

Министерство образования Российской Федерации  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАИК)

---

С.В. Марфенко

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Учебное пособие*

*Для специальности «Прикладная геодезия»*



Москва 2004

**Министерство образования Российской Федерации**

**Московский государственный университет  
геодезии и картографии (МИИГАиК)**

**Утверждено методической  
комиссией геодезического  
факультета МИИГАиК**

**Геодезические работы при строительстве  
тоннелей и подземных сооружений**

**Учебное пособие**

**Для специальности прикладная геодезия**

**Москва 2004**

Геодезические работы при строительстве тоннелей и подземных сооружений. Марфенко С.В. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2004, с...ил.

Учебное пособие написано в соответствии с утвержденной программой дисциплины Прикладная геодезия и предназначено для изучения одного из ее разделов.

В учебном пособии рассмотрены теоретические и практические вопросы производства инженерно-геодезических работ на различных этапах строительства тоннелей и подземных сооружений. Представлены особенности выполнения этих работ с учетом конструкции и технологии возведения сооружений. Значительное место отведено работам, связанным с проектированием и выносом в натуру оси трассы тоннеля. Изложены вопросы построения геодезического обоснования на поверхности и в подземных выработках с учетом точностных требований к сбойке тоннелей.

Большое внимание уделено различным методам ориентирования подземной геодезической основы, детальным геодезическим разбивкам в подземных выработках, геодезическому обеспечению строительства тоннелей щитовым способом.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Баранов В.Н. (МГУЗ),  
кандидат технических наук, профессор Михелев Д.Ш  
(МИИГАиК).

## Содержание

1. Общие сведения о тоннелях и подземных сооружениях.....	4
2. Состав геодезических работ при строительстве тоннелей.....	11
3. Трасса тоннеля и ее аналитический расчет.....	15
4. Схема и методы построения геодезического обоснования.....	24
5. Расчет допусков для построения геодезического обоснования и необходимой точности измерений на различных его стадиях.....	26
6. Особенности построения геодезического обоснования на поверхности....	34
7. Ориентирование подземного геодезического обоснования.....	40
8. Передача отметки в подземные выработки.....	58
9. Геодезическое обоснование в подземных выработках.....	61
10. Геодезические разбивочные работы при подземном строительстве.....	68
11. Геодезические работы при щитовой проходке тоннелей.....	81
12. Наблюдения за деформациями при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.....	86
13. Список литературы.....	89

# Геодезические работы при строительстве тоннелей и подземных сооружений

## 1. Общие сведения о тоннелях и подземных сооружениях

К подземным сооружениям относят расположенные ниже поверхности Земли в толще горных пород тоннели, ангары, гаражи, галереи и камеры различного назначения. Их строят на путях сообщений, в составе крупных гражданских, промышленных, энергетических и оборонных комплексов. В ряде случаев возведение подземных сооружений является единственно возможным средством преодоления ситуационных и рельефных препятствий в трудных топографических и гидрологических условиях, более рационального использования территории городов и промышленных площадок, подземного пространства под ними, а также обеспечения безопасности жизнедеятельности.

Особое место подземные сооружения и тоннели различного назначения занимают в городском строительстве, при решении задач благоустройства и улучшения условий транспортного и пешеходного движения.

Подземные камеры больших размеров возводят в энергетике и гидротехнике. Подземные машинные залы современных крупных гидростанций имеют длину более 1200м, высоту до 50м и ширину до 25м. В таких же камерах размещают оборудование для выработка электроэнергии и перекачки воды на гидроаккумулирующих станциях, реакторы и вспомогательное оборудование на атомных электростанциях. Подобные камеры используют при создании объектов гражданской обороны.

Любое подземное строительство связано с разработкой и выемкой горных пород (грунтов). Образованная в толще пород полость для размещения сооружения в целом называют *подземной (горной) выработкой*, а её торец, где разрабатывают грунт-забоям. Вертикальные выработки (шахты) между поверхностью и проектным уровнем под землёй называют *стволами*. В случае если раскрытие подземной выработки на полное сечение сооружения ведётся отдельными участками (*калоттами*), прокладывают вспомогательные выработки меньшего сечения: горизонтальные *штольни* и вертикальные *фурнели*.

После выемки грунта возводят основной конструктивный элемент подземного сооружения - его внешнюю оболочку, называемую *обделкой*. Обделка призвана для защиты подземной выработки и самого сооружения от опасных деформаций под действием горного давления. Выбор её конструкции, формы и размеров зависят от назначения и способа возведения сооружения, а также от инженерно-геологических условий и прогнозируемых величин горного давления.

По очертанию поперечных сечений обделка может быть прямоугольной или круговой (рис. 1). В прямоугольной обделке (а) различают стены 1, перекрытия 2, лоток 3. В общем случае круговая обделка (б) состоит из стен 1, верхнего свода 2, обратного свода 3. Такую обделку применяют в малопрочных и слабоустойчивых грунтах, в которых действует вертикальное и боковое давление.

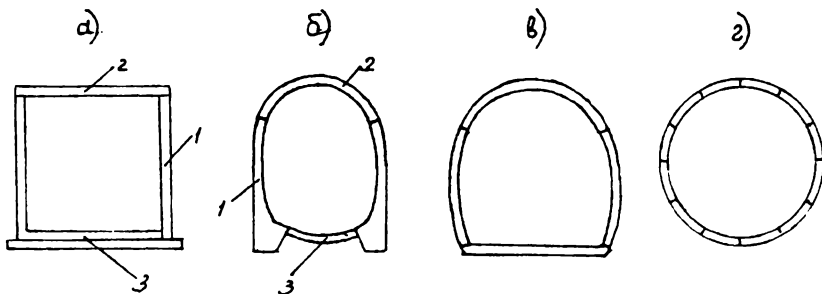


Рис. 1. Поперечные сечения обделок

Обделку(в) без обратного свода устраивают в довольно прочных грунтах, где действует только вертикальное давление. В кольцевой обделке (г) стены отсутствуют.

Обделка может быть монолитной и сборной, каменной, бетонной, железобетонной и металлической.

Ограниченное обделкой пространство служит для движения транспортных средств и технического персонала, для размещения дополнительных конструктивных элементов сооружения(фундаментов, перегородок, перекрытий и т.п.) и монтажа различного технического оборудования (энергетического, вентиляционного, механического, подъёмно - транспортного и др.).

В зависимости от глубины заложения, топографических, гидрологических и экономических условий подземные сооружения строят открытым или закрытым способом. При мелком заложении на малозастроенных территориях применяют *открытый способ*, предусматривающий сначала рытье котлована, а затем возведение в нем сооружения, начиная с обделки. По окончании монтажа обделки сооружение засыпают до уровня планировки территории. При неустойчивых грунтах и отсутствия возможности рытья котлована с естественными откосами по контуру котлована устраивают свайные или шпунтовые ограждения.

В сильно стесненных условиях застроенных территорий применяют траншейный способ, при котором в местах расположения стен обделки роют узкие котлованы-траншеи или колодцы и на проектной глубине бетонируют стены.

*Закрытым способом* строят подземные сооружения глубокого заложения. Разработка грунта и возведение обделки ведется без нарушения земной поверхности через *стволы* или входные участки - *порталы*. В зависимости от условий применяют горный или щитовой способ.

*Горный способ* заключается в разработке всего сечения выработки по частям с заменой при необходимости вынимаемой породы временной крепью (рис.2). Первоначально проходят небольшую выработку, опережающую штольно

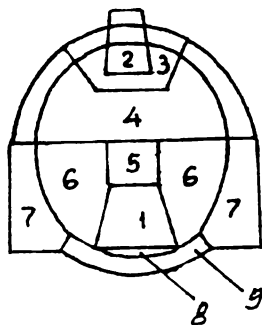


Рис.2. Горный способ разработки грунта

или калотту, из которой в последовательности, показанной цифрами, производят расширение сечения до проектного контура и возведение обделки.

При *щитовом способе* в качестве временной крепи применяют стальной цилиндр-щит, имеющий диаметр несколько больший, чем кольцевая обделка. Породу перед щитом разрабатывают, после чего щит передвигают в образовавшееся пространство, а в освободившемся позади щита пространстве монтируют или бетонируют обделку.

Известны разные технологии возведения подземных сооружений горным и щитовым способом.

В подземном строительстве наибольшее распространение получили тоннели, отличающиеся от других подземных сооружений тем, что их длина значительно превышает поперечные размеры, что повышает требования к геодезическому обеспечению их возведения. В зависимости от назначения тоннели можно подразделить на следующие группы:

- тоннели на путях сообщения (железнодорожные, автодорожные, метрополитены, судоходные, пешеходные);
- гидротехнические тоннели (подводящие и отводящие в гидроэнергетических комплексах, в системах водоснабжения и мелиорации);
- коммунальные тоннели (канализационные коллекторы, водостоки, тоннели для укладки подземных коммуникаций);
- промышленные и горнопромышленные тоннели;
- специальные тоннели.

Тоннели на путях сообщения служат для движения транспорта в горах, под реками, проливами и каналами, городскими кварталами и пересечениями улиц.

Тоннели являются важным звеном в строительстве метрополитена - наиболее эффективного вида городского транспорта.

По гидротехническим тоннелям вода отводится из русла реки при создании котлована и доставляется из водохранилища к зданию ГЭС, осуществляется

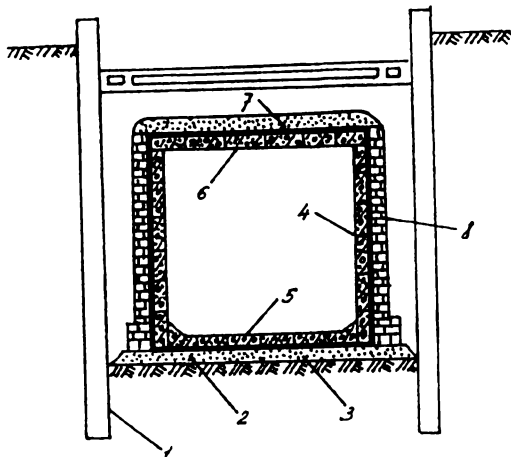


Рис.3. Строительство тоннеля горным способом

переброска воды из одного водохранилища в другое и т.п

Большие объёмы сточных загрязненных и ливневых вод требуют сооружения специальных коллекторов-тоннелей. На крупных промышленных территориях тоннели строят для технологической связи отдельных производств. Широкое использование имеют тоннели в горнорудной и добывающей промышленности. Для строительства крупных подземных сооружений с большими производственными площадями используют систему связанных между собой одиночных тоннелей, галерей и камер, расположенных на разных уровнях.

Особое место тоннели занимают при строительстве метрополитена.

При сооружении тоннелей открытым способом со свайным ограждением 1 (рис.3) на проектной глубине котлована укладывают подготовку 2 из бетона и слой гидроизоляции 3. Затем возводят стены 4 и лоток 5. На стены кладут перекрытия 6, на котором после гидроизоляции устраивают защитную бетонную стяжку 7. Такую же гидроизоляцию и стяжку или защитную кирпичную стенку 8 делают с внешней стороны стен обделки. Сборная обделка тоннелей, сооружаемых открытым способом, может состоять из целых тоннельных секций, изготавливаемых в заводских условиях.

Тоннели метрополитена глубокого заложения сооружают преимущественно закрытым щитовым способом или через порталы, или посредством стволов. При сооружении через порталы (рис.4), оформляющие вход с поверхности в тоннель в виде защитной бетонной стенки 1, строят ramпу 2 - длинную, постепенно увеличивающуюся выемку, стенки которой надёжно укреплены.



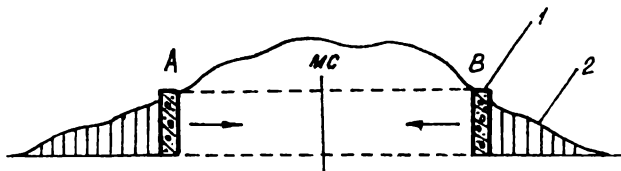


Рис.4. Строительство тоннелей через порталы

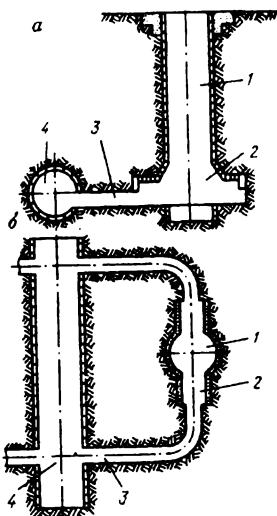


Рис.5. Строительство тоннелей через стволы

При сооружении тоннеля через стволы после проходки шахты до проектной отметки и закрепления ствола 1 (рис.5) строят рудничный двор 2, подходные штольни 3 для выхода от ствола на трассу тоннеля 4 и камеры для сборки щитов.

Тоннельная обделка при щитовом способе работ обычно имеет круговое очертание, соответствующее цилиндрической форме щита. Обделку чаще всего собирают кольцами шириной 0,75-1,0м, состоящими, в свою очередь, из отдельных сегментов - металлических или железобетонных тубингов (блоков) заводского изготовления.

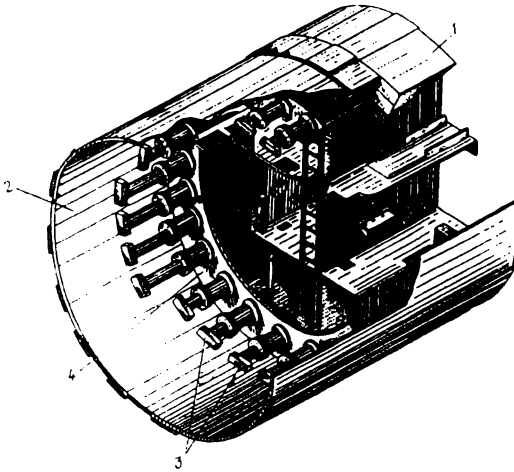


Рис.6. Проходческий щит

Обычный проходческий щит (рис.6) представляет собой жёсткую передвижную конструкцию, состоящую из ножевой части 1, опорного кольца 4, гидравлических домкратов 3 и оболочки 2. Опорное кольцо укреплено вертикальными и горизонтальными перегородками с выдвижными платформами для разработки грунта в забое. В оболочке щита собирают тьюбинговые кольца обделки, которые служат также и упором для домкратов при передвижении щита.

Грунт перед ножевой частью щита выбирают на полное сечение с глубиной заходки около 1м. После передвижения щита в освободившемся позади него пространстве собирают очередное тьюбинговое кольцо. Монтаж тьюбингов в кольцо осуществляют при помощи специального механического укладчика-эректора, передвигающегося на платформе в готовом тоннеле вслед за щитом.

Проходка тоннелей значительно ускорится при применении механизированных щитов, обеспечивающих разработку горных пород в забое, уборку и погрузку породы машинным способом.

Размеры поперечных сечений тоннелей на путях сообщения определяются его требуемой габаритной пропускной способностью. Установлено три вида габаритов тоннеля: подвижного состава, приближения оборудования и приближения строения (рис.7).

Габарит подвижного состава 1 определяется контуром, внутри которого должен помещаться подвижной состав со всеми выступающими частями с учётом его раскачки и наклона при поломке рессор. Габарит приближения оборудования 2 определяется контуром, соединяющим наиболее выступающие точки различного оборудования (кабелей, светофоров, релейных шкафов, осветительных фонарей и др.), устанавливаемого в тоннелях.

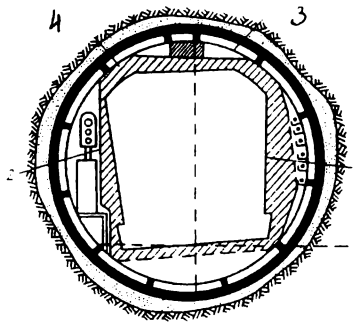


Рис.7. Габариты поперечного сечения тоннеля

Габарит приближения строения 3 определяется контуром, соединяющим наиболее сильно выступающие внутрь точки обделки тоннеля. Пространство 4 между габаритом подвижного состава и габаритом приближения оборудования называют *габаритным запасом* и устанавливают при проектировании тоннеля. Габаритный запас, выраженный величиной минимального расстояния между образующими его габаритными контурами, служит исходной величиной для расчёта и назначения требуемой точности выполнения геодезических работ при строительстве тоннелей.

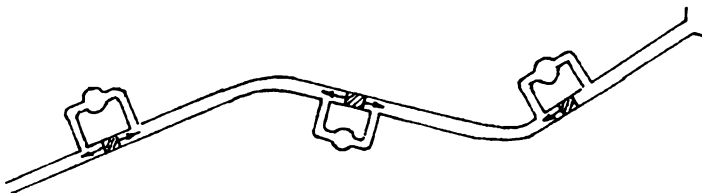


Рис.8. Строительство тоннелей встречными забоями

Для сокращения сроков строительства тоннели глубокого заложения, особенно большой протяжённости, сооружают встречными забоями. При строительстве через порталы (см. рис.4) проходку тоннелей ведут горным или щитовым способом от порталов А и В навстречу друг к другу до места встречи забоев, называемого местом сбойки (МС).

На длинных тоннелях (более 1км) сооружают несколько стволов с выходом на основную трассу, тем самым, деля их на несколько участков (рис.8). На каждом участке работу ведут встречными забоями, благодаря чему темпы строительства значительно вырастают.

В месте сбойки должна произойти полная стыковка обделок встречных тоннелей. Однако из-за влияния различных ошибок в геодезических и

строительно-монтажных работах этого может не произойти и получится несбойка.

Несбойкой тоннелей  $\delta$  (рис.9) принято называть расстояние между одноимёнными точками  $M_A$  и  $M_B$  обделки встречных тоннелей. Её допустимая величина определяется габаритным запасом, предусмотренным проектом. Для тоннелей метрополитена и других путей сообщения его обычно устанавливают равным  $\delta=100\text{мм}$ . Если величина фактической несбойки больше допустимой, то в железнодорожных тоннелях подвижный состав не пройдёт и потребуются переделка тоннелей, что связано с большими дополнительными расходами.

Несбойка в рабочих осях встречных тоннелей представлена отрезком  $O_A O_B = \sigma$ . Её можно разложить на три составляющие: поперечную несбойку  $\sigma_u$ , продольную несбойку  $\sigma_l$  и высотную несбойку  $\sigma_h$ . При строительстве прямолинейных тоннелей  $\sigma_l$  имеет менее существенное значение, чем  $\sigma_u$ . Для криволинейных тоннелей они приобретают одинаковое значение.

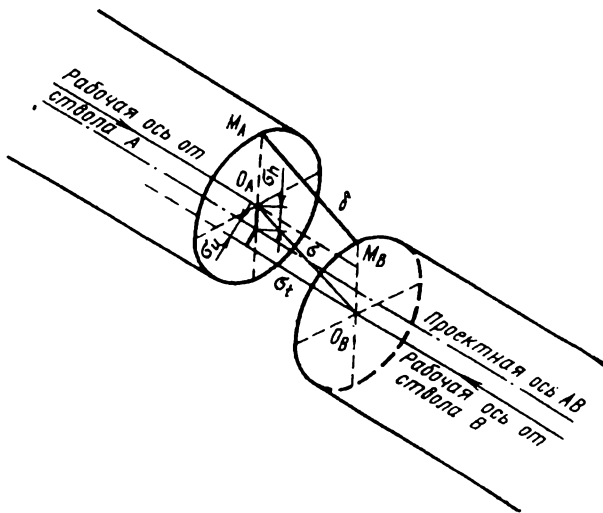


Рис.9. Сбойка встречных тоннелей

## 2. Состав геодезических работ при строительстве тоннелей

Строительство тоннелей и подземных сооружений требует выполнения большого объема геодезических работ, отличающихся многообразием и специфическими особенностями. Эти работы ведутся как на поверхности земли, так и под землёй в горных выработках. По этой причине их часто называют геодезическо-маркшейдерскими работами, особенно в горнодобывающей промышленности. При этом имеется в виду, что геодезические работы в горном деле являются составной частью маркшейдерии, где их издавна принято называть маркшейдерскими.

Для решения задач проектирования и строительства тоннелей и подземных сооружений выполняют комплекс различных видов геодезических работ. По своему составу и разнообразию применяемых методов и технических средств эти работы наиболее полно представлены при строительстве тоннелей метрополитена.

Для тоннелей, сооружаемых встречными забоями с применением щитового способа проходки, весь комплекс работ можно представить следующими основными группами:

1. Построение планового и высотного геодезического обоснования на поверхности.
2. Обновление и составление топографических и специализированных планов на узкую полосу вдоль трассы проектируемого тоннеля.
3. Аналитические расчёты при проектировании тоннеля и геодезическая подготовка проекта для выноса его в натуру.
4. Построение подземного планового и высотного геодезического обоснования.
5. Передача координат, дирекционного угла и отметок с поверхности в подземные выработки.
6. Разбивочные работы по вынесению в натуру осей и конструктивных элементов тоннеля и его сооружений на поверхности и в подземных выработках.
7. Геодезическое обеспечение при ведении тоннельных щитов.
8. Наблюдения за осадками и деформациями обделок тоннелей, наземных зданий и сооружений.
9. Составление исполнительных чертежей тоннельных сооружений.
10. Геодезические работы по укладке рельсовых путей в тоннеле.

Каждая из названных групп, в свою очередь, включает большое количество отдельных видов геодезических работ различного назначения и характера.

Создаваемое при строительстве тоннелей наземное и подземное геодезическое обоснование является исходной разбивочной основой для производства всех разбивочных работ и обеспечивающей с заданной точностью совпадение осей и стыковку конструктивных элементов обделок встречных тоннелей. Оно также служит основой для съемок готовых сооружений и их частей, для наблюдений за осадками и деформациями.

Наземное плановое геодезическое обоснование для тоннелей большой протяженности, особенно в условиях застроенной городской территории, строят, как правило, многоступенчатым, охватывающим все объекты строительства вдоль трассы тоннеля. Это позволяет вести строительные, горнопроходческие и сопутствующие им геодезические работы одновременно на отдельных участках. Часть пунктов обоснования, обычно последней ступени развития, приходится располагать в непосредственной близости от объектов подземного строительства, где возможны деформации земной поверхности под воздействием горных разработок. Чтобы контролировать стабильность и уточнять положение этих пунктов, пункты высших ступеней обоснования закрепляют вне зоны деформаций и производят повторные измерения в сетях.

Подземная плановая геодезическая основа создаётся одноступенчатой, как правило, положением полигонометрических ходов по мере продвижения забоев и возведения обделки.

На различных стадиях проходки тоннелей ходы отличаются длинами сторон и точностью измерений, и могут быть висячими или с координатной привязкой в конце. Координаты начальной (исходной) точки хода и дирекционный угол первой стороны определяют от пунктов геодезического обоснования на поверхности. Процесс передачи через стволы или вертикальные скважины дирекционного угла и координат с поверхности в подземные выработки принято называть *ориентированием* подземной геодезической основы. Ориентирование связывает наземное и подземное обоснование в единую систему координат.

