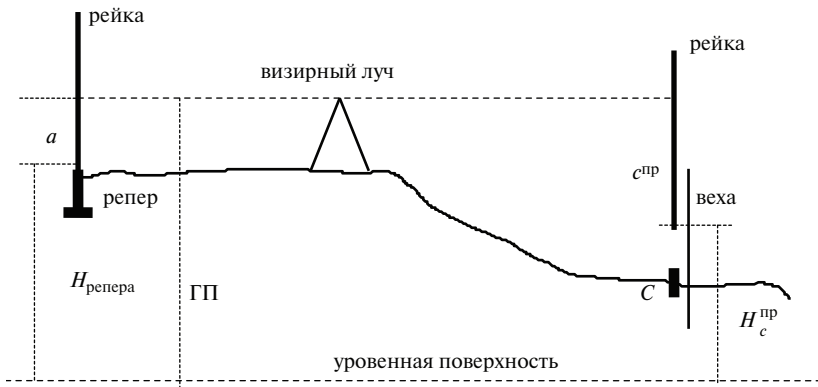


Рис. 11.11

- между репером и выносимой точкой устанавливают нивелир и берут отсчет  $a$  по рейке, установленной на репере (рис. 11.11);
- вычисляют горизонт прибора  $\text{ГП} = H_{\text{реп}} + a$ ;
- по горизонту прибора и заданной проектной отметке вычисляют проектный отсчет по рейке на выносимой точке  $c^{\text{пр}} = \text{ГП} - H_c^{\text{пр}}$ ;
- рядом с колом, отмечающим положение выносимой точки  $C$  в плане, устанавливают веху и перемещают рейку вдоль вехи, пока с визирной осью нивелира не совместится отсчет, равный вычисленному  $c^{\text{пр}}$ ;
- по основанию рейки на вехе проводят черту на проектной отметке;
- для контроля вынос отметки повторяют по красной стороне рейки, а для ответственных работ – от другого репера.

### 11.6.2. Вынос в натуру линии с заданным проектным уклоном

Эту работу можно выполнить с помощью нивелира или теодолита.

Вынос линии с помощью нивелира сводится к выносу нескольких точек с заданной проектной отметкой.

**Пример 5.** По заданному направлению уложить 25-метровые рельсы по прямой с уклоном  $i^{np} = -0,005$ . Последовательность работы (рис 11.12):

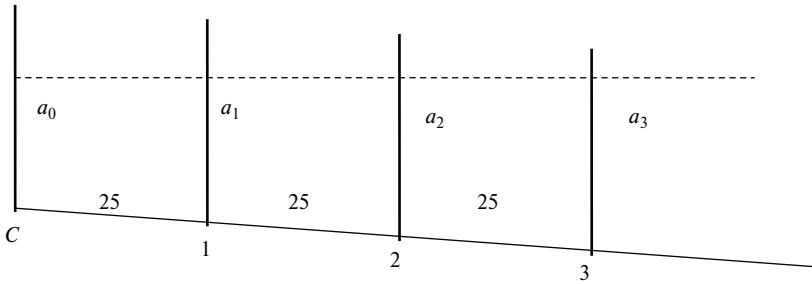


Рис. 11.12

- первую точку  $C$  выносят так, как показано в п. 11.6.1;
- по заданному направлению устанавливают колья 1, 2, 3... через 25 м;
- в середине выносимой линии устанавливают нивелир и берут отсчет  $a_0$  по рейке на точке  $C$  (пусть  $a_0 = 1527$ );
- вычисляют проектные отсчеты  $a_1, a_2, a_3 \dots$  в точках 1, 2, 3... по формуле  $a = a_0 - i^{np}d$ , где  $d$  – расстояние до выносимой точки:

$$a_1 = 1527 - (-0,005 \cdot 25) = 1527 + 125 = 1652; \quad a_2 = 1777; \quad a_3 = 1902 \dots$$

- колья, установленные на выносимых точках 1, 2, 3 ..., забивают так, чтобы отсчет по рейке, установленной на них, был равен вычисленному.