Высотную разбивочную основу на поверхности и под землёй создают методами нивелирования II или III класса в зависимости от длины тоннеля. Передачу отметок, так же как и ориентирование, осуществляют через порталы или стволы вертикальных шахт.

В составе геодезических работ при строительстве тоннелей большое место занимают разбивочные работы по выносу в натуру проектного положения оси тоннеля, его геометрических форм и размеров. Разбивке от пунктов геодезической основы подлежат все те характерные точки трассы тоннеля, которые обеспечивают фронт проведения строительного-монтажных работ. К ним относятся: точки пикетажа, начало и конец круговых и переходных кривых, промежуточные дополнительные точки на этих кривых при детальной разбивке, точки, закрепляющие направление проектной оси тоннеля при щитовой проходке и др.

При строительстве тоннелей ведут наблюдения геодезическими методами за осадками и деформациями обделок в процессе восприятия ими горного давления окружающих пород, а также наземных зданий и сооружений, находящихся в зоне оседаний земной поверхности из-за подземных разработок горных пород.

Основой для проектирования тоннелей и подземных сооружений служат топографические планы, которые вместе с данными инженерно-геологических съёмок позволяют рационально установить место трассы тоннеля в толще горных пород, наметить положение порталных сооружений или стволов шахт и всех объектов производственной базы подземного строительства.

На различных стадиях проектирования используют топографические карты разных масштабов. Для предварительных общих соображений на стадии технико-экономического обоснования строительства достаточно иметь планы в масштабах 1:50000-1:10000, для детального проектирования на стадии разработки проекта или рабочего проекта-1:5000, 1:2000, на стадии разработки рабочей документации – 1:500, 1:200 и 1:100. Портальные сооружения, строительные площадки шахт, вестибюлей, эскалаторных тоннелей, участков открытого способа работ проектируют на планах масштаба 1:200 и 1:100.

Площадь территории, охватываемой топографическими планами для проектирования тоннелей, обычно ограничивают узкой полосой вдоль намечаемого положения трассы шириной 0,3-1,0км. Для составления таких планов по возможности используют имеющиеся топографические планы, дополненные съёмками текущих изменений.

На всех используемых для проектирования планах должны быть отображены все существующие подземные сооружения и инженерные сети. Для этой цели при необходимости выполняют специальную съёмку подземных коммуникаций.

В процессе проектирования возникает необходимость иметь координаты и высоты точек и уровней существующих сооружений, технологически связанных с проектируемыми. Их определяют от пунктов опорных геодезических сетей, создаваемых для строительства подземных сооружений, и используют при аналитическом способе проектирования. *Аналитический способ* является основным при проектировании тоннелей глубокого заложения. В результате его применения проект трассы представляют аналитически: координатами характерных точек и величинами угловых и линейных элементов трассы.

Сущность способа состоит в следующем. После того, как трасса запроектирована на топографическом плане, определяют графически с точностью, которую позволяет обеспечить масштаб плана, координаты начала и конца трассы, вершин углов поворота. Несмотря на то, что полученные значения координат отягощены ошибками графических определений, их принимают в качестве проектных, выражая с округлением до единиц, установленных для данного вида трассы, например, до миллиметров для трассы метрополитена. При этом последние значащие цифры в координатах могут быть нулями, которые приписывают к графически определённым значениям координат.

Координаты начала и конца трассы, геометрически связанной с существующими сооружениями, находят аналитически, используя привязку этих сооружений к пунктам плановой геодезической сети, представленной в той же системе координат, что и используемый при проектировании топографический план.

По полученным координатам решением обратных геодезических задач находят длины линий между вершинами углов поворота, дирекционные углы этих линий и углы поворота. Назначая радиусы круговых кривых, вычисляют длины кривых и линий тангенсов, а также координаты пикетов начала и конца круговых кривых. Для трасс тоннелей метрополитена линейные элементы выражают с округлением до миллиметров, а угловые элементы - до десятых долей секунд.

Найденные таким образом все элементы трассы в плане математически согласованы между собой до принятого в расчётах порядка цифр. Что касается ошибок графических определений координат, то они могут вызвать некоторые смещения всей трассы по отношению к подземной и наземной ситуации. Однако, в процессе проектирования возможно добиться такого положения, чтобы это смещение не вызвало нежелательных последствий при строительстве и эксплуатации тоннелей.

Аналитически полученные основные элементы и координаты характерных точек трассы, определяющие положения запроектированной трассы в плане, представляют на одном из проектных чертежей, называемом *геометрической схемой*. Её данные служат основой для детальных аналитических расчётов, связанных с разбивкой оси тоннеля в процессе строительства.

Данные, определяющие положение трассы в профиле, указывают на проектном чертеже, называемом *укладочной схемой*. На ней профиль запроектированной трассы представлен прямыми отрезками, имеющими уклон и вертикальными кривыми с большим радиусом. Положение точек перелома профиля, начала и конца вертикальных кривых задаётся пикетажом.

### 3. Трасса тоннеля и её аналитический расчёт

Основными элементами трассы тоннеля, кроме длин прямых участков и углов поворота, являются пикеты и все элементы вписываемых круговых и переходных кривых. К ним относятся и характерные точки трассы, подлежащие выносу в натуру: все пикетные точки, начало и конец круговых и переходных кривых, а также другие дополнительные точки, необходимые для детальных разбивок.

Аналитические расчёты трассы состоят в получении её основных линейных и угловых элементов и координат характерных точек. Их выполняют как при проектировании, так и при геодезической подготовке проекта трассы для выноса его в натуру.

При геодезической подготовке проекта, все аналитические расчеты, выполненные в период разработки проекта, повторяют вновь для контроля, чтобы полностью убедиться в правильности проектных данных, используемых для разбивок. При необходимости получают недостающие дополнительные элементы трассы, например, хорды или секущие для разбивки кривых и др. Имея проектные координаты выносимых в натуру характерных точек и координаты пунктов геодезического обоснования, находят разбивочные элементы, соответствующие выбранному способу разбивки.

Запроектированную в плане ось трассы тоннеля, состоящую из прямых участков и круговых кривых называют *разбивочной осью*. Она же на прямых участках является *осью пути*, укладываемого в тоннеле, и *осью тоннеля*.

Тоннели метрополитенов строят преимущественно однопутными. Для движения поездов в прямом и обратном направлениях сооружают два параллельных тоннеля с расстоянием между осями  $D=25,4$ м. Тоннель, расположенный вправо при движении в направлении возрастания пикетажа, именуют правым, а влево - левым.

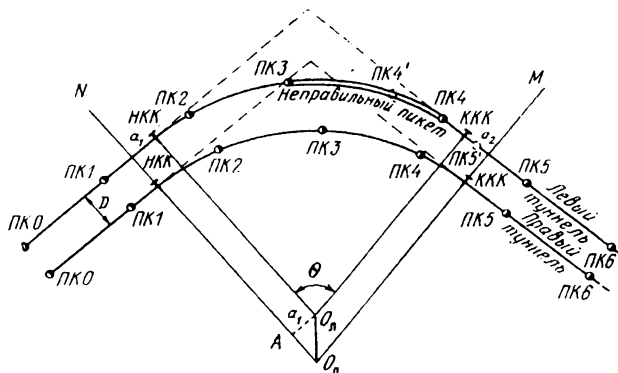


Рис.10. Пикетаж на кривых двух параллельных однопутных тоннелей



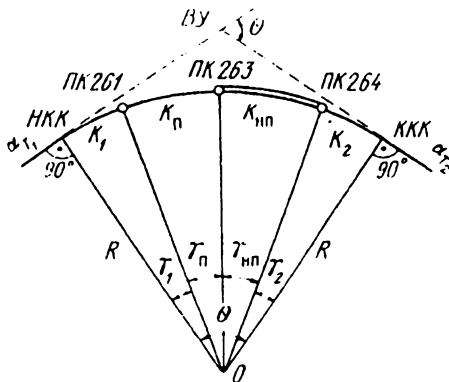


Рис.11. Расчет координат пикетов на кривых

Длины и радиусы круговых кривых на обоих тоннелях проектируют одинаковыми, вследствие чего одноименные пикеты на правом и левом тоннеле не будут расположены на одном перпендикуляре к оси трассы. Для устранения такого неудобства прибегают к введению *неправильных пикетов*, длина которых больше или меньше 100м. Отклонение длины неправильного пикета от 100м определяется величиной (рис.10)

$$a = a_1 + a_2 = 2D \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

где  $\theta$ -угол поворота трассы и  $a_1 = a_2$

На рис.10 значение  $a$  должно быть введено со знаком плюс. Величину  $a$  обычно вводят только в последний пикет на кривой левого тоннеля.

С учётом длин неправильных пикетов рассчитывают пикетажные значения начала и концов круговых кривых.

Координаты пикетов, расположенных на круговой кривой разбивочной оси, вычисляют или по центральным углам и длинам радиусов, или по стягивающим хордам и углам между ними (рис.11).

Центральные углы определяют по формулам

$$\gamma_1 = \left(\frac{K_1 R}{R}\right)\rho; \quad \gamma_n = \left(\frac{K_n R}{R}\right)\rho; \quad \gamma_{nn} = \left(\frac{K_{nn} R}{R}\right)\rho; \quad \gamma_2 = \left(\frac{K_2 R}{R}\right)\rho, \quad (2)$$

где  $\gamma_1$  - центральный угол при точке  $O$  между радиусами, проведёнными через точку  $HKK$  и первый пикет на кривой;  $\gamma_2$  - центральный угол между радиусами, проведёнными через последний пикет и точку  $KKK$ ;  $\gamma_n$  и  $\gamma_{nn}$  - центральные углы, соответствующие нормальному и неправильному пикету;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_n$ ,  $K_{nn}$  - длины дуг, соответствующих центральным углам  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_n$  и  $\gamma_{nn}$ .

Вычисленные значения центральных углов и длин круговых кривых должны удовлетворять равенствам

$$\gamma_1 + n\gamma_n + \gamma_{нп} + \gamma_2 = \theta ; \quad (3)$$

$$K_1 + K_2 + nK_n + K_{нп} = K ,$$

где  $\theta$  - угол поворота трассы,  $K$ - длина всей круговой кривой.

При использовании второго способа вычисления координат на кривой производят по проектному полигонометрическому ходу, образованному хордами и углами между ними. Длины хорд вычисляют по формулам

$$e_i = 2R \sin\left(\frac{\gamma_i}{2}\right); \quad (4)$$

$$e_i = K_i - \left(\frac{K_i^3}{24R^2}\right) \quad (\text{при } \gamma < 3^\circ). \quad (5)$$

Углы хода находят из равнобедренных треугольников, образованных радиусами и стягивающими хордами. Например, при точке *НKK* угол хода между прямым участком трассы с дирекционным углом  $\alpha_{т1}$  и первой хордой равен  $(180^\circ - \gamma_1/2)$ , при точке *ПК261*  $= (180^\circ - \gamma_1/2 - \gamma_n/2)$  и т.д.

Координаты центра кривой круговой вычисляют от точки *НKK* по формулам

$$X_0 = X_{нkk} + R \cos(\alpha_{т1} + 90^\circ); \quad Y_0 = Y_{нkk} + R \sin(\alpha_{т1} + 90^\circ) . \quad (6)$$

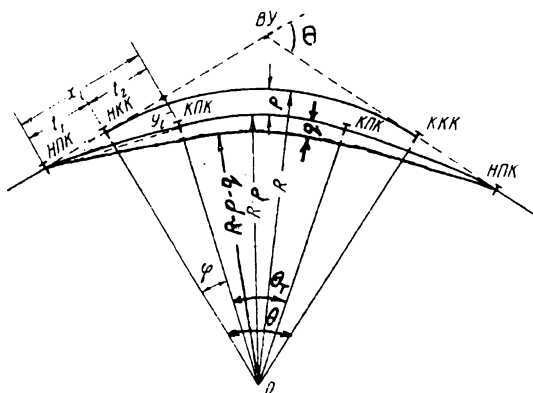


Рис.12. Вставка переходных кривых

Используемые для вычисления координат пикетов дирекционные углы прямых участков и координаты начала и конца круговых кривых служат также исходными при детальном аналитическом расчёте на участках переходных кривых. Технические параметры кривых, установленные в проекте для данной категории трассы, также являются исходными для расчётов.

На участках кривых разбивочная ось, ось пути и ось тоннеля не совпадают из-за вписывания переходных кривых и возвышения наружного рельса над внутренним, что делают с целью обеспечения плавного движения поездов при переходе с прямых участков на круговые кривые и уравнивания возникающей центробежной силы.

Наиболее часто пользуются переходными кривыми в виде *радиоидальной спирали* (клотоиды), имеющей переменный радиус от бесконечности до радиуса круговой кривой.

В результате вписывания переходных кривых круговая кривая разбивочной оси оказывается смещённой к центру кривой на величину  $p$  и радиус её становится равным  $R-p$  (рис.12). Таким образом, ось пути на участке кривых представлена двумя переходными и смещённой круговой кривой.

Смещение оси пути от разбивочной оси вычисляют по формуле

$$p = \frac{l^2}{24R} \left( 1 + \frac{13l^4}{112R^3} \right), \quad (7)$$

где  $l=C/R$  - длина переходной кривой;  $C=av/ig$  - параметр переходной кривой для выбранной скорости движения поезда  $v$  и принятого уклона  $i$  разгона переходной кривой;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $a$  - расстояние между осями рельс (1,524м).

Для определения положения на разбивочной оси и вычисления координат характерных точек *НПК* и *КПК* начала и конца переходных кривых находят длины  $t_1$  и  $t_2$ ,  $x_1$  и  $y_1$ , а также угол  $\varphi$  между радиусами, проходящими через точки *НПК* и *КПК*. Формулы для вычислений имеют вид

$$t_1 = \frac{l}{2} \left( 1 + \frac{l^2}{30R^2} \right); \quad t_2 = \frac{l}{2} \left( 1 - \frac{l^2}{12R^2} \right); \quad (8)$$

$$x_1 = l \left( 1 - \frac{l^2}{40R^2} \right); \quad y_1 = \frac{l^2}{6R} \left( 1 - \frac{l^2}{56R^2} \right); \quad (9)$$

$$t_1 + t_2 = x_1 \quad (\text{контроль}); \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{l\rho}{2R}.$$

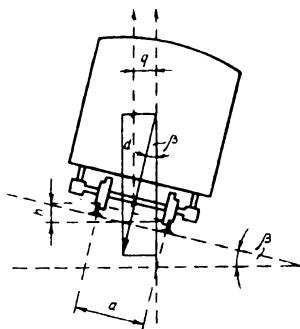


Рис.13. Смещение оси тоннеля на кривых

Координаты точек *КПК* концов переходных кривых можно вычислить двумя путями: по углу  $\varphi$  и радиусу  $R_{\Pi} = (R-p)$  круговой кривой оси пути или по абсциссе  $x_i$  и ординате  $y_i$  в системе координат с началом в точке *НПК*.

Вследствие возвышения  $h$  наружного рельса вагон наклоняется и его центр смещается на величину  $q$  (рис.13). Следовательно, и ось тоннеля по отношению к оси пути будет смещена к центру кривой на эту величину. В соответствии с принятыми на рисунке обозначениями имеем

$$q = h \frac{d}{a}, \quad (11)$$

где  $d$ -высота центра вагона над головками рельсов.

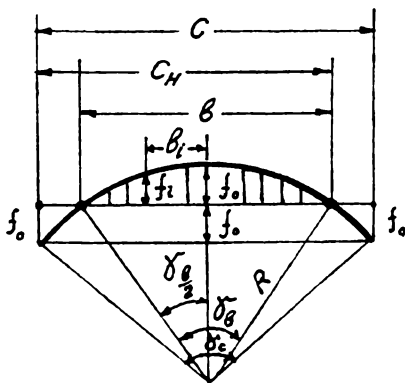


Рис.14. Хорда и секущая круговой кривой

Радиус круговой кривой на оси тоннеля будет  $R_T = R - p - q$ .

При проходке тоннеля на участке кривых от пунктов подземного геодезического обоснования первой выносятся в натуру ось тоннеля. После возведения тоннеля для укладки рельсового пути разбивают ось пути.

Детальную разбивку круговых кривых осуществляют по хордам или по секущим, координаты концов которых получают из расчётов.

При выборе длины хорды  $\sigma$  за основу принимают величину максимально возможного отклонения точек кривой от хорды, т.е. величину стрелки прогиба  $f_0$  в середине хорды, которой можно пренебречь (рис.14).

Стрелка прогиба вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{K_a^2}{8R} \approx \frac{\sigma^2}{8R}, \quad (12)$$

где  $K_a$  - длина кривой, стягивающей хорду.

Расчёты выполняют в следующей последовательности. Из (12), задаваясь,  $f_0 = f_{max}$ , определяют длину хорды, считая её пока не окончательной, а приближённой

$$\sigma_{np.} = \sqrt{8Rf_{max}}. \quad (13)$$

Число таких хорд в пределах полной длины круговой кривой  $K$  равно

$$n_{np.} = \frac{K}{\sigma_{np.}},$$

которое всегда дробное. За окончательное число хорд принимают ближайшее большее к величине  $n_{np.}$  целое число. Соответствующая ему длина кривой и стягивающая её хорда равны

$$K_a = \frac{K}{n}, \quad (14)$$

$$\sigma = K_a - \frac{K_a^3}{24R^2}. \quad (15)$$

Второй член в формуле (15) является известным выражением поправки за переход от кривой к стягивающей её хорде. Длину хорды можно также вычислить по формуле

$$\sigma = 2R \sin \frac{\gamma_a}{2}, \quad (16)$$

где 
$$\gamma_{\theta} = \frac{K_{\theta} \rho}{R} . \quad (17)$$

Следует иметь в виду, что круговые кривые на разбивочной оси, оси пути и оси тоннеля различные по длине. Следовательно, в расчётах должны быть приняты соответствующие величины радиусов  $R$  и центральных углов.

При разбивках круговой кривой по хордам принимают:

для разбивочной оси 
$$K = \frac{\theta R}{\rho} ;$$

для оси пути 
$$K_n = \frac{\theta_n R_n}{\rho}, \text{ где } R_n = R - p;$$

для оси тоннеля 
$$K_T = \frac{\theta_T R_T}{\rho}, \text{ где } R_T = R - p - q, \theta_T = \theta_n .$$

То же следует принимать и при вычислении координат пикетов на круговых кривых трёх осей.

Координаты концов хорд вычисляют по ходу, составленному из хорд и углов поворота, полученных по центральным углам  $\gamma_{\theta}$  по формуле (17).

Иногда предпочитают пользоваться для разбивки длинными хордами, чем достигается уменьшение объёма разбивочных работ. При этом  $f_0 > f_{max}$ . В этом случае необходимо вводить поправки за уклонение кривой от хорды (см. рис. 14). Ими являются стрелки прогиба  $f_i$ , вычисленные по формуле

$$f_i = f_0 - \frac{\sigma_i}{2R} , \quad (18)$$

где  $\sigma_i$  - расстояние от середины хорды до точки, от которой откладывается вычисляемая стрелка прогиба.

Уменьшение объёма работ достигается применением способа секущих. Длина секущей принимается такой, чтобы уклонение круговой кривой от середины секущей и от её концов было бы одинаковым (см. рис. 14). В этом случае соотношение длины секущей  $c$  и длины её хордовой части  $\sigma$  определяется выражением

$$c = \sigma \sqrt{2} . \quad (19)$$

При одной и той же длине круговой кривой и заданном значении стрелки прогиба количество секущих будет в  $\sqrt{2}$  раза меньше, чем хорд.

На основании (19) примем  $\epsilon=0,70c$ . Тогда каждый внешний отрезок секущей равен  $0,15c$ . Крайние секущие, примыкающие к началу и концу круговой кривой и имеющие хордовые части  $\epsilon$  и по одному внешнему отрезку, называют неполными. Длина неполной секущей равна  $c_n=0,85c$ . Стрелка прогиба в середине секущей вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{c^2}{16R},$$

откуда

$$c = 4 \sqrt{f_0 R}. \quad (20)$$

Последовательность расчётов для разбивки круговой кривой по секущим аналогична принятой при разбивке по хордам. Определяют приближённую длину секущей по формуле (20) и приближённое число всех секущих

$$m_{np} = \left(\frac{K}{c_{np}}\right) + 0,3. \quad (21)$$

Установив окончательное число секущих  $m$  путем округления величины  $m_{np}$  до ближайшего целого числа, определяют длину кривой, соответствующей полной секущей, по формуле

$$K_c = \frac{K}{m - 0,3}, \quad (22)$$

длине хордовой части,  $K_\epsilon = 0,7K_c$ , и длине неполной секущей,  $K_{c_n} = 0,85K_c$ . Центральные углы, необходимые для определения углов поворота расчётного хода, составляемого из секущих, вычисляют по формулам

$$\gamma_c = \left(\frac{K_c}{R}\right)\rho; \quad \gamma_{c_n} = 0,85\gamma_c \quad \text{и} \quad \gamma_\epsilon = 0,70\gamma_c. \quad (23)$$

Детальную разбивку переходных кривых производят либо от линии тангенса, либо от стягивающей эту кривую хорды (см. рис.12).

При разбивке переходной кривой на оси пути откладывают абсциссы и ординаты, вычисляемые по формулам (9), которые для разбивки  $i$ -ой точки переходной кривой, находящейся от НПК на расстоянии  $l_i$  имеют вид

$$x_{l_i} = l_i \left(1 - \frac{l_i^2}{40R^2}\right); \quad y_{l_i} = \frac{l_i^2}{6R} \left(1 - \frac{l_i^2}{56R^2}\right). \quad (24)$$

При разбивке переходной кривой на оси тоннеля полученное по формуле (24) значение ординаты следует увеличить на величину

$$q_i = q \frac{l_i}{l},$$

где  $q$ -смещение оси тоннеля от оси пути,  $l$ -длина всей переходной кривой.

Для разбивки вторым способом вычисляют величины стрелок прогиба переходной кривой от стягивающей хорды. Формула для вычисления, полученная на основе преобразования координат, соответствующих формулам (24) имеет вид

$$f_{l_i} = \frac{l_i^3}{6C} \left( \frac{l_i^2}{l^2} - 1 \right) \quad (25)$$

или, учитывая, что  $C=RI$ ,

$$f_{l_i} = \frac{l_i^3}{6RI} \left( \frac{l_i^2}{l^2} - 1 \right). \quad (26)$$

Формулы (25) и (26) справедливы для разбивки переходной кривой от стягивающей хорды как на оси пути, так и на оси тоннеля.

Для выноса в натуру оси трассы по высоте все показанные на укладочной схеме данные проверяют повторными расчётами, которые выполняют таким же образом, как и при проектировании профиля трассы.

Вычисляют высоты всех пикетов и характерных точек плана и профиля трассы, а также основные элементы вертикальных кривых: угол перелома профиля, длину тангенса и вертикальной кривой. Угол перелома получают по разности уклонов сопрягаемых прямых участков профиля. На прямых участках высота относится к головке рельса, а на кривых - к средней высоте внутреннего и наружного рельса.

Радиус вертикальных кривых назначается при проектировании очень большим, а угол перелома профиля обычно так мал, что при сопряжении круговых кривых с прямыми нет необходимости вписывать переходные кривые.

По элементам вертикальных кривых проверяют правильность пикетных значений точек начала и конца вертикальных кривых (*НБК* и *КБК*), точек перелома профиля.

Для детальных разбивок в пределах вертикальных кривых вычисляют поправки  $\Delta H$  для перехода от точек, лежащих на линиях тангенсов, на



вертикальную кривую по формуле

$$\Delta H_i = \frac{K_i}{2R_g}, \quad (27)$$

где  $K_i$  -длина вертикальной кривой от  $HBK$  или  $KBK$  до точки, где вводится поправка;  $R_g$  - радиус вертикальной кривой.

Без заметных искажений длину кривой  $K_i$  можно заменить отрезком по линии тангенса кривой.

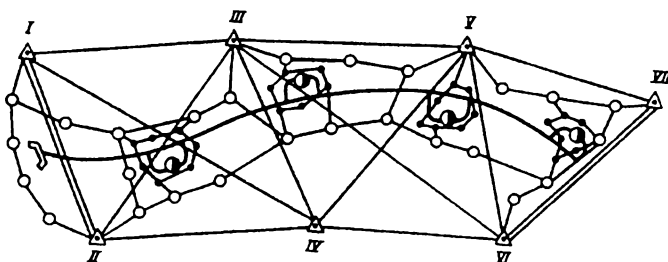


Рис.15.Схема планового геодезического обоснования тоннеля

#### 4. Схема и методы построения геодезического обоснования

Схема наземного и подземного планового геодезического обоснования, создаваемого для решения задач по перенесению проекта тоннеля и других подземных сооружений в натуру, зависит от протяжённости и конфигурации трассы, способа и требований к точности возведения тоннеля, расположения мест открытия подземных работ, топографических и природных условий строительства и др.

Главную плановую основу на поверхности, отличающуюся наибольшей точностью построения, создают в виде тоннельной триангуляции, трилатерации, линейно-угловых построений и полигонометрии. Целесообразно применение для построения сетей спутниковых методов с использованием систем *ГЛОНАСС* и *GPS*.

Для тоннелей большой протяженности опорная сеть может быть представлена вытянутой вдоль трассы тоннеля цепочкой треугольников, геодезических четырёхугольников или центральных систем, а также системой замкнутых

полигонометрических ходов (рис. 15).

Точность построения планового обоснования каждым из указанных методов должна соответствовать требованиям сбойки тоннелей, которые, в свою очередь, служат основой для назначения технических характеристик и необходимой точности измерения элементов в сети.

Если условия позволяют расположить и надёжно закрепить пункты главной плановой основы в непосредственной близости к стволам, скважинам и порталам, через которые будет осуществлена передача координат и дирекционного угла в подземные выработки, ограничиваются созданием только этой одной стадией развития обоснования. В противном случае пункты располагают на удалении от трассы, избегая зоны возможных деформаций под влиянием горных разработок, и сеть сгущают проложением *основной полигонометрии*. Однако и этого часто оказывается недостаточно. Для передачи координат в подземные выработки необходимо иметь опорные пункты вблизи стволов, однако условия для проложения ходов основной полигонометрии на территории приствольных строительных площадок являются весьма неблагоприятными. Поэтому прокладывают самостоятельную систему ходов *подходной полигонометрии*, опирающуюся на пункты основной полигонометрии, положение которых по результатам контрольных измерений признано наиболее стабильным. Желательно один или два пункта подходной полигонометрии расположить на оси ствола и подходных штолен.

Непосредственно перед ориентированием подземного обоснования проводят контрольные измерения как в подходной полигонометрии, так и на исходных для неё и ближайших к ним пунктах основной полигонометрии.

От пунктов подходной полигонометрии координаты передают через стволы. Дирекционные углы сторон подходной полигонометрии имеют недостаточную точность для ориентирования подземной геодезической основы, а поэтому во всех случаях стремятся передачу дирекционного угла произвести непосредственно от сторон главной плановой основы, в крайнем случае, от сторон основной полигонометрии, связывающей смежные стволы. Ориентирование выполняют на пункты первой стороны подземной подходной полигонометрии, прокладываемой в подходных штольнях от ствола до выхода на трассу.

При сооружении тоннелей через порталы необходимость в ориентировании отпадает, т.к. подземная полигонометрия является продолжением ходов основной полигонометрии на поверхности.

После выхода на трассу тоннеля вслед за движущимся вперед забоем прокладывают сначала ходы *рабочей полигонометрии* со сравнительно короткими сторонами 20-50 м, затем подземной основной полигонометрии со сторонами 50-100 м. Для повышения точности передачи дирекционного угла от приствольной линии к забою прокладывают главные ходы подземной полигонометрии, стороны которой объединяют 2-3 стороны основной полигонометрии. Взамен рабочей и основной полигонометрии возможно проложение линейной сети микротрилатерации из вытянутых треугольников с измеренными высотами.

Ходы всех видов подземной полигонометрии опираются с одного конца, т.е. являются висячими, вплоть до места сбойки встречных тоннелей. Отсюда высокие требования к тщательности производства измерений и надёжности их контроля. От пунктов подземной геодезической основы задают направление забоя, ведут все разбивочные работы по сооружению тоннеля.

Высотное геодезическое обоснование, создаваемое в виде нивелирных сетей или отдельных ходов, должно обеспечить вынесение проекта профиля трассы в натуру, сбойку встречных тоннелей по высоте, а также наблюдения за осадками поверхности. Класс нивелирования устанавливают в зависимости от требуемой точности сооружения тоннеля по высоте, допустимой величины сбойки, общей длины тоннеля и расстояний до места сбойки.

Реперы у двух смежных стволов или порталов, от которых передают проектные отметки в подземные выработки, желательно связывать независимыми нивелирными ходами.

## 5. Расчёт допусков для построения геодезического обоснования и необходимой точности измерений на различных его стадиях

Расчёты состоят в том, что, зная допустимую величину несбойки обделки тоннеля  $\delta$  (см. рис.9), определяемую габаритным запасом, находят какую часть этого допуска следует отнести на отдельные основные источники ошибок, влияющих на несбойку, среди которых ошибки основных геодезических работ.

На величину несбойки обделки тоннеля влияют следующие основные ошибки:

- 1) ошибка планового геодезического обоснования  $\delta_1$ ;
- 2) ошибка высотного геодезического обоснования  $\delta_2$ ;
- 3) отклонение тубинговых колец при их укладке от вынесенной в натуру оси тоннеля (эксцентриситет)  $\delta_3$ ;
- 4) отклонение геометрической формы колец от проектной (эллиптичность)  $\delta_4$ ;
- 5) деформация колец под влиянием горного давления  $\delta_5$ ,

Следовательно, имеем

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2} . \quad (28)$$

Можно положить, что влияния ошибок высотного обоснования на несбойку будет в два раза меньше, чем планового, т.е.  $\delta_2 = 0,5 \delta_1$ .

Принимая  $\delta = 100\text{мм}$  и  $\delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = 50\text{мм}$  получаем

$$100^2 = \delta_1^2 + 0,25\delta_1^2 + 50^2 + 50^2 + 50^2 ,$$

откуда

$$\delta_1 = 45 \text{ мм} . \quad (29)$$

Таким образом, допуск на влияние ошибок планового геодезического обоснования можно принять равным 45мм, а допуск на влияние ошибок высотного обоснования - 22,5мм.

Отметим, что величины  $\delta$ ,  $\delta_3$ ,  $\delta_4$ ,  $\delta_5$  могут быть другими, чем принятые в расчётах. Эти величины даются в нормативных документах и в проекте строящегося тоннеля.

Полученные величины допусков позволяют рассчитать допустимое влияние ошибок отдельных стадий геодезических работ по созданию обоснования на величину несбойки рабочих осей встречных тоннелей.

Учитывая, что влияние ошибок подходной полигонометрии на поверхности и в подземных выработках можно свести к минимуму, примем, что на несбойку осей встречных тоннелей сооружаемых от стволов *A* и *B*, влияют следующие основные ошибки:

- 1) ошибка геодезического обоснования на поверхности  $m_1$ ;
- 2) ошибка ориентирования подземной основы через ствол *A*  $m_2$ ;
- 3) ошибка ориентирования подземной основы через ствол *B*  $m_3$ ;
- 4) ошибка хода подземной полигонометрии, прокладываемого от ствола *A* до места сбойки  $m_4$ ;
- 5) ошибка хода подземной полигонометрии, прокладываемого от ствола *B* до места сбойки  $m_5$ .

Таким образом, средняя квадратическая ошибка плановой сбойки в осях встречных тоннелей, сооружаемых через стволы составит

$$\delta_1 = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2} . \quad (30)$$

Как показал анализ практических материалов, для тоннелей длиной от 1 до 1,5км величину влияния перечисленных ошибок можно принять одинаковой, т.е.  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = m_c$ . Тогда  $\delta_1 = m_c \sqrt{5}$ , откуда

$$m_c = \frac{\delta_1}{\sqrt{5}} = 0,45\delta_1 . \quad (31)$$

Принимая согласно (29)  $\delta_1 = 45$ мм, получим для ошибки одного источника  $m_c = 20$ мм.

При сооружении тоннеля через порталы ошибки ориентирования отсутствуют и на точность сбойки рабочих осей влияют только три ошибки: ошибка

геодезического обоснования на поверхности и ошибки в ходах подземной полигонометрии, прокладываемых от обоих порталов к месту сбойки. Величина допустимого влияния одного источника в этом случае вычисляется по формуле

$$m_n = \frac{\delta_1}{\sqrt{3}} = 0,58\delta_1. \quad (32)$$

При  $\delta = 45$ мм  $m_n = 26$ мм.

В расчётах для криволинейных тоннелей

$$m_c = \sqrt{m_{c_u}^2 + m_{c_t}^2}, \quad (33)$$

где  $m_{c_u}$  и  $m_{c_t}$  - соответственно поперечная и продольная составляющие.

По принципу равного влияния имеем

$$m_{c_u} = m_{c_t} = \frac{m_c}{\sqrt{2}} \quad (34)$$

С учётом (31)

$$m_{c_u} = m_{c_t} = \frac{0,45\delta_1}{\sqrt{2}} = 0,32\delta_1. \quad (35)$$

Аналогично для криволинейных тоннелей с порталами получим

$$m_{n_u} = m_{n_t} = \frac{0,58\delta_1}{\sqrt{2}} = 0,41\delta_1. \quad (36)$$

При  $\delta_1 = 45$ мм,  $m_{c_u} = m_{c_t} = 14$ мм и  $m_{n_u} = m_{n_t} = 18$ мм.

Для тоннелей более 1,5км принцип равного влияния становится неприемлемым и приходится величинам  $m$  формулы (30) придавать весовые коэффициенты. Часто применяют следующее соотношение ошибок:

$$m_1 = 0,7 m_c; \quad m_2 = m_3 = 2,5 m_c; \quad m_4 = m_5 = m_c. \quad (37)$$

Полученные величины  $m_c$  и  $m_n$  могут служить основой для расчёта необходимой точности измерений на различных стадиях построения геодезического обоснования: в главной плановой геодезической основе (триангуляция, трилатерация и др.), в основной на поверхности и подземной полигонометрии, при ориентировании.

Допустимые ошибки угловых и линейных измерений вычисляются по формулам, соответствующим избранному методу и схеме геодезического построения.

Рассмотрим принцип расчёта необходимой точности измерений на различных стадиях построения геодезического обоснования, создаваемого по рассмотренной выше общей схеме.

Влияние на сбойку тоннелей между смежными стволами ошибок геодезического обоснования на поверхности, создаваемого триангуляцией и сгущающей её основной полигонометрией, выразится величиной

$$m_1 = \sqrt{m_{\tau_u}^2 + m_{оп_u}^2} , \quad (38)$$

где  $m_{\tau_u}$  - влияние поперечных (к оси тоннеля) ошибок триангуляции;

$m_{оп_u}$  - влияние поперечных ошибок основной полигонометрии.

Исходя из принципа равных влияний с учётом (31), получаем

$$m_{\tau_u} = m_{оп_u} = \frac{m_1}{\sqrt{2}} = \frac{\delta_1}{(\sqrt{2}\sqrt{5})} = 0,32\delta_1 . \quad (39)$$

Для всего ряда триангуляции можно принять

$$m_{\tau_u} = m_{оп_u} = 0,32\delta_1\sqrt{n} = 0,32\delta_1\sqrt{\frac{L}{l}} , \quad (40)$$

где  $n$  - количество сбоек по всей длине тоннеля;  $l$  - средняя длина тоннеля между стволами.

Поперечный сдвиг конечной точки триангуляционного ряда, состоящего из равносторонних треугольников, без учёта ошибки исходного дирекционного угла может быть определён по формуле

$$m_{\tau_u} = L \left(\frac{m_{\beta}}{\rho}\right) \sqrt{\frac{2}{15} \left(\frac{K^2 + K + 3}{K}\right)} , \quad (41)$$

где  $L$  - длина полной диагонали ряда, принимаемая в расчётах равной длине тоннеля;

$m_{\beta}$  - средняя квадратическая ошибка измерения угла;

$K$  - число промежуточных сторон в полной диагонали ряда.

Отсюда с учётом (40) и (41)

$$m_{\beta} = \frac{0,32\delta_1\rho}{\sqrt{Li} \sqrt{\frac{2}{15} \left( \frac{K^2 + K + 3}{K} \right)}} .$$

Величину, вычисляемую по формуле

$$L_{\text{экв}} = \sqrt{Li} , \quad (42)$$

принято называть эквивалентной длиной тоннеля.

При  $\delta_1=45\text{мм}$ ,  $L=4\text{км}$ ,  $l=1\text{км}$  и  $K=4$  средняя квадратическая ошибка измерения угла не должна превышать  $m_{\beta}=1,6$  .

Для расчета необходимой точности измерения углов в основной полигонометрии может быть использована известная формула поперечного сдвига конечной точки вытянутого уравненного хода

$$m_u = \frac{m_{\beta}}{S} [S] \sqrt{\frac{(n+3)}{12}} , \quad (43)$$

где  $[S]$  - длина хода,  $n$ -число сторон.

Поперечный сдвиг конечной точки хода до его уравнивания можно допустить в два раза больше, т.е. равным

$$2m_{\text{опт}} = \frac{m_{\beta}}{S} [S] \sqrt{\frac{(n+3)}{12}} . \quad (44)$$

С учетом (39) получим

$$0,64\delta_1 = \frac{m_{\beta}}{S} [S] \sqrt{\frac{(n+3)}{12}} \quad (45)$$

Откуда,

$$m_{\beta} = \frac{0,64\delta_1\rho}{[S]\sqrt{\frac{(n+3)}{12}}} . \quad (46)$$

При  $\delta_1=45\text{мм}$ ,  $[S]=2\text{км}$ ,  $n=8$  получим  $m_{\beta}=3,0''$ .

Если при прямолинейном тоннеле ошибки линейных измерений не имеют существенного значения при сбойке тоннелей, то при криволинейном тоннеле эти ошибки оказывают такое же влияние, как и угловые. Поэтому следует рассчитать необходимую точность линейных измерений по формуле

$$m_t = m_s \sqrt{n} , \quad (47)$$

где  $m_s$  - средняя квадратическая ошибка измерения одной стороны;  $n$ -число сторон в ходе.

Продольная ошибка в плановом геодезическом обосновании, состоящем из триангуляции и полигонометрии, выражена формулой (35).

Исходя из принципа равного влияния, продольная ошибка в основной полигонометрии равна

$$\frac{m_{c_t}}{\sqrt{2}} = \frac{0,32\delta_1}{\sqrt{2}} = 0,22\delta_1 . \quad (48)$$

Если такую ошибку допустить в середине уравненного хода, то для конечной точки неуравненного хода, её можно принять в 2 раза больше и равной

$$2(0,22\delta_1) = m_s \sqrt{n} \quad (49)$$

откуда

$$m_s = \frac{0,44\delta_1}{\sqrt{n}} .$$

При  $\delta_1=45\text{мм}$  и  $n=8$  получим  $m_s=7\text{мм}$ .

Влияние ошибки ориентирования первой стороны вытянутого хода подземной полигонометрии на поперечный сдвиг конца хода можно выразить формулой

$$m_2 = \frac{m_0}{\rho} l_1 , \quad (50)$$

где  $m_0$  - ошибка ориентирования первой стороны;  $l_1$  - длина хода от ствола до сбойки.



Величина этой ошибки не должна превышать  $m_c$ , рассчитываемой по формуле (31).

Следовательно,

$$\frac{m_0}{\rho} l_1 = 0,45\delta_1,$$

откуда

$$m_0 = \frac{0,45\delta_1\rho}{l_1}. \quad (51)$$

При  $l_1=0,5$ км и  $\delta_1=45$ мм получим  $m_0=8,3''$ ,

Подземный полигонометрический ход, прокладываемый от ствола до места сбойки, является висячим и поперечный сдвиг его конечной точки вычисляется по формуле

$$m_u = \frac{m_\beta}{\rho} l_1 \sqrt{\frac{n+1,5}{3}}. \quad (52)$$

Для прямолинейного тоннеля этот поперечный сдвиг не должен превышать  $0,45\delta_1$ , следовательно,

$$\frac{m_\beta}{\rho} l_1 \sqrt{\frac{n+1,5}{3}} = 0,45\delta_1. \quad (53)$$

Отсюда

$$m_\beta = \frac{0,45\delta_1\rho}{l_1 \sqrt{\frac{n+1,5}{3}}}. \quad (54)$$

При  $l_1=0,5$ км и  $n=5$  получим  $m_\beta=5,4''$ .

На точность сбойки по высоте между двумя смежными стволами  $A$  и  $B$  влияют следующие ошибки:

- 1) ошибка нивелирного хода на поверхности, связывающего два репера, расположенных вблизи смежных стволов  $m_h$ ;

- 2) ошибка передачи отметки с поверхности в подземные выработки через ствол  $A$   $m_{h_2}$ ;
- 4) ошибка передачи отметки через ствол  $B$   $m_{h_3}$ ;
- 5) ошибка нивелирного хода, прокладываемого в подземных выработках от ствола  $A$  до места сбойки,  $m_{h_4}$ ;
- 6) ошибка нивелирного хода от ствола  $B$  до места сбойки  $m_{h_5}$ ;

Общее влияние этих ошибок выразится формулой

$$m_h = \sqrt{m_{h_1}^2 + m_{h_2}^2 + m_{h_3}^2 + m_{h_4}^2 + m_{h_5}^2} . \quad (55)$$

Средние квадратические ошибки  $m_{h_2}$  и  $m_{h_3}$  передачи отметки с поверхности в подземные выработки при строительстве тоннелей можно принять равным 5мм. Ошибка проложения нивелирного хода на поверхности может быть определена по формуле

$$m_{h_1} = \eta \sqrt{l} , \quad (56)$$

где  $\eta$  - случайная ошибка на 1км нивелирного хода;  
 $l$  -длина нивелирного хода (в км).

Если место сбойки будет находиться посередине между стволами, а нивелирование на поверхности и в подземных выработках будет выполняться с одинаковой точностью, то

$$m_{h_4} = m_{h_5} = \eta \sqrt{\frac{l}{2}} . \quad (57)$$

С учётом принятых величин составляющих ошибок формула (55) примет вид

$$m_h = \sqrt{2\eta^2 l + 50} ,$$

откуда

$$\eta = \sqrt{\frac{m_h^2 - 50}{2l}} \quad , \quad (58)$$

При  $m_h = \delta_1 = 22,5$  мм и  $l = 1$  км получим  $\eta = 15$  мм.

Следовательно, сбойка тоннелей по высоте может быть обеспечена нивелированием IV класса.

## 6. Особенности построения геодезического обоснования на поверхности

При строительстве тоннелей большой протяжённости, или располагающихся на значительных площадях, как правило, создают главную плановую основу, являющуюся первой ступенью развития обоснования. При этом применяют различные схемы и методы построения опорных геодезических сетей, таких как триангуляция, трилатерация, линейно-угловые, сети, создаваемые спутниковыми методами. Создаваемые опорные сети могут быть свободными, но должны быть привязаны к пунктам государственной или городской (местной) геодезической сети. Для получения исходных координат достаточно иметь привязку, по крайней мере, одного пункта сети. По возможности в сеть включают как можно больше пунктов городской сети, расположенных в районе трассы тоннеля, но при уравнивании используют лишь те из них, ошибки определения которых позволяют принять их в качестве исходных. Точность определения координат пунктов и дирекционных углов городской геодезической сети, включённых в тоннельную опорную сеть, можно достаточно надёжно проверить в процессе уравнивания результатов измерений в тоннельной сети. Например, появление недопустимых величин свободных членов азимутальных и базисных условий в триангуляции свидетельствует о наличии значительных ошибок в координатах исходных пунктов.

При использовании пунктов городской сети необходимо проанализировать поправки за редуцирование длин сторон на плоскость в проекции Гаусса и на поверхность относимости. Суммарная величина этих поправок, зависящих от выбора осевого меридиана и отметки поверхности относимости, должна быть настолько малой, чтобы обходиться без введения редуцированных поправок в сетях сгущения (наземной и подземной полигонометрии) и при измерениях в разбивочных работах.

В случае невозможности использовать пункты городской сети создают свободную опорную сеть, применяя частную систему координат в проекции Гаусса с целесообразно выбранными осевым меридианом и поверхностью относимости. Так как при строительстве тоннелей метрополитенов разбивочные работы ведутся и на поверхности и под землёй, опорную сеть целесообразно проектировать на поверхность со средней отметкой поверхности Земли вдоль трассы тоннеля. Если разности отметок поверхности Земли по трассе являются

значительными (более 100м) отметку поверхности относимости принимают близкой к средней отметке земли наибольшего по протяжённости участка трассы.

При проектировании тоннельной опорной сети обязательно предусматривают возможность передачи дирекционных углов через смежные стволы от одной и той же стороны, что позволяет исключить влияние ошибки исходного дирекционного угла на величину несбойки.

Характерными особенностями тоннельных опорных сетей являются короткие стороны, а также большие углы наклона сторон, в частности, вследствие расположения пунктов сетей на зданиях. Эти особенности при измерении углов в тоннельных триангуляциях и линейно-угловых построениях вызывают необходимость более тщательного учёта ошибок, связанных с центрированием теодолита и визирных целей и с приведением основной оси теодолита в вертикальное положение. По возможности следует применять систему принудительного центрирования инструментов, исключающую определение элементов центрировки и редукции. При больших углах наклона сторон в измеренные направления следует вводить поправки за наклон оси вращения теодолита из-за неvertикальности его основной оси.