Вынос линии с помощью теодолита сводится к установке на вертикальном круге проектного отсчета и откладыванию от визирного луча равных отрезков. Установив над точкой  $C$  теодолит, определяют место нуля вертикального круга и проектный отсчет при левом положении круга:

$$MO = 0,5(L + П); \quad Л^{np} = \nu^{np} + MO, \quad \text{где } \nu^{np} = \arctg i^{np}.$$

В створе разбиваемой линии забивают колья так, чтобы отсчет по рейке, установленной на них, был равен высоте прибора.

### 11.6.3. Вынос в натуру проектной плоскости

Проектная плоскость задается продольным  $i_1$  и поперечным  $i_2$  уклонами и проектной отметкой начальной точки. Предварительно на местности разбивается сетка квадратов с заданной длиной стороны.

Если  $i_1 = i_2 = 0$ , т. е. задана горизонтальная плоскость, то задача сводится к выносу ряда точек с одинаковыми проектными отметками и одинаковыми проектными отсчетами по рейке.

Если  $i_1 = 0$ , а  $i_2 \neq 0$ , то задача сводится к выносу ряда продольных горизонтальных линий. Предварительно точки первой поперечной линии выносятся в проектное положение так, как показано в п. 11.6.2.

Если оба уклона не равны нулю, то сначала вычисляют проектные отметки всех вершин квадратов, а затем выносят каждую точку так, как показано в п. 11.6.1.

## 11.7. Исполнительные съемки

Цель исполнительных съемок – установление соответствия построенного объекта проекту. Документы исполнительных съемок: исполнительный продольный профиль, исполнительные планы, обмерные чертежи. Нормативная база таких съемок – Свод правил, Руководство и Технические указания по проверке плана и продольного профиля железнодорожного пути.

Съемка путей и сооружений железнодорожного транспорта начинается с разбивки пикетажа по оси пути. Пикетаж закрепляют светлой масляной краской на внутренней стороне шейки правого по ходу километража рельса. На каждом пикете и плюсовой точке теодолитом разбивают поперечники, концы которых закрепляют кольями и располагают на расстоянии не менее 20 м от границы земляных сооружений. За 40–60 м до начала кривой, в пределах всей кривой и на 40–60 м после конца кривой пикетаж разбивают через 20 м для кривых с  $R > 400$  м, через 10 м для кривых с меньшим радиусом и отмечают краской на обоих рельсах.

На перегонах вертикальная съемка состоит в прокладке по пикетажу хода технического нивелирования. В прямых нивелируют по головке правого по ходу рельса, в кривых — по обоим рельсам для проверки правильности выполнения отвода возвышения. В ход обязательно включают все реперы, которые должны располагаться не реже чем через 2 км. Отметки точек поперечников определяют из тригонометрического нивелирования.

Плановая съемка состоит в том, что в пределах рабочей площадки рулеткой измеряют расстояния от оси главного пути до края балластной призмы и бровки земляного полотна, способом перпендикуляров привязывают к пикетажу все элементы путевой ситуации, места пересечения с линиями связи и электропередачи. За пределами рабочей площадки все точки поперечников снимают методом тахеометрической съемки. Все искусственные сооружения и путевые здания обмеряют.

Кривые снимают разными способами. Если съемка производится электронным тахеометром, то определяют координаты оси пути на каждой 20-метровой (или 10-метровой) точке деления кривой. Если для съемки используется обычный теодолит, то по оси пути или по наружному рельсу прокладывается теодолитный ход, от сторон которого в каждой точке деления кривой методом бокового нивелирования по рейке измеряют стрелы изгиба рельсов в кривой. Рейку располагают горизонтально перпендикулярно визирному лучу, отсчеты берут по вертикальной нити сетки. Обработка материалов такой съемки позволяет получить полную информацию о кривой: определить угол поворота, положение начала и конца переходных и круговых кривых, длины этих кривых, средний радиус круговой кривой, отступления уложенной кривой от проектного положения.

На станциях пикетаж разбивают по каждому пути. На каждом пикете и каждой плюсовой разбивают поперечники. По каждому пути прокладывают нивелирный ход: 4-го класса на узловых и участковых станциях и технической точности на промежуточных станциях и разъездах.

Основной метод съемки плана станции — электронная тахеометрия. Геодезической основой съемки служит система теодолитных или полигонометрических ходов (см п. 9.2.5). При отсутствии электронного тахеометра съемку выполняют по поперечникам. Снимают все элементы путевого развития, путевую ситуацию, все дорожные здания и сооружения.