Тоннельная триангуляция является традиционным методом создания опорных сетей при строительстве тоннелей. Ее основные технические характеристики, установленные инструкцией для случая несбойки 10см, приведены в табл. 1. В этой таблице общая длина  $L$  тоннеля установлена для случая сооружения тоннеля из двух крайних точек открытия фронта подземных работ. При наличии промежуточных стволов за длину тоннеля принимается его эквивалентная длина  $L_{эв} = \sqrt{ll}$ , где  $l$  - среднее расстояние между смежными стволами.

Таблица 1

Разряд	Длина тоннеля, км	Длина стороны, км	Средняя квадратическая ошибка измеренного угла, угл. с	Относительная средняя квадратическая ошибка исходной стороны	Относительная средняя квадратическая ошибка слабой стороны	Средняя квадратическая ошибка дирекционного угла слабой стороны, угл. с
I	Свыше 8	4-10	0,7	1:400000	1:200000	1,5
II	5-8	2-7	1,0	1:300000	1:150000	2,0
III	2-5	1,5-5	1,5	1:200000	1:120000	3,0
IV	1-2	1-3	2,0	1:150000	1:70000	4,0

Определенным преимуществом перед триангуляцией, особенно при неблагоприятных условиях для угловых измерений, имеют линейно-угловые построения, обеспечивающие более надежное определение координат пунктов сети. Такое линейно-угловое построение можно представить в виде схемы тоннельной триангуляции с дополнительно измеренными сторонами (см. рис. 15).

Наибольшая точность построения сети достигается измерением в сети всех углов и сторон.

В ряде случаев, например, в сложных городских условиях главную геодезическую основу целесообразно создавать в виде тоннельной полигонометрии, по точности соответствующей тоннельной триангуляции. Ее прокладывают вдоль трассы тоннеля вне зоны деформаций в виде одиночных ходов или системы ходов, образующих замкнутые полигоны. Углы в полигонометрии измеряют с ошибками, не превышающими величин, установленных для различных разрядов тоннельной триангуляции. Другие точностные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Разряд полигонометрии	Относительная средняя ошибка измерения стороны		Допустимая относительная невязка хода		
			для криволинейного тоннеля	для прямолинейного тоннеля	
	для криволинейного тоннеля	для прямолинейного тоннеля		по поперечному сдвигу	по продольному сдвигу
I	1:300 000	1:150 000	1:200 000	1:200 000	1:100 000
II	1:200 000	1:100 000	1:150 000	1:150 000	1:70 000
III	1:150 000	1:70 000	1:120 000	1:120 000	1:60 000
IV	1:100 000	1:50 000	1:70 000	1:70 000	1:40 000

Главную плановую геодезическую основу сгущают основной полигонометрией с целью обеспечения опорными пунктами полосы территории шириной, равной четырехкратной глубине заложения тоннеля. На эти пункты опирается геодезическое обоснование, создаваемое на строительных площадках стволов, vestibuleй, наклонных ходов и других сооружений тоннеля для разбивок и передачи координат в подземные выработки.

Для строительства тоннелей длиной до 1 км основная полигонометрия может служить в качестве главной основы.

Сеть основной полигонометрии представляет собой систему одиночных ходов или замкнутых полигонов. Длина ходов не допускается более 3 км, длина ходов между узловыми - 1 км. Средняя длина стороны должна быть около 250 м, наибольшая - 500 м и наименьшая - 150 м. Точностные характеристики: средняя квадратическая ошибка измеренного угла не должна превышать 3", относительная

невязка в замкнутых полигонах и в ходах между исходными пунктами не должна превышать  $1/35\ 000$ , а для тоннелей длиной менее  $0,5\ \text{км}$  -  $1/20\ 000$ .

Привязку ходов основной полигонометрии к пунктам главной основы, расположенным на зданиях, осуществляют по схеме снесения координат, состоящей не менее, чем из двух треугольников. Линейные и угловые измерения в треугольниках выполняют с точностью, установленной для основной полигонометрии. Желательно выполнять строгое уравнивание измерений в схеме снесения координат, рассматривая ее как линейно-угловое построение, с получением поправок как в углы, так и в стороны.

Часть пунктов основной полигонометрии оказывается расположенный в зоне осадок и деформаций земной поверхности. Поэтому в течение всего периода строительства тоннеля необходимо вести наблюдения за их устойчивостью путем повторных измерений в сети. В той части сети основной полигонометрии, которая используется для работ по разбивкам и ориентированию, повторные измерения необходимо выполнять непосредственно перед производством этих работ. При повторных измерениях нередко возникает задача восстановления утраченных пунктов и проложения дополнительных ходов.

Разбивку на поверхности осей ствола и подходных штолен, а также передачу координат через ствол в подземные выработки выполняют от пунктов подходной полигонометрии, создаваемой на строительной площадке около ствола.

Длины ходов подходной полигонометрии, опирающейся на пункты основной полигонометрии или главной геодезической основы, допускаются длиной не более  $300\ \text{м}$ , длины сторон - не менее  $30\ \text{м}$ . Углы измеряют со средней квадратической ошибкой не более  $4''$ . Относительная невязка в ходах или полигонах не должна превышать  $1/20\ 000$ . В коротких ходах абсолютная невязка должна быть до  $10\ \text{мм}$ .

Приствольные пункты подходной полигонометрии располагают с учетом возможности передачи дирекционного угла к стволу непосредственно с пунктов главной плановой основы. При невозможности обеспечить непосредственную видимость от ствола на пункт главной основы на поверхности или зданиях выбирается вспомогательная точка, через которую можно произвести передачу дирекционного угла от стороны главной основы на приствольную сторону подходной полигонометрии и, тем самым, обеспечить надежное ориентирование подземного обоснования.

Как уже отмечалось выше, пункты сети подходной полигонометрии всегда расположены в зоне возможных деформаций поверхности, поэтому перед каждым ориентированием угловые и линейные измерения в этой сети, так же как и в прилегающих к ней частях основной полигонометрии, повторяют вновь.

Высотное геодезическое обоснование при строительстве тоннелей создают нивелированием II и III классов. Нивелирные ходы или сети прокладывают вдоль тоннеля и привязывают к маркам и реперам I и II класса государственной нивелирной сети.

Нивелирование II класса выполняют при строительстве тоннелей протяженностью свыше  $2\ \text{км}$ , а в горной местности - свыше  $1\ \text{км}$ .

Расстояния между исходными марками и реперами государственного нивелирования должно быть не более 2 км, а между узловыми реперами - 1 км. При строительстве тоннелей метрополитенов расстояние между реперами на проездах не должно превышать 200 м, а на малозастроенных территориях - 300 м. Около строительных площадок, а также в районах сложных узлов строительства, это расстояние уменьшается до 100 м. В качестве реперов используют знаки, закрепляющие пункты планового геодезического обоснования, или специально заложенные реперы грунтового или стенового типа.

Допустимые расхождения в превышениях между прямыми и обратными ходами, а также навязки в полигонах и ходах между исходными реперами определяют по формулам:

$$f_{h_{доп.}} = 5\text{мм}\sqrt{L} \quad \text{или} \quad f_{h_{доп.}} = 1,2\text{мм}\sqrt{n},$$

где  $L$ - длина хода в км и  $n$ -число штативов.

Опорные нивелирные ходы или сети III класса, сгущающие высотную основу II класса, прокладываются в прямом и обратном направлениях для передачи отметок к стволам, скважинам и порталам, а также для наблюдений за осадками зданий и сооружений. Для тоннелей длиной до 2 км, а в горной местности - до 1 км, опорная нивелирная сеть III класса может служить как самостоятельная главная высотная основа. Допустимая навязка в замкнутых полигонах и в ходах между исходными опорными реперами определяется по формулам

$$f_{h_{доп.}} = 7,0\text{мм}\sqrt{L} \quad \text{или} \quad f_{h_{доп.}} = 2,0\text{мм}\sqrt{n}.$$

Нивелирные ходы III класса, прокладываемые между реперами II класса и реперами опорных ходов III класса в одном направлении, служат для определения отметок наблюдаемых осадочных марок на зданиях и сооружениях. Допустимые навязки для таких ходов определяют по формулам

$$f_{h_{доп.}} = 10\text{мм}\sqrt{L} \quad \text{или} \quad f_{h_{доп.}} = 2,5\text{мм}\sqrt{n}$$

В связи с происходящими во время строительства осадками заложенных реперов высотного обоснования периодически выполняют их повторное нивелирование.

Для создания плановой геодезической основы при строительстве тоннелей с успехом и большой эффективностью могут быть применены спутниковые методы.

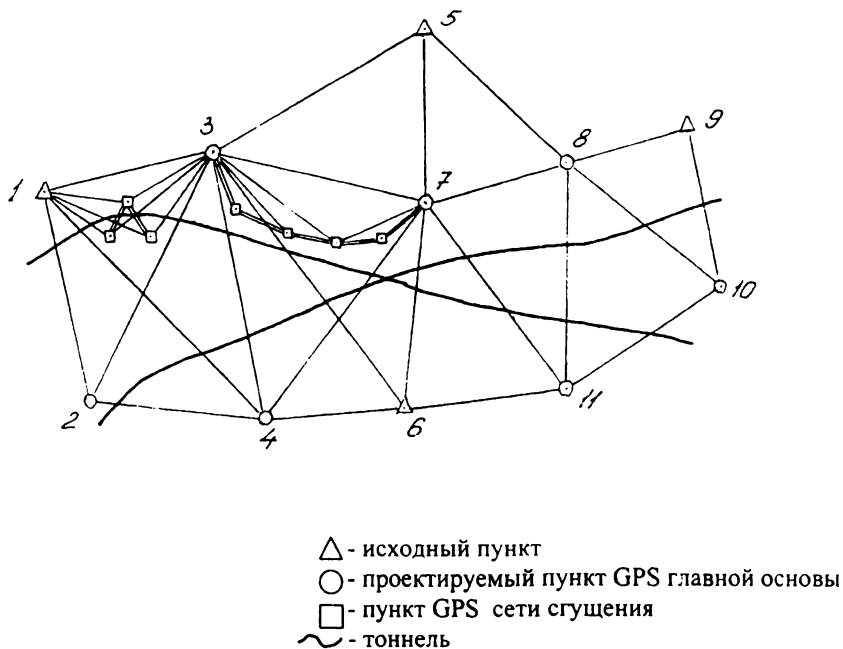


Рис. 16. Схема тоннельной геодезической основы, создаваемой спутниковыми методами

Точностные характеристики *GPS* - методов измерений не только удовлетворяют, но и превышают установленные при строительстве тоннелей требования. Спутниковые методы измерений отличаются не только высокой точностью определения взаимного положения (приращений координат) смежных пунктов, но и высокой производительностью и оперативностью, возможностью производить измерения при любых погодных условиях. При определении координат пунктов сети спутниковыми методами взаимная видимость между пунктами не требуется, поэтому их расположение и плотность устанавливается в основном с учетом дальнейшего использования, в частности, для сгущения геодезической сети. Единственным требованием для приема сигналов со спутников является отсутствие препятствий, закрывающих небо выше 15-20° над горизонтом, расположение зданий и сооружений ближе 15м и телевизионных передатчиков ближе одного км.

Из известных спутниковых методов определения местоположения точек наиболее приемлемыми по точности для построения тоннельных опорных сетей являются дифференциальные (относительные) методы определения положений в статическом, кинематическом и псевдокинематическом режимах. Наибольшая точность определения взаимного положения смежных пунктов достигается при



статическом режиме дифференциального метода измерений. При применении современных геодезических *GPS* - приемников точность характеризуется средней относительной ошибкой порядка  $(1 \div 2)10^{-6}$ .

При создании главной плановой геодезической основы необходимо иметь в качестве исходных не менее трех пунктов государственной или городской триангуляции или полигонометрии высших классов. Чем больше сеть, тем больше требуется исходных пунктов. Для небольших сетей с пятью и менее определяемыми пунктами исходных пунктов может быть два. Возможная схема расположения пунктов главной основы, создаваемой *GPS* - методом, представлена на рис.16. Сгущение главной плановой сети для передачи координат и дирекционного угла в районы строительных площадок может быть также осуществлено дифференциальными методами *GPS* - измерений.

На рис.16 показаны две схемы построения сети сгущения в виде отдельных локальных сетей в районе проведения тоннельных работ. Первая схема предусматривает определение трех приствольных пунктов *GPS* от пунктов главной основы 1 и 3. Вторая - определение ряда точек вдоль тоннеля, образующих базовый ход между исходными пунктами 3 и 7. В том случае, когда расположить станции *GPS* непосредственно у ствола невозможно из-за неблагоприятных условий на площадке и прилегающей территории, прокладывают ходы подходной полигонометрии.

При создании тоннельного высотного геодезического обоснования спутниковыми методами с использованием приемников *GPS* необходимо иметь в виду, что высоты, определяемые приёмниками *GPS* отсчитываются от поверхности эллипсоида, тогда как высоты из нивелирования отсчитываются от поверхности квазигеоида. Для пересчёта из одной системы высот в другую надо знать высоты квазигеоида над эллипсоидом.

В высотной сети, создаваемой *GPS* - методами, минимум четыре точки должны быть совмещены с марками и реперами государственного нивелирования, имеющими нормальные высоты, отсчитываемые от поверхности квазигеоида. По возможности используют как можно больше реперов, имеющихся в районе создаваемой сети. Учитывая, что при применении *GPS* -методов точность высотных определений на порядок ниже, чем плановых, предпочтение отдают созданию нивелирных сетей.

## **7. Ориентирование подземного геодезического обоснования**

Для привязки развиваемого подземного планового геодезического обоснования к пунктам геодезической основы на поверхности производят передачу дирекционного угла и координат с поверхности в подземные выработки, называемую *ориентированием*.

Первое ориентирование выполняют сразу же после завершения сооружения ствола. Оно состоит в передаче направления подземной штольни, сооружаемой для выхода на трассу тоннеля (см. рис.5). На поверхности ось штольни,

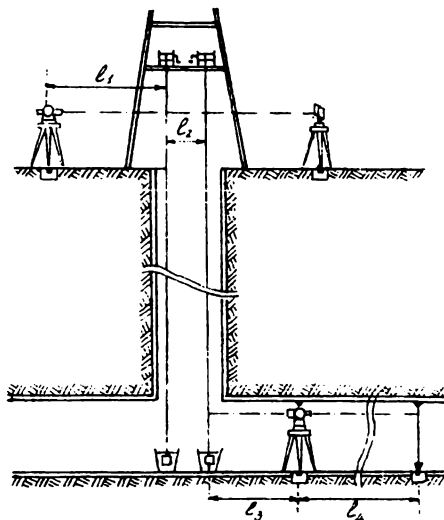


Рис.17. Ориентирование способом двух отвесов

совмещённую с одной из осей и центром ствола, выносят и закрепляют в натуре перед проходкой ствола от ближайших пунктов подходной полигонометрии. Необходимость в этом отпадает, если пункты подходной полигонометрии располагают на оси штольни. Для этого ось штольни и центр ствола должны быть вынесены в натуре от имеющихся пунктов геодезического обоснования или по заданным в проекте привязкам к существующим ситуации. Знаки, закрепляющие ось, включают в прокладываемый ход подходной полигонометрии.

Передачу направления оси штольни в низ ствола выполняют *способом створа двух отвесов*, который состоит в следующем (рис.17). Над пунктами, закрепляющими ось штольни на поверхности, устанавливают теодолит и визирную марку. Наведением визирной оси трубы теодолита на марку задают створ, в который вводят два опущенных в ствол отвеса. Таким образом, ось штольни закрепляют створом двух отвесов. По этому створу сначала визируют, а затем инструментально и задают направление оси штольни при её проходке. После сооружения штольни на длину 10-15м створ двух отвесов, а следовательно, и ось штольни с известным дирекционным углом, задают теодолитом и закрепляют двумя знаками, принимаемыми за первые пункты подземного геодезического обоснования. Для передачи на эти пункты координат измеряют расстояния  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  и  $l_4$ .

Основным источником ошибок ориентирования по способу створа двух

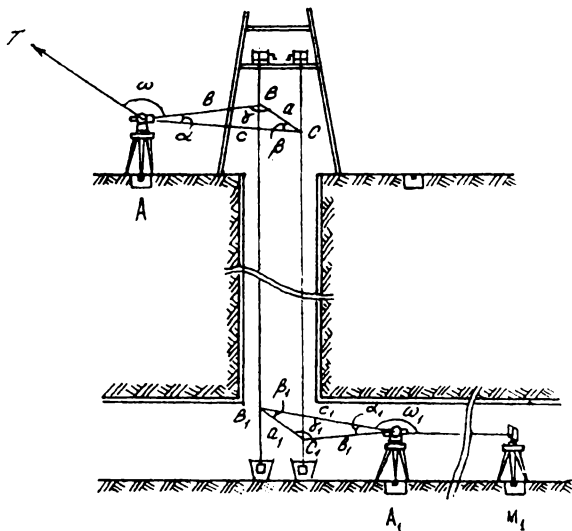


Рис.18. Ориентирование способом соединительного треугольника

отвесов является колебание отвесов. Для демпфирования колебаний грузы отвесов помещают в ёмкости с вязкой жидкостью.

Другим существенным источником ошибок является установка теодолита в створ отвесов в подземной выработке, так как ближайший к инструменту отвес создаёт сектор невидимости. При этом ошибка ориентирования  $\tau$  зависит от толщины нити отвеса  $d$  и расстояния между отвесами  $a$  и определяется по формуле

$$\tau = d/2a. \quad (59)$$

При  $a=4\text{м}$  и  $d=0,6\text{мм}$  получим  $\tau=15''$ .

Точность передачи дирекционного угла способом створа двух отвесов характеризуется ошибкой  $30''$ .

Ошибку можно значительно уменьшить, применяя *усовершенствованный способ створа двух отвесов*. Его особенностью является то, что по шкалам, закрепленным за каждым отвесом, измеряют амплитуду его колебаний, а по ним находят отсчет, соответствующий положению отвеса в спокойном состоянии. Таким образом, теодолит внизу устанавливают не в створ колеблющихся отвесов, а по неподвижным шкалам, на которых зафиксировано более точное вертикальное положение отвесов. Усовершенствованный способ створа двух отвесов позволяет осуществлять ориентирование с ошибкой около  $6''$ .

Способ створа двух отвесов применяют для предварительных ориентировок,

выполняемых при проходке подземных выработок при их удалении от ствола не более 50м. После того, как первая сторона подземного обоснования в подходной штольне закреплена двумя постоянными знаками, ориентирование этим способом уже невозможно, так как потребовало бы корректировки положения центров знаков. Повторное ориентирование может быть выполнено лишь для контроля стабильности положения знаков.

На следующей стадии сооружения тоннеля ориентирование выполняют другими более точными способами, из которых наиболее широкое применение находят способ соединительного треугольника и способ двух шахт.

*Способ соединительного треугольника* основан на применении двух отвесов, опускаемых в ствол, и геодезическом построении в виде вытянутых треугольников наверху и внизу с одной общей стороной, которой является расстоянием между отвесами. Такой треугольник принято называть соединительным.

Схема геодезического построения представляет собой следующее (рис.18). Установив теодолит на приствольном полигонометрическом пункте  $A$  и опустив в ствол два отвеса, получают треугольник  $ABC$ , в котором измеряют угол  $\alpha$  и три стороны  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Кроме того измеряют примычный угол  $\omega$  между стороной треугольника и удаленным пунктом плановой геодезической основы на поверхности. От исходного пункта  $A$  и известного дирекционного угла направления  $AT$ , используя углы и стороны треугольника и примычный угол  $\omega$  вычисляют дирекционный угол стороны  $a$  и координаты положения точек отвеса  $B$  и  $C$ .

Таким же образом, установив теодолит на первой точке подземного обоснования, получают треугольник  $A_1B_1C_1$  в котором измеряют угол  $\alpha_1$  и стороны  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ . Принимая дирекционный угол плоскости двух отвесов, в которой лежит сторона  $a_1$  и полученные наверху координаты отвесов за исходные, по элементам треугольника и измеренному углу  $\omega_1$  вычисляют дирекционный угол приствольной линии  $A_1M_1$  и координаты точек подземной полигонометрии.

Точность ориентирования также, как и любого геодезического построения, зависит от точности измерений и геометрической формы применяемой схемы построения. В соединительном треугольнике от его формы и точности измерения угла  $\alpha$  и сторон  $a$ ,  $b$ ,  $c$  зависит точность определения  $\beta$ , участвующего в вычислении дирекционного угла подземной линии. Поэтому наиболее выгодную форму треугольника можно установить из анализа формулы, выражающей ошибку определения угла  $\beta$ . Эту формулу можно получить на основании выражения

$$\sin\beta = \sin\alpha \frac{b}{a} . \quad (60)$$

После его полного дифференцирования и перехода к средним квадратическим ошибкам, приняв  $m_\beta = m_\alpha = m_s$ , получаем

$$m_{\beta}^2 = tg^2 \beta \left( \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{a^2} \right) \rho^2 m_s^2 + \left( \frac{\delta^2 \cos^2 \alpha}{a^2 \cos^2 \beta} \right) m_{\alpha}^2 \quad (61)$$

Первый член правой части формулы (61) выражает влияние ошибок измерения сторон  $a$  и  $\delta$ , а второй член - ошибок измерения угла  $\alpha$  на точность определения угла  $\beta$ . Обозначим это влияние соответственно через  $m_{\beta_s}$  и  $m_{\beta_{\alpha}}$ . Тогда

$$m_{\beta_s}^2 = tg^2 \beta \left( \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{a^2} \right) \rho^2 m_s^2 \quad (62)$$

или

$$m_{\beta_s} = tg \beta \rho m_s \sqrt{\frac{a^2 + \delta^2}{a^2 \delta^2}} \quad (63)$$

Из формулы видно, что чем меньше угол  $\beta$ , тем меньше влияние ошибок измерения сторон соединительного треугольника на значение вычисляемого угла  $\beta$ . При малом угле  $\beta$  угол  $\alpha$  также будет мал, т.е. соединительный треугольник имеет вытянутую форму.

$$m_{\beta_{\alpha}}^2 = \left( \frac{\delta^2 \cos^2 \alpha}{a^2 \cos^2 \beta} \right) m_{\alpha}^2 \quad (64)$$

или, принимая при малых углах  $\cos \alpha \approx \cos \beta \approx 1$

$$m_{\beta_{\alpha}} = m_{\alpha} \frac{\delta}{a} \quad (65)$$

Заменяя в треугольнике отношение синусов углов на отношение тангенсов, т.е. приняв  $\frac{a}{\delta} = \frac{tg \alpha}{tg \beta}$  и  $tg \beta = tg \alpha \frac{\delta}{a}$ , получим

$$m_{\beta_s} = \frac{\delta}{a} tg \alpha \sqrt{\frac{a^2 + \delta^2}{a^2 \delta^2}} \rho m_s \quad (66)$$

или

$$m_{\beta_s} = tg \alpha \sqrt{\frac{a^2 + \delta^2}{a^4}} \rho m_s = \frac{tg \alpha}{a} \rho \sqrt{1 + \left( \frac{\delta}{a} \right)^2} m_s \quad (67)$$

Из анализа формул (66) и (65) следует, что угол  $\alpha$  должен быть как можно меньше, не более 2-3°; расстояние  $a$  между отвесами желательно иметь как можно больше, хотя и ограничено диаметром стволов бм. Отношение  $v/a$  должно быть по возможности меньшим, не более 1,5, т.е. точки  $A$  и  $A_1$  выгоднее закреплять ближе к стволу.

Ошибку ориентирования по способу соединительного треугольника можно выразить формулой

$$m_0^2 = m_{\alpha_{исх.}}^2 + (m_0)_s^2 + (m_0)_\beta^2 + (m_0)_{np.}^2, \quad (68)$$

где  $m_{\alpha_{исх.}}$  - ошибка исходного дирекционного угла;  $(m_0)_s^2$  - ошибка ориентирования за счёт влияния ошибок измерения сторон соединительных треугольников;  $(m_0)_\beta$  - ошибка ориентирования за счёт влияния ошибок измерения углов в соединительных треугольниках и примычных углов;  $(m_0)_{np.}$  - ошибка ориентирования за счёт ошибок проектирования точек отвесами.

Величина  $m_{исх.}$  определяется из оценки опорной сети для стороны, от которой передается дирекционный угол в подземные выработки. Эта ошибка обычно не превышает 3". При одинаковой точности измерения сторон треугольников на поверхности и под землёй с учетом (67) имеем

$$(m_0)_s^2 = (tg^2 \alpha \rho^2 \frac{a^2 + \sigma^2}{a^4} + tg^2 \alpha_1 \rho^2 \frac{\alpha_1^2 + \sigma_1^2}{a_1^4}) m_s^2. \quad (69)$$

Влияние на точность ориентирования ошибок угловых измерения можно найти, используя формулу для вычисления дирекционного угла подземной линии  $A_1M_1$ ,

$$\alpha_{A_1M_1} = \alpha_{TA} + \omega + \alpha + \beta - \beta_1 + \omega_1 - 360^0.$$

С учётом (65), полагая, что  $m_\omega = m_\alpha$  и  $m_{\omega_1} = m_{\alpha_1}$ , получаем

$$(m_0)_\beta^2 = m_\alpha^2 \left[ 1 + \frac{\sigma}{a} + \left(\frac{\sigma}{a}\right)^2 \right] + m_{\alpha_1}^2 \left[ 1 + \frac{\sigma_1}{a_1} + \left(\frac{\sigma_1}{a_1}\right)^2 \right]. \quad (70)$$

При сравнительно одинаковой форме соединительных треугольников имеем

$$(m_0)_s^2 = 2tg^2 \alpha \rho^2 \frac{a^2 + \sigma^2}{a^4} m_s^2; \quad (71)$$

$$(m_0)_s = \frac{lg\alpha}{a^2} \rho \sqrt{2(a^2 + \sigma^2)} m_s ;$$

$$(m_0)_\beta^2 = \left[ 1 + \frac{\sigma}{a} + \left(\frac{\sigma}{a}\right)^2 \right] (m_\alpha^2 + m_{\alpha_1}^2) . \quad (72)$$

При  $\alpha=3^\circ$ ,  $m_s = 0,8\text{мм}$ ,  $a = 4,5\text{м}$ ,  $\frac{\sigma}{a}=1,5$ ,  $m_\alpha = 4''$  и  $m_{\alpha_1} = 5''$  получим  $(m_0)_s = 4,9''$  и  $(m_0)_\beta = 14,0''$

На основе опытных данных принимают  $(m_0)_{пр.} = 8''$ , при этом её систематическая часть составляет  $(m_0)_{пр.суст.} = 6''$ , а случайная -  $(m_0)_{пр.случ.} = 5''$ .

Ориентирование обычно выполняют при трех положениях отвесов, поэтому влияние случайных ошибок уменьшается в  $\sqrt{3}$ . С учётом этого формула для расчета ожидаемой ошибки ориентирования при трех положениях отвеса примет вид

$$M_0 = \sqrt{m_{\alpha_{исх.}}^2 + \frac{(m_0)_s^2 + (m_0)_\beta^2 + (m_0)_{пр.сл.}^2}{3} + (m_0)_{пр.суст.}^2} . \quad (73)$$

При приведённых выше значениях составляющих ошибок получим  $M_0 = 11,2''$

Для повышения точности передачи дирекционного угла выполняют несколько приемов ориентирования.

Ориентирование способом соединительного треугольника в каждом приеме при трех положениях отвеса не только повышает надёжность и точность ориентирования, но и дает возможность осуществлять контроль правильности проектирования отвесов и правильность измерения углов. С этой целью отвесы, в точках их подвеса, перемешают из одного положения в другое по направлению, перпендикулярном к линии  $\sigma$  на определенную величину, например, как принято, на  $l=15\text{мм}$ .

Разность значений углов  $\omega$  и  $\omega_1$ , измеренных в соседних приёмах, за счёт перемещения отвеса не должна превышать величин

$$(\Delta\omega)_T'' = \frac{l}{\sigma} \rho'' \quad \text{и} \quad (\Delta\omega_1)_T'' = \frac{l}{\sigma_1} \rho'' \quad (74)$$

Контрольные формулы для разности измеренных углов  $\alpha$  и  $\alpha_1$  имеют вид

$$(\Delta\alpha)_T'' = \frac{l}{c}\rho'' - \frac{l}{b}\rho'' \quad \text{и} \quad (\Delta\alpha_1)_T'' = \frac{l}{c_1}\rho'' - \frac{l}{b_1}\rho'' \quad (75)$$

Для контроля результатов измерений длин сторон соединительных треугольников измеряют линейкой с миллиметровыми делениями величины перпендикуляров  $h$  и  $h_1$ , опущенных на стороны  $C$  и  $C_1$ , Измеренные длины сторон  $C_{изм.}$  и  $C_{1изм.}$  сравнивают с вычисленными по формулам

$$C_{выч.} = a + b - \frac{h^2}{2a} - \frac{h^2}{2b} ; \quad (76)$$

$$C_{1выч.} = a_1 + b_1 - \frac{h_1^2}{2a_1} - \frac{h_1^2}{2b_1}$$

В соединительном треугольнике измеряют три стороны и один угол, а поэтому возникает одно избыточное измерение, что вызывает необходимость уравнивания результатов измерений. При уравнивании коррелятным способом единственное условное уравнение можно выразить так

$$\frac{\alpha''}{a} [(a) + (b) - (c)] - \frac{\alpha^2 bc}{\rho^2 a^2} (\alpha) + f'' = 0,$$

где  $(a)$ ,  $(b)$ ,  $(c)$ ,  $(\alpha)$  – поправки в измеренные стороны и угол;  
 $f'' = (\alpha + \beta + \gamma - 180^\circ)$  - свободный член уравнения.

Второй член формулы пренебрегаемо мал, следовательно

$$(a) + (b) - (c) + \frac{f''a}{\alpha''} = 0. \quad (77)$$

Нормальное уравнение имеет вид

$$3K + \frac{f''a}{\alpha''} = 0,$$



откуда 
$$K = -\frac{f''a}{3\alpha''}, \quad (78)$$

Поправки в измеренные стороны определяют по формулам

$$(a) = -\frac{f''a}{3\alpha''}; \quad (\vartheta) = -\frac{f''a}{3\alpha''}; \quad (c) = +\frac{f''a}{3\alpha''}; \quad (79)$$

Уравнивание результатов измерений сводится к введению поправок только в измеренные длины стороны, измеренный угол  $\alpha$  остаётся без изменения. На этом основании применяют упрощенный способ уравнивания.

По измеренным сторонам и углу  $\alpha$  вычисляют значение угла  $\beta$ , затем длину стороны  $c$  по формуле

$$C_{\text{выч.}} = w \cos \alpha + a \cos \beta. \quad (80)$$

Вычислив невязку  $f_s = C_{\text{выч.}} - C_{\text{изм.}}$  получают поправки в измеренные стороны по формулам

$$(a) = (\vartheta) = -\frac{f_s}{3}, \quad (c) = \frac{f_s}{3}. \quad (81)$$

При сооружении тоннелей, по мере продвижения забоя от ствола по трассе, в подземных выработках прокладывают висячие полигонометрические ходы, от точек которых выполняют разбивку сооружений.

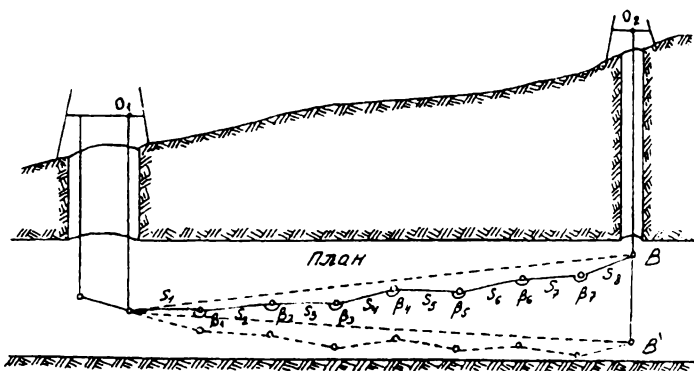


Рис. 19. Ориентирование способом двух шахт

При значительном удалении от ствола ошибки дирекционных углов сторон в конце висячего хода, влияющие на поперечную несбойку тоннелей, могут оказаться недопустимыми. Повысить точность ориентирования хода, т.е. уменьшить ошибки в определении дирекционных углов и координат точек хода, можно, используя ориентирование *способом двух шахт* (рис. 19). Возможность применения этого способа связана с появлением по трассе готовой части тоннеля скважин, пробуриваемых для улучшения вентиляции в забое и подачи строительных материалов. Через такую скважину можно передать в тоннель координаты точки на поверхности, определённые от пунктов наземной геодезической основы, используя отвес или оптические проектирующие приборы. Таким образом, висячий ход оказывается привязанным в конце к точке с известными координатами. Возможно строгое уравнивание такого полигонометрического хода, опирающегося на исходные координаты и дирекционный угол в начале хода и на исходные координаты - в конце хода. Однако, с учетом того, что прокладываемые в тоннелях полигонометрические ходы имеют обычно вытянутую форму, обработку результатов ориентирования способом двух шахт можно выполнить упрощённым способом, который для случая, если в скважину опущен отвес, состоит в следующем.

Невязки полигонометрического хода по осям координат вычисляют по формулам

$$f_y = y_u + y_n ;$$

$$f_x = x_u + x_n ,$$

где  $y_n$  и  $x_n$  - координаты отвеса, полученные от пунктов геодезического обоснования на поверхности;  $y_u$  и  $x_u$  - координаты того же отвеса, полученные от последней точки висячего подземного полигонометрического хода.

Для вытянутого хода длиной  $L$  невязки по осям координат можно разложить на продольную и поперечную невязки, получив их графически или по формулам

$$t = \frac{f_y [\Delta y] + f_x [\Delta x]}{L} ;$$

(82)

$$u = \frac{f_y [\Delta x] - f_x [\Delta y]}{L}.$$

Продольную невязку  $t$ , являющуюся результатом влияния ошибок измерения сторон хода, распределяют пропорционально длинам сторон.

Поправка в сторону  $S_i$

$$v_{s_i} = -\frac{t}{L} s_i. \quad (83)$$

Поперечную невязку хода распределяют пропорционально квадратам ожидаемых величин влияния различных источников ошибок. Поперечная невязка возникает вследствие влияния ошибки геодезического обоснования на поверхности, ошибки угловых измерений в висячем подземном полигонометрическом ходе, а также вследствие ошибки дирекционного угла первой стороны хода.

Обозначая влияние указанных источников ошибок соответственно через  $m_{u_1}$ ,  $m_{u_2}$ ,  $m_{u_3}$ , для подсчета ожидаемой величины поперечной ошибки хода имеем формулу

$$m_u = \sqrt{m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2 + m_{u_3}^2}. \quad (84)$$

Если координаты отвеса определены от пунктов основной полигонометрии, обеспечивающей среднюю относительную ошибку 1:35000, то величину  $m_{u_1}$  можно подсчитать по формуле

$$m_{u_1} = \frac{L}{35000\sqrt{2}} = \frac{L}{50000}. \quad (85)$$

Эта ошибка по сравнению с другими пренебрегаемо мала, поэтому поперечную невязку  $u$  устраняют введением поправок в дирекционный угол первой стороны, принятый за исходный при вычислении координат висячего хода, и в измеренные углы хода.

В вытанутом висячем полигонометрическом ходе

$$m_{u_2} = \frac{m_\beta}{\rho} L \sqrt{\frac{n+1,5}{3}}. \quad (86)$$

Влияние ошибки исходного дирекционного угла на смещение последней точки хода определяется величиной

$$m_{u_3} = \frac{m_0''}{\rho''} L, \quad (87)$$

где  $m_0$  - ошибка дирекционного угла первой линии, полученного из ориентирования по способу соединительного треугольника.

Поправку в исходный дирекционный угол подземного хода определяют по формуле

$$\Delta\alpha'' = -\frac{u_3}{L} \rho'', \quad (88)$$

где  $u_3 = u \frac{m_{u_3}^2}{m_u}$  - часть поперечной невязки, устраняемая исправлением исходного дирекционного угла.

Вторую часть поперечной невязки, равную  $u - u_3$ , исключают введением поправок в измеренные углы хода. Угол, на который при этом повернётся диагональ хода, вычисляют по формуле

$$\omega'' = \frac{u - u_3}{L} \rho'', \quad (89)$$

а поправку в углы  $\nu_{\beta_i}$  - по формуле

$$\nu_{\beta_i} = \frac{\omega}{L} \rho'' \frac{6[n - 2(i - 1)]}{(n + 1)(n + 2)}, \quad (90)$$

где  $n$  - число сторон хода,  $i$  - текущая точка хода.

После определения поправок в углы и длины сторон вычисляют поправки в приращения координат

$$\begin{aligned} \nu_{\Delta y_i} &= \nu_{s_i} \sin \alpha_i + \frac{\Delta x_i \nu_{\alpha_i}''}{\rho''}; \\ \nu_{\Delta x_i} &= \nu_{s_i} \cos \alpha_i + \frac{\Delta y_i \nu_{\alpha_i}''}{\rho''}. \end{aligned} \quad (91)$$

На точность ориентирования способом двух шахт оказывают влияние ошибки построения геодезического обоснования на поверхности, ошибки линейных измерений в ходах подходной полигонометрии у ствола и скважины на поверхности и в ходе подземной подходной полигонометрии, ошибки угловых измерений в ходе основной подземной полигонометрии. Суммарная средняя квадратическая ошибка ориентирования этим способом составляет 8-10" при длине хода до 2км.

В случае, когда в пробуренную скважину нельзя опустить отвес вследствие отклонения скважины от вертикального положения, возможно применение способа передачи координат теодолитом, состоящего в следующем (рис.20).

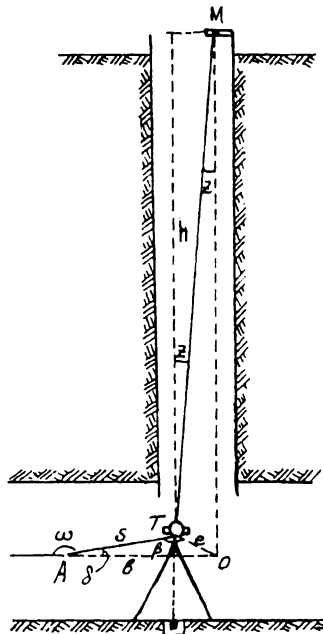


Рис.20. Передача координат в скважину теодолитом

Над скважиной устанавливают визирную цель  $M$ , координаты которой определяют от пунктов геодезического обоснования на поверхности. Внизу под скважиной устанавливают теодолит  $T$ . Измеряют зенитное расстояние  $Z$  на визирную цель  $M$  и расстояние от неё до теодолита или обычно незначительно отличающее от этого расстояния превышение  $h$  визирной цели над теодолитом. По измеренным величинам вычисляют отклонение  $e$  основной оси теодолита от вертикали, проходящей через визирную цель, по формуле

$$e = h \operatorname{tg} Z . \quad (92)$$

Затем измеряют угол  $\beta$  между направлениями на точку  $M$  и точку  $A$ , являющейся последним пунктом висячего хода подземной полигонометрии и расстояние  $S$ . В треугольнике  $AOT$  угол между сторонами  $e$  и  $S$  равен измеренному углу  $\beta$ , так как точки  $M$  и сторона  $e$  лежат в одной вертикальной плоскости.

Координаты точки стояния теодолита  $T$  вычисляют по формулам

$$x_T = x_M + e \cos \alpha_{MT}; \quad (93)$$

$$y_T = y_M + e \sin \alpha_{MT}.$$

где  $\alpha_{MT} = \alpha_{OT}$  можно с достаточной для вычисления точностью определить по формуле

$$\alpha_{MT} = \alpha_{AM} - \beta - \delta, \quad (94)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha_{AM} = \frac{y_M - y_A}{x_M - x_A}, \quad (95)$$

$y_M$  и  $x_M$  - координаты визирной цели,  $y_A$  и  $x_A$  - координаты последней точки  $A$ , вычисляемые по всяческому полигонометрическому ходу. Угол  $\delta$  находят из треугольника  $ATO$  из выражения

$$\sin \delta = \frac{e \sin \beta}{\sqrt{S^2 + e^2 - 2S e \cos \beta}}. \quad (96)$$

Для ориентирования по способу двух шахт находят невязки по осям координат, сравнивая полученные таким образом координаты точки  $T$  с координатами этой же точки, вычисленными по ходу подземной полигонометрии с использованием измеренного угла  $\omega$  и стороны  $S$ . В этом случае точка стояния теодолита  $T$ , как последняя точка подземного хода, должна быть закреплена полигонометрическим знаком. Она будет исходной для дальнейшего проложения хода. Если в качестве последней точки принять точку  $A$ , то её координаты, переданные с поверхности, вычисляют от точки  $T$ , не закрепляя её постоянным знаком, используя вычисленный по формуле (94) дирекционный угол  $\alpha_{MT}$ , измеренный угол  $\beta$  и расстояние  $S$ .

Ошибка определения положения точки  $T$  равна

$$m_T = \sqrt{m_{x_T}^2 + m_{y_T}^2}. \quad (97)$$

Выражая ошибки точки по осям координат, используя (93-96), получим

$$m_T = \sqrt{m_M^2 + \operatorname{tg}^2 Z m_h^2 + \frac{h^2 m_z^2}{\rho^2 \cos^4 Z} + \frac{e^2}{\rho^2} m_{\alpha_{MT}}^2}. \quad (98)$$

При небольших зенитных расстояниях можно принять

$$m_T = \sqrt{m_M^2 + \frac{Z^2}{\rho^2} m_h^2 + \frac{h^2}{\rho^2} m_z^2 + \frac{e^2}{\rho^2} m_{\alpha_{MT}}^2} \quad (99)$$

При  $Z=10$ ,  $h=50\text{м}$ ,  $m_h = 0,1\text{м}$ ,  $m_z = 5$  и  $m_{\alpha_{MT}} = 1$  имеем

$$m_T = \sqrt{m_M^2 + (0,29 \text{ мм})^2 + (1,21 \text{ мм})^2 + (0,2 \text{ мм})^2} \quad (100)$$

Анализ формулы (99) и расчеты показывают, что наибольшее влияние на точность передачи координат оказывают ошибка измерения зенитного расстояния  $m_z$ , но величина и её влияние обычно значительно меньше ошибки определения координат визирной цели на поверхности относительно пунктов подходной полигонометрии, которая может быть до 5мм.

Следует иметь ввиду, что невертикальность основной оси теодолита, вызывающая наклон оси вращения трубы, при малых зенитных расстояний оказывает наибольшее влияние на результаты угловых измерений. Поэтому необходимо принимать меры по более тщательному приведению оси теодолита в отвесное положение, или применять специальную методику измерений, обеспечивающую ослабление влияния этого источника ошибок.

Способ передачи координат теодолитом через скважину предусматривает применение специальной визирной цели, например, в виде марки с подсветкой, а также теодолита, позволяющего измерять малые зенитные расстояния, например, снабжённого насадками на зрительную трубу и отсчетным микроскопом. При больших глубинах ствола (свыше 100м) применение геодезических способов ориентирования, основанных на применении отвесов, связано с определёнными трудностями, которые могут привести к значительному снижению точности. В этом случае применяют гироскопический способ ориентирования, относящийся вместе с известным магнитным способом к группе физических способов. Так же как астрономический и магнитный, гироскопический способ является автономным, позволяющим выполнять ориентирование независимо от наличия исходной геодезической сети и, вместе с этим, быстро, точно, при любых внешних условиях.

*Гироскопическое ориентирование* осуществляется с помощью гиротеодолита - прибора, объединяющего в себе два основных узла- гироскопа и угломерной части. Определение гиротеодолитом направления истинного меридиана, а от него азимута ориентируемого направления, основано на свойстве главной оси маятникового трёхстепенного гироскопа, называемой чувствительным элементом (ЧЭ), совершать под влиянием суточного вращения Земли гармонические колебания, положение динамического равновесия которых совпадает с плоскостью истинного меридиана.

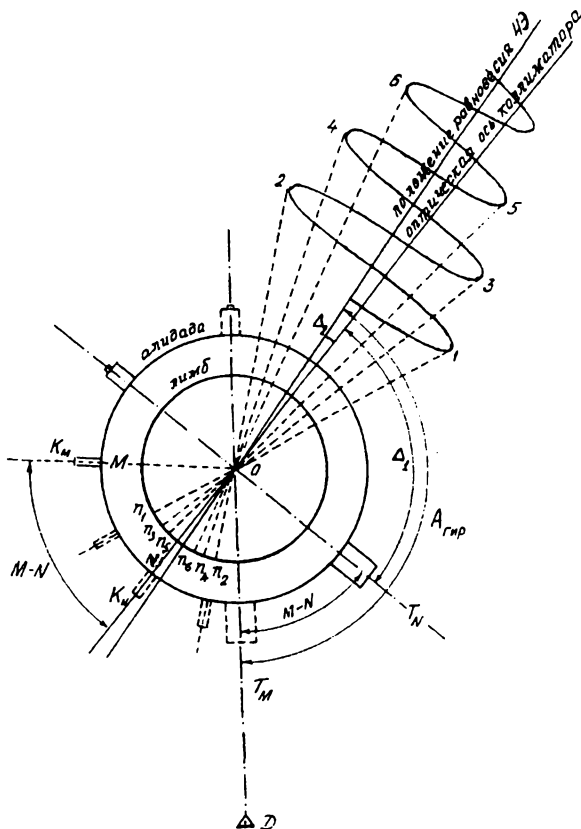


Рис.21. Схема ориентирования гиротеодолитом

Угломерная часть состоит из теодолита и автоколлимационной системы, жестко связанной с его алидадой. Она предназначена для фиксирования по горизонтальному лимбу теодолита положения ориентируемого направления и максимальных отклонений главной оси гироскопа от истинного меридиана (точек реверсии чувствительного элемента ЧЭ). С помощью автоколлимационной системы и дополнительного отсчётного устройства фиксируют моменты реверсии и снимают соответствующие им отсчёты по лимбу.