Аналогично производится съемка парков путей.

По материалам исполнительных съемок составляют:

– для перегонов – исполнительные продольные профили по каждому пути в масштабах 1:10 000 горизонтальный и 1:1000 вертикальный; поперечные профили в масштабах 1:200 для горизонтальных и вертикальных расстояний; продольные профили водоотводных и нагорных канав в масштабах 1:5000 горизонтальный и 1:200 вертикальный; планы в масштабе 1:2000;

– для станций – исполнительные продольные и поперечные профили по каждому пути в тех же масштабах; планы в масштабе 1:1000, а на горловины и сортировочные горки – 1:500;

– на все здания и сооружения составляют обмерные чертежи.

Размеры на профилях показывают в метрах с точностью до 1 м или до 1 см, отметки – в метрах с точностью до 1 см, а для реперов – до 1 мм, углы в градусах с точностью до 1 минуты или до 1 секунды, уклоны – в промилле.

## 12. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ЦИФРОВЫЕ КАРТЫ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Компьютеризация положила начало развития безбумажной информационной технологии и новой индустрии обработки данных со своей наукой – информатикой. **Информационной технологией** называют процесс сбора, переработки, хранения и представления информации для принятия решений.

Информационная технология предусматривает создание банков (баз) цифровых данных на машинных носителях, т.е. преобразование информации из удобной для человека графической, образно-знаковой формы в форму, удобную для ЭВМ – цифровую.

Результат деятельности геодезистов и изыскателей – огромное количество карт, планов, профилей и других пространственно-координированных данных о местности. Современные компьютеры способны выполнить обработку практически любых массивов информации в кратчайшее время, но ввод ее в ЭВМ производится значительно медленнее. Устранение этого несоответствия состоит в создании постоянно обновляемых ведомственных, региональных и национальных банков цифровых картографических данных – цифровых карт и геоинформационных систем, учитывающих запросы любых потребителей.

**Цифровая карта** местности (ЦКМ) – это запись картографической информации о местности в цифровом виде на машинном носителе в заданных кодах, структурах и форматах, удовлетворяющих требованиям прямого ввода и обработки. Цифровая карта создается с полным соблюдением нормативов и правил картографирования, точности карт, генерализации, системы условных знаков. Термин «цифровая карта» означает цифровую модель местности, цифровые картографические данные. Создание ЦКМ связано с дорогостоящим программным обеспечением и аппаратурой.

Карты быстро стареют. Обновление устаревших и создание новых карт другого масштаба и назначения выполняется автоматизированным путем по исходным базам картографической информации, дополненной результатами полевых и фотограмметрических съемок.

Полное математическое описание и количественную оценку информации, представленной на карте, пока дать нельзя. Поэтому ЦКМ не могут полностью заменить традиционные карты.

**Геоинформационная система (ГИС)** – информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. ГИС содержит программное, аппаратное, информационное, нормативно-правовое, кадровое и организационное обеспечение. ГИС включает большое число графических и тематических баз данных, которые можно преобразовывать в пространственную картографическую информацию для принятия на ее основе разнообразных решений, проведения экспертиз, контроля, составления прогнозов и т. п.

По территориальному охвату различают ГИС национальные, региональные, местные. По предметной области (специализации) различают ГИС городские, природоохранные, земельные (кадастровые) и др.

*Кадастр* – это упорядоченная совокупность сведений о правовом, природном, хозяйственном и экономическом положении физических объектов и явлений среды во времени в структурном, организационном, функциональном и информационном направлениях.

Основой ГИС являются базы данных (БД) двух типов, хранящие информацию двух видов: графическую (пространственную) и тематическую (атрибутивную). Пространственная информация описывает расположение и очертание объектов и составляет метрическую основу ГИС. Тематическая информация описывает количественные и качественные характеристики объектов и связи между ними, т.е. дополнительные данные, которые прямо не могут быть нанесены на карту.

Основным источником пространственной и тематической информации для ГИС являются карты: общегеографические, топографические, политические, административные, исторические, природы, народонаселения, экономики, науки, подготовки кадров, обслуживания населения, серии карт и комплексных атласов. Кроме того, широко используются материалы дистанционного зондирования, статистические материалы, справочные издания, отчеты, статьи, книги и пр.