Схема ориентирования гиротеодолитом показана на рис.21, на котором приняты следующие обозначения:  $T_N$ ,  $K_N$ , и  $T_M$ ,  $K_M$  – положения зрительной трубы  $T$  и коллиматора  $K$ , соответствующие положению равновесию ЧЭ и при наведении на ориентируемое направление;  $N$  и  $M$  - отсчёты по горизонтальному



лимбу гиротеодолита, соответствующие этим положениям зрительной трубы и коллиматора;  $A_{з.ур.}$  - гироскопический азимут ориентируемого направления  $OD$ ;  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  - конструктивные углы между осью зрительной трубы, осью коллиматора и главной осью гироскопа, образующие поправку гиротеодолита  $\Delta$ .

Астрономический азимут направления с точки стояния гиротеодолита  $O$  на точку  $D$  равен

$$A = (M - N_0) + \Delta = A_{з.ур.} + \Delta, \quad (101)$$

где  $M$  - среднее значение направления на точку  $D$  ориентируемого направления, полученное по результатам измерения при  $KП$  и  $KЛ$  дважды, в начале и в конце одного приема ориентирования;  $N_0$  - значение направления положения равновесия колебаний ЧЭ;  $M - N_0 = A_{з.ур.}$  - гироскопический азимут ориентируемого направления  $OD$ .

В современных гиротеодолитах подвеска чувствительного элемента осуществляется с помощью торсиона, представляющего собой ленту с малой площадью сечения (0,5-0,05мм). Это вызывает необходимость введения в измеренное значение направления равновесия колебаний поправки за нульпункт торсионного подвеса  $\Delta N$ , т.е.

$$N_0 = N_{ср.} + \Delta N, \quad (102)$$

$$\text{где } N_{ср.} = \frac{1}{2}N_1 + N_2; \quad N_1 = \frac{1}{4}(n_1 + 2n_2 + n_3); \quad N_2 = \frac{1}{4}(n_2 + 2n_3 + n_4); \quad (103)$$

$n_1, n_2, n_3,$  и  $n_4$  - отсчёты по горизонтальному лимбу гиротеодолита, соответствующие положениям четырех точек реверсии (см. рис.21).

Поправка за нульпункт определяется по формулам

$$\Delta N = CP_0; \quad (104)$$

$$P_0 = \frac{1}{2}(P_1 + P_2); \quad P_1 = \frac{1}{4}(P_1 + 2P_2 + P_3); \quad P_2 = \frac{1}{4}(P_2 + 2P_3 + P_4), \quad (105)$$

где  $P_1, P_2, P_3,$  и  $P_4$  - отсчёты по шкале автоколлиматора в моменты реверсии колебаний ЧЭ;  $C$  - широтный коэффициент поворота оси гироскопа по азимуту из-за закручивания торсиона на одно деление шкалы автоколлиматора (выбирается из паспорта прибора или определяется из специальных исследований).

Дирекционный угол направления, определяемый гиротеодолитом, вычисляются по формуле

$$\alpha = A_{зур.} + \Delta - \gamma + \delta_u + \delta_{пл.} , \quad (106)$$

где  $\gamma$  - сближение меридианов в точке наблюдения;

$\delta_u$  - суммарная поправка за уклонение отвесной линии;

$\delta_{пл.}$  - поправка за приведение направления на плоскость в проекции Гаусса.

Сближение меридианов можно определить по формуле

$$\gamma = \lambda \sin \varphi , \quad (107)$$

где  $\lambda$  - разность долгот точки стояния гиротеодолита и осевого меридиана;

$\varphi$  - широта точки стояния.

Если угол наклона ориентируемого направления более  $8^\circ$  и разница в значениях уклонений отвесных линий на пунктах, закрепляющих это направление, превышает  $4''$ , то вводится поправка

$$\delta = \frac{\eta \cos A - \xi \sin A}{\operatorname{tg} Z} , \quad (108)$$

где  $\xi$ ,  $\eta$ , - составляющие уклонения отвесной линии в плоскости меридиана и первого вертикала,  $A$  - астрономический азимут направления;  $Z$  - зенитное расстояние.

Если значение  $\eta$  на пунктах ориентируемого направления различаются более чем на  $2''$ , то вводится поправка за несовпадение плоскостей астрономического и геодезического меридианов

$$\delta_1 = -\eta \operatorname{tg} \varphi . \quad (109)$$

Общая поправка за влияние уклонения отвесной линии равна

$$\delta_u = \delta + \delta_1 . \quad (110)$$

Постоянная поправка гиротеодолита определяется на одной из ближайших к ориентируемому направлению стороне основной полигонометрии на поверхности, дирекционный угол который определен непосредственно с пунктов главной геодезической основы. Определение поправки гиротеодолита производится двумя приёмами (пусками) на обоих концах исходной стороны, длина которой должна быть не менее 100 м. Поправка вычисляется по формуле

$$\Delta = \alpha_{исх.} - (A_{исх.зур.} - \gamma_{исх.} + \delta_u), \quad (111)$$

где  $\alpha_{исх.}$  - дирекционный угол исходного направления, по которому определяется поправка;  $A_{исх.зур.}$  - гироскопический азимут исходного направления, определенный гиротеодолитом;  $\gamma_{исх.}$  - сближение меридианов в точке стояния гиротеодолита.

Определение гиротеодолитом дирекционного угла стороны подземного обоснования также выполняется на обоих её концах, при этом длина стороны должна быть более 30м. Один приём (пуск) гиротеодолита рекомендуется в следующем порядке:

- 1) визирования при *КП* и *КЛ* с взятием отсчётов по горизонтальному лимбу на конечную точку стороны, для которой определяется дирекционный угол;
- 2) определение нуля пункта торсионного подвеса;
- 3) наблюдение колебаний и вычисление направления положения равновесия ЧЭ при работающем гиротеодолите;
- 4) определение нуля пункта торсионного подвеса;
- 5) визирование при *КП* и *КЛ* и отсчеты на конечную точку стороны, для которой определяется дирекционный угол.

В настоящее время имеется большое разнообразие гиротеодолитов, выпускаемых различными фирмами. К числу наиболее точных серийно выпускаемых относится гидротеодолит *Gi-B3* венгерской фирмы *МOM*. Точность определения азимута одним пуском этого прибора характеризуется средней квадратической ошибкой 5". Имеются гиротеодолиты с автоматическим снятием информации и выдачей результатов измерений с цифрочатающего устройства.

Гироскопическое ориентирование при проложении всячего полигонометрического хода или другого вида подземного геодезического обоснования позволяет надёжно контролировать его поперечный сдвиг, обеспечивая сбйку тоннелей с требуемой точностью.

## 8. Передача отметки в подземные выработки

В тоннели, сооружаемые через порталы, отметки передают в подземные выработки проложенным нивелирных ходов от реперов высотной геодезической основы на поверхности.

При сооружении тоннелей через стволы передачу отметок также как и ориентирование, выполняют через стволы или скважины. Схема передачи отметки, с помощью нивелиров, реек и мерной рулетки представлены на рис. 22

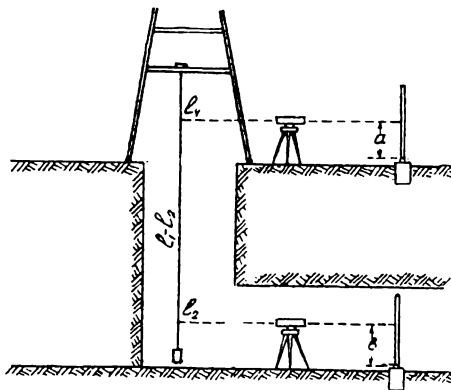


Рис.22. Передача отметки в подземные выработки

Компарированную рулетку опускают нулевым концом вниз и, закрепив другой конец над стволом, подвешивают груз с массой, при которой производилась компарирование рулетки, обычно 10 кг. Нивелирные рейки устанавливают на исходном репере на поверхности и на репер в подземной выработке, на который передается отметка. Нивелирование выполняют двумя нивелирами, расположенными на поверхности и в подземной выработке, беря одновременно отсчеты  $l_1$  и  $l_2$  по рулетке, а затем  $a$  и  $b$  по рейкам.

Отметку подземного репера вычисляют по формуле

$$H_w = H_n + a - [(l_1 - l_2) + \Delta_t + \Delta_k + \Delta_l] - b, \quad (112)$$

где  $H_n$  - отметка исходного репера на поверхности;

$\Delta_t, \Delta_k, \Delta_l$  - поправки в длину рулетки соответственно за температуру, компарирование и удлинение рулетки.

Поправку за температуру рулетки вычисляют по формуле

$$\Delta_t = \alpha(l_1 - l_2)(t_{cp} - t_0), \quad (113)$$

где  $t_0$  - температура, при которой компарировалась рулетка;

$\alpha$  - коэффициент расширения, который для стальной рулетки может быть принят равным  $12,5 \cdot 10^{-6}$ ;

$t_{cp}$  - средняя температура по результатам ее измерения в стволе через каждые 5 метров по высоте и в подземной выработке.

Для подсчета величины удлинения рулетки под действием собственной массы используют формулу

$$\Delta_l = \frac{Pl}{2EF}, \quad (114)$$

где  $P$  - собственная масса рулетки,  $l$  - длина рулетки,  $E$  - модуль упругости,  $F$  - поперечное сечение.

Для стальных рулеток шириной 10мм и толщиной 0,2мм,  $F = 0,02 \text{ см}^2$ ,  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}$ . При  $l = 100\text{м}$  и удельном весе  $\gamma = 8 \text{ г/см}^3$ , масса  $P = 1,6 \text{ кг}$  и поправка  $\Delta_l = 2\text{мм}$ . Для рулетки, длиной 50м поправка  $\Delta_l = 0,5\text{мм}$ .

Ошибка передачи отметки рассмотренным способом складывается из ошибок двух отсчетов по рулетке и ошибок определения поправок за компарирование и температуру рулетки.

Ошибка отсчета по рейке и по рулетке с сантиметровыми делениями можно принять равной 2мм. Если принять ошибку определения одного метра рулетки эталонной линейкой равной  $m_0 = 0,2\text{мм}$ , то для рулетки длиной 100м  $m_{\Delta_l} = 0,2 \sqrt{100} = 2\text{мм}$ .

Ошибка поправки за температуру зависит от ошибки определения температуры  $t_i$  и может быть выражена формулой

$$m_{\Delta_t} = m_t l \alpha \quad (115)$$

При  $l = 100\text{м}$  и  $m_t = 0,5^\circ$  получим  $m_{\Delta_t} = 5\text{мм}$ .

Таким образом, общая ошибка передачи отметки стальной рулеткой на глубину 100 м выразится величиной:

$$m_h = \sqrt{4m_0^2 + m_{\Delta_l}^2 + m_{\Delta_t}^2} = \sqrt{4 \cdot 2^2 + 2^2 + 5^2} = 7\text{мм}.$$

При глубине шахты 50 м  $m_h = 5 \text{ мм}$ .

Для контроля и повышения точности отметку передают при двух горизонтах нивелиров, с двух исходных реперов на поверхности и не менее чем на два подземных репера.

В качестве реперов в подземных выработках используют знаки, закрепляющие плановое подземное обоснование.

При глубинах более 100 м при передаче отметки рассмотренным способом вместо рулетки используют стальную проволоку. Проволоку с грузом опускают в ствол при помощи лебедки и блока. Передачу выполняют при таком положении реек и нивелиров, что и при передаче с помощью рулетки. Но отсчеты берут только по рейкам, а на проволоке горизонтальную визирную ось нивелиров фиксируют либо запилами, либо кольцами тонкой проволоки.

Длину между запилами на проволоке определяют компарированной рулеткой на горизонтальной плоскости при соответствующем натяжении.

При значительных глубинах применяют также проволочный мерный прибор — *глубиномер*. Измерительное устройство прибора представляет собой мерный диск.

длина окружности которого равна одному метру, а доли оборота указывает счетный механизм с точностью 0,001 оборота, т.е. с точностью 1 мм.

Проволока связана с ободом диска надежной фрикционной связью. При ее перемещении при спуске мерный диск вращается, а величина перемещения фиксируется счетчиком. К концу проволоки прикрепляют рейку-груз, после чего проволоку опускают в ствол. При прохождении рейкой-грузом горизонта нивелира, установленного на поверхности, спуск проволоки останавливают и берут отсчет  $a$  по рейке, установленной на исходном репере, отсчет  $l_1$  по рейке - грузу и отсчет  $M_1$  по мерному диску. Затем снова опускают проволоку в ствол до горизонта нивелира, установленного в подземной выработке, и берут отсчет  $b$  по рейке на репере, отметку которого определяют и отсчет  $M_2$  по мерному диску.

По результатам измерений превышение между наземным и подземным реперами вычисляют по формуле

$$h = (M_2 - M_1) + (l_2 - l_1) + (a - b). \quad (116)$$

В полученное превышение вводят поправки за компарирование мерного диска, за температуру диска, за разность температур диска и проволоки. Для контроля и повышения точности такие же измерения выполняют по дополнительной шкале, прикрепляемой к проволоке выше 1-2 м от основной шкалы.

В практике передачи отметок через вертикальные стволы находят применение и высокоточные светодальномеры.

## 9. Геодезическое обоснование в подземных выработках

Сразу же после открытия фронта подземных работ через порталы, стволы, штольни и передачи в подземные выработки дирекционного угла, координат и отметки начинают разбивать подземную плановую и высотную геодезическую основу. От пунктов геодезической основы производят разбивку, обеспечивающую разработку контура выемки грунта, форму и размеры обделок подземных выработок, а также осуществлять исполнительные съёмки поперечных сечений подземных сооружений и смонтированного оборудования. Схема подземного обоснования и принятая методика угловых и линейных измерений должны обеспечить необходимую точность сбоек встречных выработок или тоннелей.

Так как подземное геодезическое обоснование развивают вслед за забоем тысячами (свободными) построениями, в процессе проходки выработок и возведения обделки все измерения необходимо надёжно контролировать и повторять с целью повышения точности построения обоснования и наблюдений за деформациями.

При строительстве тоннелей плановое подземное геодезическое обоснование обычно создают в виде полигонометрических ходов с такими же точностными характеристиками, как и для полигонометрии на поверхности, но отличающихся схемой построения (рис. 23)

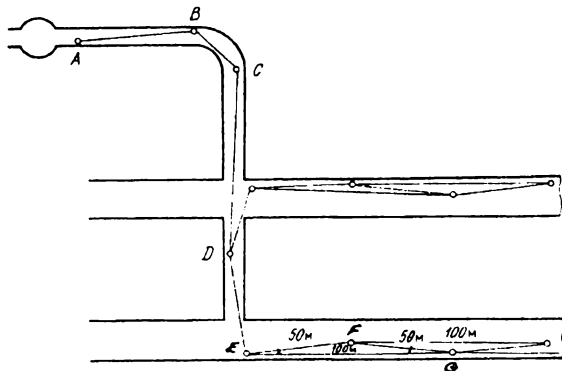


Рис.23. Подземная полигонометрия

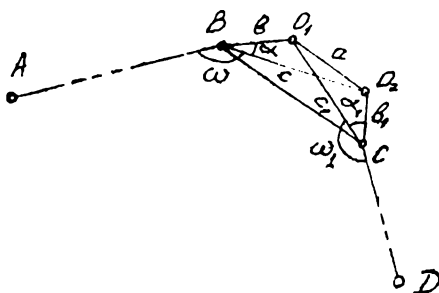


Рис.24. Способы уменьшения влияния ошибок центрирования и редукции

В штольнях, сооружаемых для выхода от ствола на трассу, прокладывают ходы подходящей подземной полигонометрии. Из-за сравнительно небольшой ширины штольни и малого радиуса на участке круговой кривой длины сторон хода подземной полигонометрии, например  $ABCD$  на рис. 23, могут быть менее 10м. Вследствие этого возникает необходимость применять особые способы измерения углов, уменьшающих влияния ошибок центрирования и редукции. Один из таких способов состоит в одновременной установке двух теодолитов на концах короткой линии в точках  $B$  и  $C$  (рис.24). При измерении углов  $ABC$  и  $BCD$  при измерении направлений на точки  $B$  и  $C$  визируют на центрировочные штифты теодолитов, установленных в этих точках. Трубу теодолита, на центрировочные штифты которого визируют, устанавливают горизонтально и перпендикулярно

измеряемым направлениям. Между приёмами трубу поворачивают на  $180^\circ$ . В этом способе также как и при трехштативной системе измерения углов направления с короткой стороной приводятся к оси вращения инструмента, которым измеряют углы, и тем самым уменьшается влияние ошибок центрирования и редукции при передаче исходного дирекционного угла приствольной стороны  $AB$  на сторону  $CD$ .

Для уточнения передачи дирекционного угла с приствольной стороны на прокладываемой полигонометрический ход используют также метод соединительных треугольников. Для этой цели вблизи точек  $B$  и  $C$  подвешивают два отвеса  $O_1$  и  $O_2$ . В образованных таким образом соединительных треугольниках измеряют все стороны, а также углы  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\omega$ , и  $\omega_1$ . В результате обработки измерений со стороны  $AB$  передают дирекционный угол на сторону  $CD$ .

По трассе тоннеля прокладывают два вида полигонометрических ходов: рабочие подземные полигонометрические ходы со сторонами 25-50м и основные полигонометрические ходы со сторонами 50-100м (см. рис.23). Каждая вторая точка рабочей полигонометрии включается в ход основной полигонометрии. При удалении забоя от ствола более чем на 1 км по пунктам основного подземного полигонометрического хода прокладывают главные ходы со сторонами, образованными диагоналями, соединяющими возможно дальше расположенные между собой пункты основного полигонометрического хода.

При длине односторонней проходке 4-6км прокладывают главные ходы со сторонами 600-800м.

Основные полигонометрические ходы, прокладывают, как правило, в виде цепочки вытянутых треугольников, в которых измеряют все углы и стороны, что обусловлено, прежде всего, стремлением иметь надёжный контроль измерений.

Контроль линейных измерений выполняют проверкой условия

$$AG=EF\cos E+FG\cos G \quad (117)$$

Угловые невязки в треугольниках со сторонами 50 и 100м не допускаются более: 8"-при однократном измерении углов, 6"-при подсчете невязки по средним значениям углов, полученных в разновременных измерениях. Перед вычислением координат точек ходов основной полигонометрии угловые невязки в треугольниках распределяют поровну на все углы, а результаты линейных измерений уравнивают так же, как и в соединительных треугольниках при ориентировании.

Для закрепления пунктов подземной полигонометрии применяют различные типы знаков. Пункты полигонометрии в штольнях закрепляют бетонными монолитами с металлическими стержнями (рис.25а). В бетонной обделке тоннеля используют отрезки узкоколейного рельса длиной около 10см, забетонированные в обделку тоннеля (рис.25б). Центр знака фиксируют отверстием диаметром 1-2мм, зачеканенным медью.



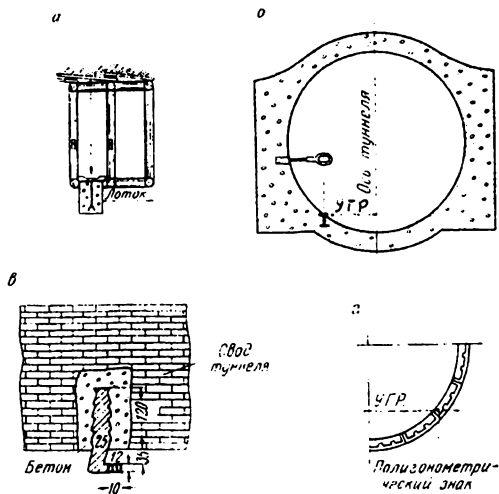


Рис.25. Знаки крепления пунктов подземной полигонометрии

Одновременно с закреплением знака в обделку бетонируют металлическую или деревянную пробку для крепления в ней консоли для установки теодолита.

В своде тоннелей при скальных породах или бетонной обделке пункты закрепляют специальными штырями (рис.25в). В тоннелях с металлической тубинговой обделкой пункты закрепляют на ребре жёсткости обделки, запиливая площадку на уровне выше 10см головки рельса (У.Г.Р.) и просверливая на ней отверстие, которое зачеканивают медью (рис. 25г).

При стеснённых условиях для установки и центрирования теодолита над знаком или под ним, а также для размещения наблюдателя, вместо штативов применяют кронштейны или специальные устройства типа строительных лесов. В качестве визирных целей при коротких сторонах используют нити отвесов, отцентрированные над центрами знаков, а когда это возможно, тонкие шпильки, непосредственно устанавливаемые на центрах знаков.

Углы в подходной, рабочей и основной подземной полигонометрии измеряют теодолитом типа *T2* тремя - четырьмя приёмами. В главных ходах в зависимости от длины сторон измерение углов выполняют теодолитом типа *T2* и *T1* шестью-девятью приёмами. Для уменьшения влияния ошибок центрирования через один-два приёма теодолит центрируют заново, изменяя положение его подставки. При утрате видимости между полигонометрическими знаками, а также для повышения точности угловых измерений при коротких сторонах применяют внецентренный способ измерения углов.

Например, этот способ может быть эффективно использован для связи полигонометрических ходов, прокладываемых в пересекаемых подземных выработках (рис.26).

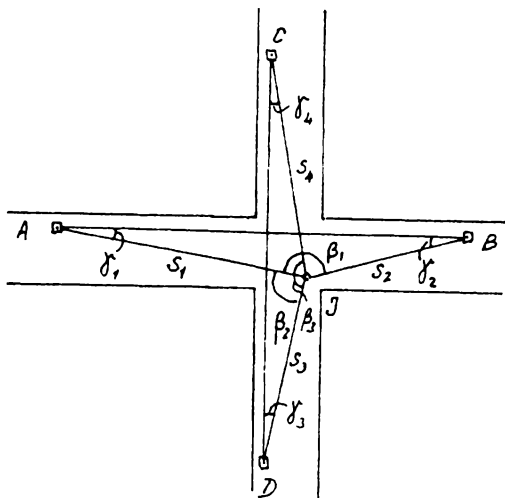


Рис.26. Внецентренный способ измерения углов

Для связи точек  $A$  и  $B$  в одной выработке с точками  $D$  и  $C$  в другой выработке и для передачи дирекционного угла со стороны  $AB$  на сторону  $CD$  нет необходимости закреплять знаки на самом перекрёстке. Достаточно в удобном месте установить теодолит  $J$  и измерить  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  и расстояния от теодолита до этих точек  $S_1, S_2, S_3$ . По углу  $\beta_1$  и расстоянием  $S_1$  и  $S_2$  определяют углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , которые позволяют вычислить дирекционные углы сторон  $S_1$  и  $S_2$ , а также дважды получить координаты точки  $J$ . По углу  $\beta_3$  и сторонам  $S_3$  и  $S_4$  находят углы  $\gamma_3$  и  $\gamma_4$  с помощью которых дважды определяют дирекционный угол стороны  $CD$  и координаты точек  $C$  и  $D$ .

Длины сторон в подземном полигонометрическом ходе измеряют светодальномерами типа  $СП-2$  или подвесными мерными приборами. Для натяжении мерных рулеток или проволок используют динамометры или блочные штативы с гирями. Измерение производят по нитям отвесов, подвешенных в створе измеряемой линии, на которых с помощью нивелира фиксируют один и тот же горизонт. Если этого не делать, то необходимо вводить поправки за наклон мерного прибора, так же как необходимо вводить поправки за компарирование и температуру мерного прибора.

Длины сторон основной полигонометрии более 100м определяют путем проектирования на эти стороны более коротких сторон основной и рабочей полигонометрии. Таким же косвенным путем определяют и длины сторон главных ходов, проектируя на них стороны основной подземной полигонометрии.

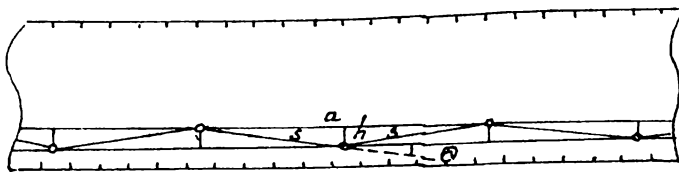


Рис.27. Подземная сеть микротрилатерации

При наличии параллельных тоннелей прокладываемые в них ходы подземной полигонометрии связывают между собой через поперечные соединительные выработки, образуя замкнутые полигоны.

В замкнутых полигонах допустимую угловую невязку подсчитывают по формуле

$$\text{дон } f_{\beta} = 6'' \sqrt{n} .$$

Относительную линейную невязку не допускают более 1:35 000.

При каждом появлении по трассе тоннеля новой скважины производят ориентирование способом двух шахт, уточняя значения дирекционных углов и координат пунктов подземной полигонометрии.

После сбойки встречных тоннелей уравнивание подземной полигонометрии целесообразнее выполнять следующим образом. Координаты точки, расположенной в районе произведенной сбойки, определяют по ходам основной полигонометрии от одного ствола и от другого.

Средние значения из полученных результатов принимают за исходные. За исходный дирекционный угол стороны подземной полигонометрии, примыкающей к одной точке, принимают дирекционный угол, полученный из последнего ориентирования подземной основы способом двух шахт. После этого уравнивают отдельные ходы между местом сбойки и обоим стволами. Такой приём позволяет получить окончательные координаты с минимальными отклонениями от значений рабочих координат. Это очень важно, так как разбивка осей и сооружений тоннелей осуществляется с использованием рабочих значений координат, а при укладке путей в тоннелях пользуются окончательными значениями координат.

При создании подземного геодезического обоснования особенно при неблагоприятных условиях для угловых измерений возможно применение линейной сети микротрилатерации в виде цепочки вытянутых треугольников с измеренными высотами (рис. 27)

В вытянутом равнобедренном треугольнике с измеренными сторонами  $S$  и

высотой  $h_a$ , в котором острые углы менее  $3^\circ$ , ошибка угла поворота  $\theta=180^\circ-A$ , может быть вычислена по формуле

$$m_\theta^2 = \left(\frac{2\rho m_{h_a}}{S}\right)^2 + \left(\frac{2\rho h_a m_s}{S^2}\right)^2, \quad (118)$$

где  $m_{h_a}$  и  $m_s$  - средние квадратические ошибки соответственно высоты  $m_{h_a}$  и стороны  $m_s$ .

Из анализа формулы (118) следует, что ошибка определения угла  $\theta$  в основном зависит от точности измерения высоты  $h_a$ , а измеренные стороны треугольника и вычисленные по этим сторонам и высоте угол  $\theta$  можно рассматривать как независимые измеренные величины.

На основе этого свободную линейную сеть микротрилатерации целесообразно представить в виде свободного (висячего) вытянутого полигонометрического хода, составленного из малых измеренных сторон и вычисленных углов поворота. Ошибка определения углов поворота таким образом составленного хода должна быть в пределах, установленных для подземной полигонометрии. Для основной полигонометрии величина этой ошибки принята равной  $m_\theta = 3$

При  $S=25\text{м}$  и  $h_a=1,3\text{м}$  чтобы иметь  $m_\theta=3$  необходимо стороны треугольника измерять с ошибкой не более  $m_s=2\text{мм}$ , а высоты - с ошибкой  $m_{h_a}=0,15\text{мм}$ .

Как видно из формулы (118) влияние ошибок измерения сторон на точность определения углов поворота тем меньше, чем меньше длина высоты и чем с меньшей ошибкой измеряются стороны. При  $h_a=0,5\text{м}$  получим  $m_\theta=2,7''$ . Заметно уменьшить величину заданной ошибки измерения сторон  $m_s=2\text{мм}$  при использовании светодальномера *СП-2* и, тем более, рулеток не представляется возможным.

Подземная высотная основа создаётся для перенесения проекта в натуру и обеспечения сбоек тоннелей и других подземных выработок в профиле.

От реперов подземной основы выполняют установку по высоте путейских реперов, предназначенных для укладки и рихтовки рельсового пути в тоннелях.

Подземная высотная основа создаётся по мере продвижения забоя проложением хода нивелирования III класса от исходного репера у ствола, отметка которого определена путём передачи отметки с поверхности. В качестве реперов обычно используют закреплённые полигонометрические знаки, расположенные через 25-50м. Поэтому схема нивелирного хода близка к схеме полигонометрического хода.

При сооружении тоннелей встречными забоями прокладываемый нивелирный ход также как и полигонометрический является висячим. Во избежании просчетов и обеспечения требуемой точности ходы прокладывают при двух горизонтах инструмента в прямом и обратном направлениях. Постоянное удлинение висячих нивелирных ходов по мере продвижения забоя требует как надёжного контроля

собственно нивелирования, так и наблюдений за устойчивостью реперов. Прежде чем передавать отметку от последнего репера хода на установленный у забоя, выполняют повторное нивелирование, по крайней мере, двух реперов проложенного хода. Если контрольные превышения между реперами отличаются от ранее определённого в пределах  $\pm 3$ мм, то реперы сохранили своё положение и могут служить исходными для дальнейшего проложения хода.

При появлении поперечных выработок, связывающих параллельные тоннели, прокладывают перемычки, образуя замкнутые полигоны. В замкнутых нивелирных ходах невязки допускают в пределах

$$\text{дон. } f_h = 2,5\sqrt{n} \text{ мм.}$$

Нивелирование по проложенному висячему ходу повторяют после каждой новой передачи отметки через ствол или скважину.

В нивелирных ходах, проложенных между реперами, отметки которых получены от реперов на поверхности, допустимую невязку подсчитывают по формуле

$$\text{дон. } f_h = \sqrt{\Delta h_n^2 L + \Delta h_{\text{ш}}^2 L_1 + \Delta h_c^2 \sqrt{2}}, \quad (119)$$

где  $\Delta h_n$ ,  $\Delta h_{\text{ш}}$  - случайные километровые ошибки нивелирования на поверхности и в подземных выработках;

$\Delta h_c$  - ошибка передачи отметки через один ствол;

$L$  и  $L_1$  - длины нивелирных ходов в км соответственно между реперами на поверхности и между точками передачи высот в смежных стволах.

Для того, чтобы окончательные отметки реперов, используемые для укладки и рихтовки рельсового пути, как можно меньше отличались от рабочих отметок, полученных по висячим ходам и по которым строился тоннель, уравнивание нивелирных ходов после сбойки следует производить, используя тот же приём, что и для подземной полигонометрии. В месте сбойки закрепляют репер, отметку которого принимают равной среднему из двух отметок, полученных по нивелирным ходам, проложенных до места сбойки в каждом из встречных тоннелей. Средняя отметка принимается за исходную для уравнивания каждого нивелирного хода.

## 10. Геодезические разбивочные работы при подземном строительстве

Строительство тоннелей и подземных сооружений сопровождается большим объёмом различного вида разбивочных геодезических работ и исполнительных съёмов, выполняемых от пунктов созданного планового и высотного геодезического обоснования. Основными из них являются разбивочные работы при проходке стволов вертикальных шахт и наклонных тоннелей, при выносе в

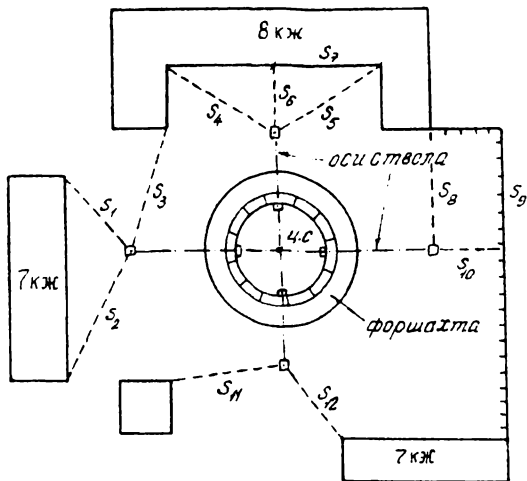


Рис.28. Разбивка и закрепление осей ствола

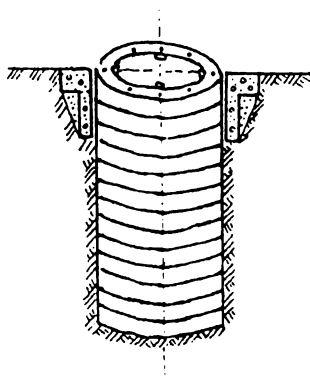


Рис.29. Сооружение ствола методом опускной крепи

натуру осей тоннеля при укладке сборной обделки тоннеля и рельсовых путей. К числу разбивочных работ относятся геодезические работы при щитовой проходке тоннелей, при возведении станций метрополитенов и других подземных сооружений.

Проходке ствола предшествует разбивка и закрепление его центра. Если координаты центра ствола (Ц.С.) заданы в проекте, то разбивку выполняют от пунктов подходной полигонометрии полярным способом, вычисляя разбивочные

элементы - расстояние и угол по координатам опорных пунктов и центра ствола. Положение центра или точек осей ствола может быть задана привязками, обычно двумя-тремя расстояниями, к точкам ситуации местности (рис. 28). В этом случае после разбивки по этим привязкам положение центра определяют от опорных пунктов. Фактические координаты центра ствола принимают в качестве исходных при аналитических расчётах для общей геометрической увязки элементов трассы тоннеля, подходов выработок и других сооружений. Затем производят разбивку осей ствола, каждую из которых закрепляют не менее чем двумя бетонными монолитами. В последующем закрепленные оси используют для периодического восстановления центра ствола

Проходку ствола начинают с сооружения форшахты, представляющей собой бетонный цилиндр высотой 4-6м с уширенной верхней частью (рис.29).

При сооружении форшахты сначала восстанавливают центр ствола, затем от него устанавливают опалубку для бетонирования форшахты. После того, как форшахта сооружена, на её верхней плоскости специальными скобками закрепляют оси ствола.

Верхняя часть обделки ствола сооружают методом опускной крепи. На дне форшахты собирают первое кольцо с ножевой частью. При этом следят за тем, чтобы размеры радиусов, измеренных от точки, закрепляющей центр ствола, не отклонялся от проектных размеров более чем на 10мм.

Перекося верхней плоскости сборных колец выявляют нивелированием 4-8 точек. Перекос не допускается более 5мм. После установки и проверки первых колец из-под ножа выбирают породу, и кольца под действием своей массы опускаются. По мере опускания собранной обделки ствола её наращивают сверху новыми кольцами. После того как собранная обделка из-за возникающего трения перестанет опускаться, сооружение ствола производят методом подводки колец снизу.

В процессе проходки ствола необходимо тщательно следить за креном ствола, положением его центра и формой. По крену опускной крепи определяют смещение центра нижнего кольца относительно центра по формуле

$$\delta = \frac{\Delta h}{d} H,$$

где  $\Delta h$  - вершина перекося верхней плоскости кольца в направлении наибольшего крена,  $d$  - диаметр колец ствола,  $H$ -глубина проходки.

Величину смещения центра нижнего кольца не допускают более 0,01H.

Крен определяется или нивелированием верхней плоскости опускной крепи, или по отклонениям отвесов, укрепленных на её внутренней поверхности. Для выравнивания крена применяют специальные клиновидные прокладки. Положение центра ствола контролируют от точек, закрепляющих на форшахте оси ствола.

После окончания сооружения ствола выполняют исполнительную съёмку его поперечных сечений через каждые 5м для определения положения центра и

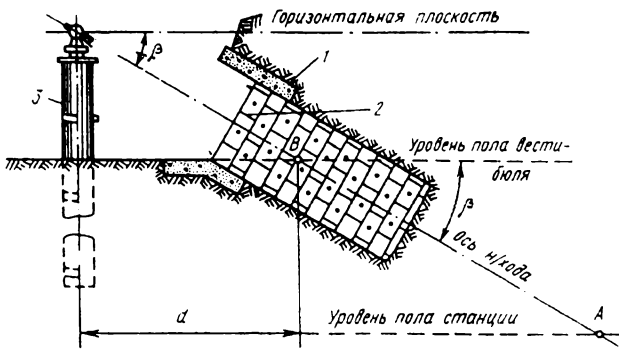


Рис.30. Сооружение наклонного тоннеля

эллиптичности колец. По результатам съёмки определяют положение и размеры вписанного цилиндра, определяющего фактический габарит ствола.

Сооружение наклонного тоннеля с тьюбинговой обделкой начинают с бетонирования оголовника 1, в котором монтируют первые кольца обделки 2 (рис.30). До начала сооружения тоннеля от пунктов геодезической основы разбивают и закрепляют грунтовыми знаками или метками на близлежащих зданиях ось тоннеля и нормаль к ней. Данные для разбивки получают по проектным координатам и отметкам точек перелома *A* и *B* оси тоннеля.

Для установки колец тьюбинговой обделки в проектное положение на оси наклонного тоннеля на расстоянии *d* от точки *B* закрепляют специальный столик 3 для теодолита. Высоту столика рассчитывают таким образом, чтобы визирная ось трубы теодолита, установленная под углом наклона тоннеля  $\beta$ , располагалась по оси тоннеля. Проектная отметка столика определяется по отметке верхней точки перелома *B* и заданным величинам  $\beta$  и *d* по формуле

$$H_{cm.} = H_B + d \operatorname{tg} \beta - i, \quad (120)$$

где *i* - высота горизонтальной оси вращения теодолита над столиком.

Проектные координаты центра столика рассчитывают по проектным координатам точки *A* и дирекционному углу оси наклонного тоннеля по формулам

$$y_{cm.} = y_A + d \sin \alpha_{AB}, \quad (121)$$

$$x_{cm.} = x_A + d \cos \alpha_{AB}.$$



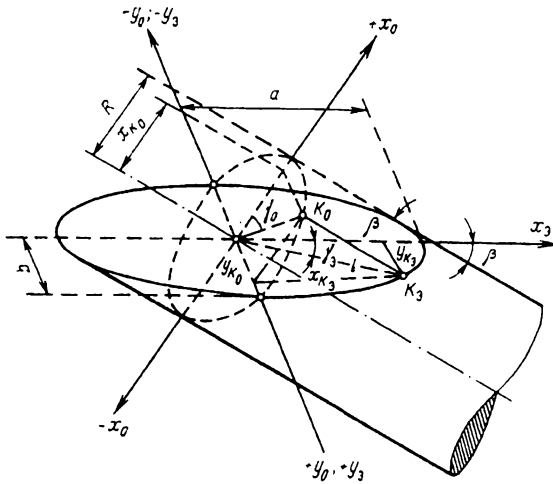


Рис.31. Расчет координат наклонного тоннеля

Ось наклонного тоннеля при разбивке оголовника и сборке обделки задают визирной осью теодолита, устанавливая её под заданным углом наклона по вертикальному кругу и ориентируя по закреплённому направлению *AB*. Для укладки каждого тубингового кольца ось тоннеля закрепляют в забое временным знаком, от центра которого измеряют расстояния до центров болтовых отверстий передней плоскости укладываемых тубингов. Для первых уложенных колец отклонение фактических радиусов от проектных значения должны быть в пределах  $\pm 5$ мм.

Если наклонные тоннели проходят в водонасыщенных грунтах и пльвунах, то такие грунты предварительно замораживают. Для этой цели по окружности будущего наклонного тоннеля бурят равномерно расположенные скважины, в которых монтируют трубы для циркуляции в них замораживающей жидкости.

Наклонный тоннель в поперечном сечении обычно имеет вид окружности, поэтому сечение его горизонтальной плоскостью будет эллипсом, центр которого совпадает с центром тоннеля. Следовательно, наклонные скважины для замораживания должны быть разбиты на поверхности земли по эллипсу (рис. 31).

Разбивку выполняют от центра эллипса способом прямоугольных или полярных координат.

Большая полуось эллипса

$$a = R / \sin \beta , \quad (122)$$

малая ось  $b$  равна радиусу  $R$  окружности скважин. Принимая за начало координат центр эллипса, а за ось  $x$  - направление большой оси эллипса, координаты точки  $K_0$  расположенной на окружности, определяются по формулам

$$x_{K_0} = R \cos \gamma_0 ; \quad y_{K_0} = R \sin \gamma_0 , \quad (123)$$

где  $\gamma_0$  - угол между направлением на точку  $K_0$  и осью  $x$ , отсчитываемый по ходу часовой стрелки.

При равномерном расположении наклонных скважин по окружности

$$\gamma_0 = \frac{360^\circ}{n(k-1)} , \quad (124)$$

где  $n$  - число скважин,  $k$  - номер скважины, считая первой скважину, расположенную на оси  $x$ .

Координаты той же точки  $K$ , расположенной на эллипсе, равны

$$\begin{aligned} x_{K_3} &= \frac{x_{K_0}}{\sin \beta} = \frac{R \cos \gamma_0}{\sin \beta} ; \\ y_{K_3} &= y_{K_0} = R \sin \gamma_0 . \end{aligned} \quad (125)$$

Учитывая, что  $a = R/\sin \beta$  и  $b = R$ , получим

$$\begin{aligned} x_{K_3} &= a \cos \gamma_0 ; \\ y_{K_3} &= b \sin \gamma_0 . \end{aligned} \quad (126)$$

Углы  $\gamma_3$  на плоскости эллипса определяют по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_3 = \frac{x_{K_3}}{y_{K_3}} = \frac{a}{b} \operatorname{tg} \gamma_0 . \quad (127)$$

Так как  $b/a = \sin \beta$ , то

$$\operatorname{tg} \gamma_3 = \operatorname{tg} \gamma_0 \sin \beta . \quad (128)$$

Расстояние в плоскости эллипса между центром эллипса и скважиной вычисляют по формуле

$$d = \frac{y_{K_2}}{\sin \gamma_2} = \frac{x_{K_2}}{\cos \gamma_2}. \quad (129)$$

При  $\beta=30^\circ$  получим  $v=R$ ,  $a=2R$ .

Полярными координатами являются полярный угол  $\gamma_{K_2}$ , вычисляемый по формуле (127) и радиус-вектор скважин

$$l_k = \frac{y_{K_2}}{\sin \gamma_2} = \frac{x_{K_2}}{\cos \gamma_2}. \quad (130)$$

Для придания буровому снаряду проектного наклонного направления в процессе бурения устанавливают при помощи теодолита отрезки направляющих труб-кондукторы. Чтобы визирная ось трубы совпала с направлением оси скважины, теодолит должен быть установлен от разбитого центра скважины на расстоянии

$$S = h \operatorname{ctg} \beta,$$

где  $h$  - превышение оси трубы над проектной плоскостью эллипса, а отсчет по его вертикальному кругу должен соответствовать углу наклона  $\beta$ .

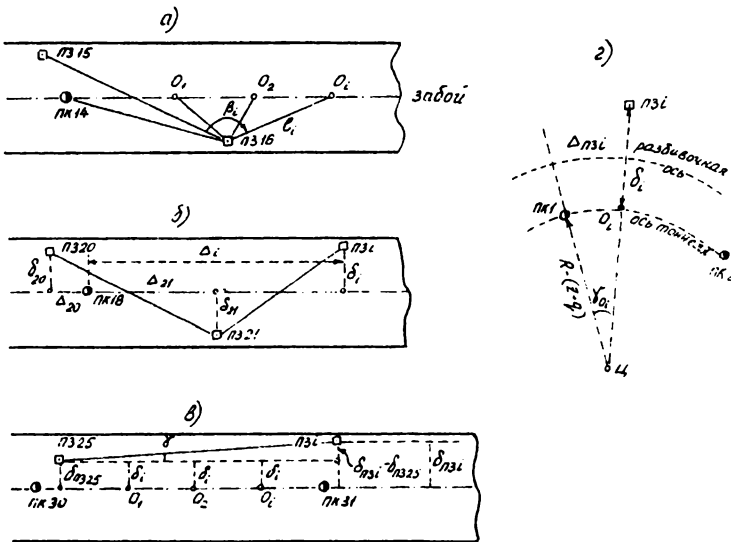


Рис.32. Способы разбивки осей туннеля

Отклонение пробуренных наклонных скважин от проектного положения проверяют теодолитом, измеряя горизонтальные и вертикальные углы на лампочку, опускаемую в скважину по размеченному тросу. Координаты точки стояния теодолита определяют от опорных пунктов. По расстоянию от теодолита до лампочки по наклонному направлению, дирекционному углу этого направления и измеренному углу наклона определяют положение скважин в наблюдаемой точке в плане и по высоте.

Разбивку осей подземных выработок и тоннелей выполняют по их характерным точкам, к которым относятся точки *ПК, НКК, ККК, НПК, КПК* и дополняющие их створные осевые точки  $O_1, O_2, \dots, O_i$  (рис. 32).

Разбивку выполняют следующими способами:

- а) полярным способом, отложением угла  $\beta_i$  - и расстояния  $l_i$  (рис. 32а);
- б) способом перпендикуляров, отложением смещений  $\delta_i$  проектной оси от полигонометрических знаков (рис. 32б);
- в) построением на полигонометрическом знаке линии, параллельной оси и отложением перпендикуляров  $\delta_i$  (рис. 32в).

Необходимые для разбивки углы и расстояния вычисляют по координатам полигонометрических знаков и проектным координатам характерных точек из решения обратных геодезических задач.

Величины перпендикуляров  $\delta_i$  и расстояний  $l_i$  от ближайшего пикета до основания перпендикуляра на оси могут быть также вычислены по формулам

$$\begin{aligned} \delta_i &= y_i \cos \alpha_{TP} - x_i \sin \alpha_{TP}; \\ l_i &= y_i \sin \alpha_{TP} + x_i \cos \alpha_{TP}. \end{aligned} \quad (131)$$

где  $\Delta y_i = y_{O_i} - y_{ПК1}$ ,  $\Delta x_i = x_{O_i} - x_{ПК1}$ ,  $\alpha_{TP}$  - дирекционный угол трассы.