Средством для пространственной организации всей поступающей, хранимой и обрабатываемой в ГИС информации являются картографические проекции, координатные системы, система разграфки карт.

Пространственная информация в ГИС может быть представлена в растровом и векторном виде. Растровые данные хранятся в виде

отдельных точек, которыми пользуются компьютерные программы как по одной, так и группами. Векторные данные хранятся в виде точек и линий, связанных геометрически и математически. Обычно в ГИС анализируются и преобразуются данные в векторной форме. Поэтому растровые данные преобразуются в векторную форму – производится векторизация изображения.

Ввод графической информации с карты в ГИС производится преобразованием изображения местности на карте в её цифровую модель. Такое преобразование называется цифрованием карты. Цифрование производится двумя способами: с помощью дигитайзеров и сканеров.

Дигитайзер – цифрователь карт с ручным обводом линейных условных знаков и автоматической регистрацией координат точек. Код знака фиксируют нажатием клавиши. Положение линии определяется серией последовательно расположенных точек. Цифровая информация записывается на машинном носителе в векторном виде – векторном формате, т.е. в виде набора векторов фиксированной длины.

Сканер – автоматический цифрователь карт, построчно разворачивающий изображение при перемещении сканирующего луча. Изображение на карте записывается на машинном носителе в растровом виде – растровом формате, т.е. в виде точек (растр-элементов), для каждой из которых определяется яркость и координаты.

Собранная информация хранится в базах данных в виде тематических слоёв аналогично поэлементному содержанию карты.

Оба вида баз – это файлы цифровых данных. Для работы с ними ГИС имеет *систему управления базами данных (СУБД)*. С помощью СУБД производится поиск, сортировка, добавление и исправление информации в базах данных.

Кроме СУБД ГИС имеет систему визуализации данных, выводящую на экран информацию в виде карт, профилей, таблиц, схем и т. п., и систему анализа и обработки данных.

*Система вывода* ГИС обеспечивает представление информации в удобном для потребителя виде. С помощью графопостроителей и принтеров можно получать высококачественные изображения. Результаты работы ГИС могут быть представлены в виде видеofilмов, записаны на дискеты, распечатаны в виде отчетов, отправлены по сети в другие компьютерные системы.

Информация, хранящаяся в ГИС, может приносить пользу только тогда, когда она используется для решения практических задач.

ГИС служит информационной основой для решения следующих задач:

- принятие решений управленческого уровня;
- перспективное и оперативное планирование развития территорий;
- оптимальное проектирование промышленных и гражданских объектов в полосе отвода, на территории города, поселка и т.п.;
- разработка генерального плана города и контроль за его реализацией;
- изучение экологических, социально-экономических, природно-ресурсных условий территорий и их экономическая оценка;
- учет и рациональное использование земли и недвижимости;
- получение достоверной информации о местоположении и эксплуатации инженерных сетей;
- сбор горно-геологических данных, сведений о техногенных процессах и природных запасах недр;
- охрана прав собственников, пользователей, других потребителей региональных ресурсов.

Железная дорога – типичный пример пространственно ориентированного объекта, содержащего огромное количество данных, связей и зависимостей. Для такого объекта создание геоинформационной системы, например, проектирования, строительства и текущего содержания – задача исключительно важная и сложная, но экономически целесообразная. В настоящее время ведётся интенсивная работа по созданию такой ГИС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерная геодезия : учебник для студентов вузов / под ред. Д. Ш. Михелева. – М. : Академия, 2008. – 479 с.
2. Инженерная геодезия (с основами геоинформатики) : учебник для студентов вузов ж.-д. трансп. / под ред. С. И. Матвеева. – М. : Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2007. – 548 с.
3. Визгин А. А. Практикум по инженерной геодезии : учебное пособие для вузов ж.-д. трасп. / А. А. Визгин, В. А. Коугия, Л. С. Хренов. – М. : Недра, 1989. – 284 с.
4. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1: 500 : учебное пособие / Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР. – М. : Недра, 1989. – 285 с.
5. <http://bb.usurt.ru/> Система электронной поддержки обучения Blackboard Learn.
6. <http://biblioserver.usurt.ru> Библиотека УрГУПС.
7. <http://i-exam.ru> Интернет-тренажеры в сфере образования.
8. <http://znanium.com> Электронно-библиотечная система.