Расстояния  $l_i$  используют для вычисления пикетажных значений осевой точки. Построение на полигонометрическом знаке линии, параллельной оси, может быть выполнено отложением или вычисленного угла  $\gamma$ , или разности вычисленных перпендикуляров ( $\delta_{ПЗ_i} - \delta_{ПЗ_{i-1}}$ ).

Если координаты створных осевых точек не заданы в проекте, их вычисляют от ближайших пикетов, координаты которых всегда заданы, по дирекционному углу оси трассы и устанавливаемым расстояниям от пикетов до осевых точек. Во всех случаях разбивки осей должно быть вынесено одновременно не менее трёх точек, створность которых явится подтверждением правильности разбивки. При разбивке осевых точек  $O_i$  в пределах круговой кривой (рис. 32г) для получения разбивочного элемента  $\delta_i$  по направлению радиуса по проектным координатам центра круговой кривой и координатам полигонометрического знака вычисляют расстояние -  $D_{и-ПЗ_i}$ , тогда

$$\delta_i = D_{и-ПЗ_i} - [R - (z + q)]. \quad (132)$$



При правильной укладке колец на прямолинейном участке  $q_{z,op}=0$ . На участках кривых имеет место проектное опережение колец в плане, что следует учитывать в расчетах. На круговых кривых проектное опережение равно

$$q_{np.} = \frac{Dl}{R}, \quad (135)$$

где  $D$  - диаметр кольца,  $R$  - радиус круговой кривой,  $l$  - длина тоннеля на проверяемом участке. На участке переходных кривых

$$q_{np.} = \frac{DS^2}{2C}. \quad (136)$$

где  $S$  - длина переходной кривой от начала до конца последнего кольца;  $C$  - параметр переходной кривой.

Опережение в вертикальной плоскости определяют при помощи отвеса. На горизонтальных участках профиля тоннеля  $q_{верт.}=0$ . Проектное вертикальное опережение на наклонных участках зависит от величины проектного уклона  $i$  оси тоннеля,

$$q_{верт.} = Di. \quad (137)$$

В процессе сборки обделки не реже чем через 5 колец проверяют правильность их положения в плане и профиле, а также эллиптичность

Положение колец в плане определяют от оси тоннеля или от смещенной параллельной оси способом бокового нивелирования. Определение положений колец в профиле производят нивелированием лотка и сравнением полученной отметки с проектной.

Эллиптичность - отклонение фактических диаметров колец от проектных проверяют измерением размеров горизонтального и вертикального диаметров, а также двух диаметров, наклоненных к горизонту под углом  $45^\circ$ . Уклонение диаметров от проектного положения после сборки кольца не должно быть более  $\pm 25$  мм.

Для укладки железнодорожных путей в тоннелях закрепляют *путейские реперы*, представляющее собой болт со сферической головкой, который ввинчивается в стакан-обойму, бетонируемый на обделке. На головке имеется отверстие диаметром до 2 мм, являющегося центром путейского репера, относительно которого путь укладывают в плане. На прямых участках трассы путейские реперы устанавливают через 20 м с правой стороны по ходу движения

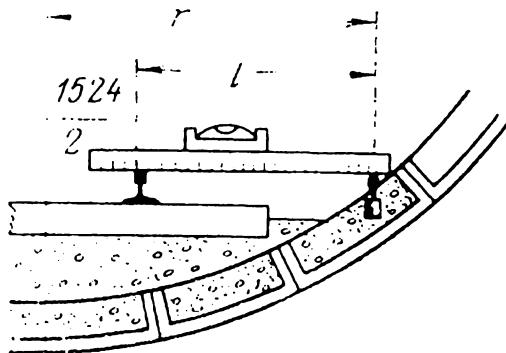


Рис.34. Схема установки путевых реперов

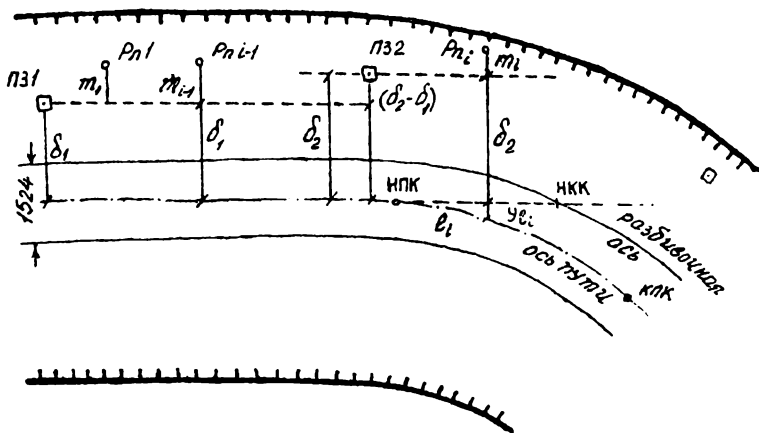


Рис.35. Путевые реперы на участке прямой и переходной кривой

поезда, на кривых - через 5м с внешней стороны кривой, т.е. со стороны возвышенного рельса. Их устанавливают также на всех характерных точках плана и профиля трассы.

Места закладки реперов разбивают от полигонометрических знаков путем последовательного отложения расстояний, определяемых по пикетажу в проектных чертежах.

По высоте путевые реперы устанавливают таким образом, чтобы верх сферической головки болта имел отметку, соответствующую проектной отметке

головки ближайшего рельса. Это достигается при помощи нивелира путем вывинчивания или ввинчивания болтов.

После разбивки и бетонирования реперов снова определяют их пикетажные значения в соответствии с фактическим положением и вычисляют новые проектные отметки.

Для укладки рельсов в плане необходимо знать расстояния  $r$  от репера до оси пути и расстояния  $l$  от репера до внутренней грани ближнего к репера рельсу (рис.34). Укладку рельсов производят от путевых реперов, используя специальную рейку с накладным уровнем. Иглу рейки, закрепленную на нулевом делении, вставляют в отверстие - центр репера. Второй конец рейки кладут на головку устанавливаемого рельса и, передвигая его в плане и по высоте, добиваются, чтобы пузырек уровня был в нуль-пункте, а отчет по рейки  $l$ .

Расстояние от путевых реперов до оси определяют, пользуясь пунктами окончательно уравниваемого полигонометрического хода.

На прямых участках трассы это расстояние определяют от линии, параллельной оси пути и заданной от полигонометрического знака отложением величины  $(\delta_2 - \delta_1)$ , полученной по вычисленным смещениям смежных полигонометрических пунктов ПЗ1 и ПЗ2 (рис.35). Визирной осью теодолита фиксируют направление линии, параллельной оси пути, и при помощи рейки с накладным уровнем определяют величину отрезки,  $m_{i-1}$ . Тогда расстояние от репера до оси пути равно

$$r_i = \delta_i + m_{i-1} . \quad (138)$$

Для определения расстояния от репера до внутренней грани рельса учитывают расстояние между внутренними гранями рельса, равное  $a = 1524\text{мм}$ ,

$$l_i = \delta_1 + m_{i-1} + \frac{a}{2} . \quad (139)$$

На участках переходных кривых (см. рис.35) расстояние от репера до оси пути определяют от линии, параллельной линии тангенса, и вычисляют по формуле

$$r_i = \delta_2 + m_i + y_{l_i} , \quad (140)$$

где

$$y_{l_i} = \frac{l_i^2}{6R} \left( 1 - \frac{l_i^2}{56R^2} \right) .$$





Отклонение от проектного положения рельсов в плане и профиле не должно превышать 3мм.

## 11. Геодезические работы при щитовой проходке тоннелей

До начала проходки щит (см. рис. 6) монтируют в исходное проектное положение в специальной щитовой камере на направляющих рельсах или бетонном основании. С этой целью разбивают проектную продольную ось щита, закрепляя её в своде камеры не менее чем тремя знаками. На этой оси щит устанавливают в исходное положение по заданному пикетажу опорного кольца и отметке направляющих рельс или бетонного основания.

По окончании монтажа щита производится продольная и радиальная

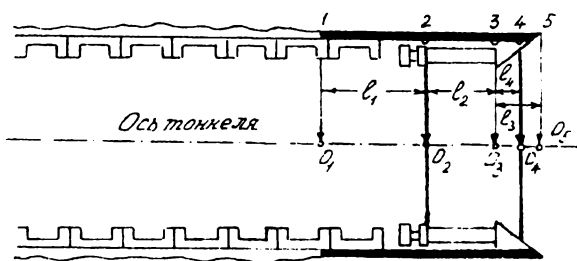


Рис.37. Схема размещения геодезических знаков на щите

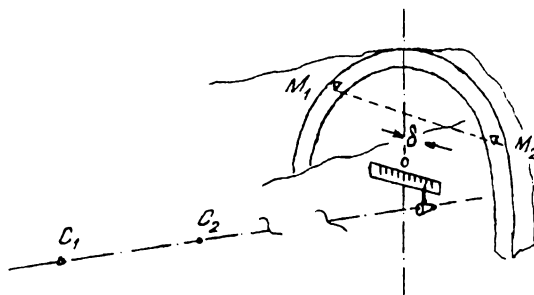


Рис.38. Схема определения положения щита в плане



Схема определения положения щита в плане может быть представлена в следующем виде (рис. 38). На щите закрепляют горизонтальную шкалу так, чтобы её нуль-пункт лежал в вертикальной плоскости, проходящей через центр щита.

Вдоль шкалы передвигается движок со зрительной трубой и индексом. Передвигая движок по шкале добиваются установки линии визирования трубы в створ марок  $C_1$  и  $C_2$  на оси тоннеля. Тогда отсчет по индексу даёт отклонение  $\delta$  центра щита от оси тоннеля.

Рассмотренная схема является принципиальной и лежит в основе схем и способов, в которых используется другое измерительное оборудование.

Во время движения щита из-за разнородной плотности пород и неравномерного давления щитовых домкратов происходит его вращательное движение вокруг своей продольной оси, называемое кручением или креном щита. В результате нуль шкалы, по которой определяют плановое положение щита, оказывается смещённой. Поэтому в отсчет по шкале необходимо ввести поправку, равную (рис. 39)

$$m = (r - l) \beta, \quad (143)$$

где  $r$  - радиус щита,  $l$  - расстояние от оболочки щита до шкалы.

Величина  $(r - l)$  постоянная для данного щита и её определяют при установке шкалы. Угол поворота  $\beta$  щита можно определить по отклонению подвешенного отвеса. Определяя по пластине с делениями отклонение отвеса от первоначального положения  $\sigma$  и зная длину его нити  $d$ , находят

$$m = (r - l) \sigma / d. \quad (144)$$

Зная величину  $(r - l) d$ , являющуюся постоянной, можно рассчитать цену деления на пластине, чтобы отсчитывать непосредственно величину поправки  $m$ .

Поправку за кручения щита можно определить по результатам нивелирования марок  $M_1$  и  $M_2$ , закрепленных на торце опорного кольца щита на уровне горизонтального диаметра (см. рис.39) или хорды (см. рис.38). Определив получившееся из-за кручения щита превышение между марками, поправку вычисляют по формуле

$$m = (r - l) \frac{2h_m}{S}, \quad (145)$$

где  $S$  - расстояние между марками.

Величину кручения щита можно определить методом гидростатического нивелирования или специальными уровнями, снабженными тангенциальным винтом.

Наибольшее распространение в практике тоннелестроения получил метод автоматического введения поправки за крен. Схема одного из способов автоматического введения поправки при определении положения щита в плане состоит в следующем (рис.40).

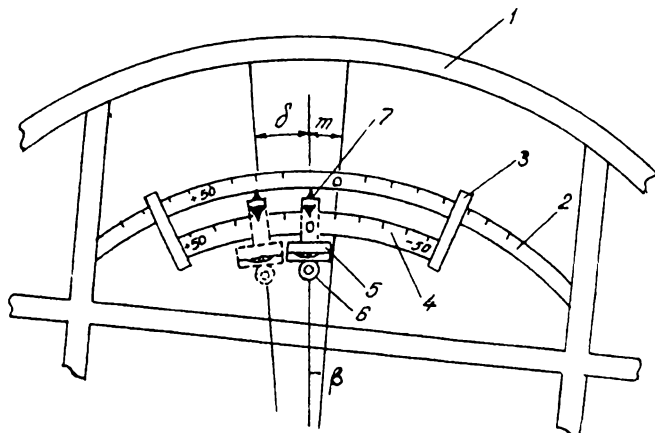


Рис.40 Схема автоматического учета поправки за кручение

В верхней ячейки щита около опорного кольца 1 прикрепляют дугу с основной шкалой 2. По этой дуге на ползунках передвигается шкала отклонений 4, по которой, в свою очередь, перемещается блок, состоящий из уровня 5, оптической трубы 6 и индекса 7 для отсчитывания по шкалам. При положении пузырька уровня в середине вертикальная линия, проходящая через его середину, будет лежать на одной вертикальной линии с центром щита при наличии любого угла крена  $\beta$ . При этом отсчет по основной шкале при положении пузырька уровня в середине соответствует поправки за кручение  $m$ . После перемещения оптической трубы вправо или влево до совмещения изображения марок, закрепляющих ось тоннеля, отсчет по шкале отклонений 4 укажет уклонение  $\delta$  центра щита в плоскости данной дуги. Для более точного учета поправки за кручение её величину определяют по формулам (144) и (145) и нулевой штрих шкалы отклонений устанавливают на отсчет основной шкалы, соответствующий этой величине.

При сооружении тоннеля на кривой положение щита определяют от хорд или секущих. Точки, определяющие направление хорд, также как и направление проектной оси тоннеля на прямых участках трассы, закрепляют подвешенными в своде тоннеля отвесами или светящимися марками. Для закрепления проектной оси тоннеля (хорды) могут быть использованы лазерные указатели направления.

Известно много специальных лазерных приборов и систем для ведения щита, обеспечивающих оперативность и непрерывность геодезического контроля положения щита в плане и высоте. Их основными частями являются передающее и приемное устройства. Передающее устройство содержит собственно лазер, создающий в пространстве видимую опорную линию, и приспособление, предназначенное для ориентирования луча лазера в заданное направление.

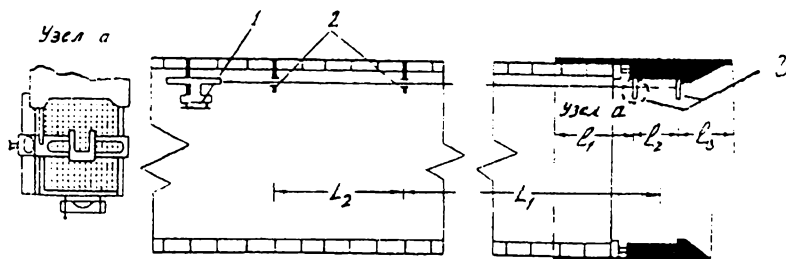


Рис.41. Ведение щита по лучу лазера

Приёмное устройство определяет положение щита относительно опорной линии визуально по координатному отсчетному приспособлению или автоматически при помощи фото-электрических приёмников. В большинстве случаев для формирования опорной линии используют приборы типа лазерного теодолита.

При визуальной регистрации (рис. 41) на опорном кольце щита закрепляют два отсчетных приспособления 3, имеющих вид экрана с координатной сеткой. Экран, расположенный ближе к хвосту щита, делают прозрачным, а расположенный ближе к ножу, - непрозрачным. Отклонение щита от проектного положения в плоскости экранов фиксируют, перемещая по экрану линейку и бегунок на ней в створ опорной линии (луча лазера) и беря отсчеты по координатной сетки. Осевые точки, на которых устанавливают лазерный прибор 1 и ориентирующие марки 2, выносят в проектное положение от пунктов подземной полигонометрии. Положение ножа и хвоста щита получают по формулам (142)

Для определения положения щита по высоте на нем закрепляют и периодически нивелируют марку. Продольный уклон щита определяют, как и его кручение при помощи отвеса или уровнем с тангенциальным винтом, а также нивелированием осевых марок в ножевой и кольцевой частях щита.

Уклонение щита от проектного направления в плане и по высоте не допускается более  $\pm 50$ мм.

По положению щита решается вопрос о том, какие домкраты нужно включать при следующем его передвижении.

При сооружении станций метрополитенов с тьюбинговой обделкой строят три тоннеля диаметром 9,50м, два из которых предназначаются для правого и левого пути, а третий для средней части станции. Проходку тоннелей производят щитовым способом. Методы определения положения колец в плане и профиле, их эллиптичности являются такими же, как и при строительстве перегонных тоннелей между станциями.

Все три тоннеля связаны между собой поперечными проёмами, для устройства которых демонтируют боковые тьюбинги. Для совпадения габаритов проёмов в

смежных тоннелях появляется необходимость более точной установки колец в продольном направлении (по пикетажу), а также наблюдения за их кручением. Первые кольца в станционных тоннелях устанавливаются с ошибкой в продольном направлении не более 10мм, а кручение колец должно быть не более 15мм. Более высокие требования к укладке колец вызывают необходимость передвижения станционных щитов по специальным рельсам на бетонной подушке. Укладку рельсов в проектное положение в плане и профиле производят от пунктов геодезической основы.

## **12. Наблюдение за деформациями при строительстве и эксплуатации подземных сооружений**

Выработка грунтов при подземном строительстве вызывает осадки поверхности земли вместе с расположенными на ней сооружениями, а возникающее при этом горное давление приводит к деформациям обделки подземных сооружений.

Осадки могут распространяться от строящегося подземного сооружения на расстояние, приблизительно равное полуторной глубине его заложения. Величины осадок зависят от глубины заложения, геологических условий, размеров горных выработок, своевременности заложения пустот за обделкой сооружения и других факторов.

Горное давление, действующее в различных направлениях вызывает осадку свода, сближение стен, выпучивание лотков и обратных сводов, эллиптичность тоннельной обделки круглого очертания и пр. В неустойчивых породах горное давление образует трещины, а иногда приводит к разрушению самой конструкции подземного сооружения.

Указанные обстоятельства вызывают необходимость проведения наблюдений за деформациями и осадками на всех этапах строительства и эксплуатации подземных сооружений.

Для выявления величин деформаций проводят систематические наблюдения за положением сооружений и плано-высотных геодезических знаков, расположенных в зоне возможных деформаций на поверхности и под землей.

Наблюдения состоят в периодическом нивелировании и определении планового положения закрепленных на сооружениях деформационных марок и знаков, закрепляющих пункты плано-высотной геодезической основы.

На зданиях и сооружениях деформационные марки, обычно имеющих вид железнодорожных костылей, закладывают в цокольной части или стенах вблизи их основных углов, а на больших зданиях на расстоянии 20-25м один от другого. Наблюдения за осадками на поверхности состоят в периодическом определении высот деформационных марок и реперов высотной основы, включая их в систему ходов нивелирования III класса с узловыми точками и замкнутыми полигонами. Расстояния между узловыми точками не должны превышать 400м. В нивелирную сеть включают реперы государственного нивелирования, расположенные вне зоны осадок, вызываемых подземным строительством. Один из них, желательно

расположенный в средней части исследуемой поверхности, принимают за исходный. Периодические наблюдения за взаимным положением нескольких таких реперов позволяют оценить степень устойчивости каждого из них и наиболее устойчивый выбрать в качестве исходного.

Невязки в замкнутых ходах не должны превышать  $2,5\text{мм}\sqrt{n}$ , где  $n$  - число станций. Принято считать, что при нивелировании III класса расхождения в отметках деформационных марок и реперов, получаемых в различных циклах нивелирования, более 5 мм свидетельствует о наличии осадок.

Периодичность повторных циклов нивелирования определяется степенью интенсивности осадок, но не реже одного раза в 1,5 месяца. Наблюдения продолжаются до полного затухания осадок. По результатам наблюдений составляют ведомости осадок и графики, характеризующие зоны распространения осадок и их величины.

При необходимости определения плановых деформаций земной поверхности выполняют повторные измерения в созданных для целей строительства плановых геодезических сетях.

В случае появления на зданиях и сооружениях трещин в программу наблюдений за деформациями включают измерения по специально установленным на трещинах маякам.

Наблюдения за деформациями подземных сооружений включают повторные измерения в проложенных подземных полигонометрических и нивелирных ходах, а также повторные съемки готовых сооружений и их частей.

Способы съемок тоннелей аналогичны применяемым для исполнительных съемок готовой обделки с использованием вынесенной в натуру от пунктов подземной геодезической основы проектной или смещенной оси тоннеля.

В состав работ по наблюдению за деформацией обделки тоннелей круглого сечения входят:

- измерение горизонтального и двух косых диаметров с ошибкой, не превышающей 10мм ;
- нивелирование свода и лотка;
- измерение расстояний (домеров) от створной линии полигонометрии до ближайшей внутренней грани по горизонтальному диаметру.

Нивелирование и створные измерения производят на каждого пятом кольце с ошибкой, не превышающей 5мм.

В тоннелях с обделкой прямоугольного сечения измеряют расстояния между вертикальными стенками на разных уровнях от лотка, для чего в стены закладывают специальные знаки.

Линейные измерения, связанные с наблюдениями за деформацией обделки тоннелей и подземных сооружений, выполняют рулетками или шаблонами. Особенно удобны для применения лазерные рулетки. Лазерная рулетка – безотражательный портативный светодальномер, позволяющий измерять расстояния в пределах нескольких десятков метров с точностью 3-5мм до совершенно неподготовленных поверхностей без каких-либо отражателей или



отражающих покрытий. Измерения проводятся с применением лазеров видимого диапазона, которые одновременно используются и для целеуказания.

Комплексный анализ динамики измерения углов в полигонометрических ходах, отметок полигонометрических знаков, свода и лотка, домеров, эллиптичности колец позволяют сделать вывод о происходящих деформациях и при необходимости принять меры по предотвращению опасных последствий.

### Список литературы

1. Черемисин М.С. Геодезические сети при крупном подземном строительстве. М., Изд. геод. литература, 1960, 223с.
2. Черемисин М.С., Воробьев А.В. Геодезическо-маркшейдерская разбивочная основа при строительстве подземных сооружений. М., Недра, 1982, 262с.
3. Афанасьев В.Г., Егоров А.П. Геодезия и маркшейдерское дело в транспортном строительстве. М., Недра, 1978, 407с.
4. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений. Под. ред. Г.П. Левчука. Учебник для вузов. М., Недра, 1983, 400с
5. Большаков В.Д. Левчук Г.П. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам. М. Недра, 1980, 781с. и др.
6. Ключин Е.Б. Практикум по прикладной геодезии  
Михелев Д.Ш. Геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Учеб. пособие для вузов.  
Барков Д.П. М., Недра, 1993, 358с. ил.  
и др.
7. СНиП 10-01-94. Система, нормативных документов в строительстве.
8. Инструкция по производству геодезическо-маркшейдерских работ при строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей. М, 1998 г.