

О ТЕОДОЛИТАХ И ТАХЕОМЕТРАХ

С незапамятных времен одной из насущных потребностей человека является измерение углов между направлениями на точки местности. Потребность эта в первую очередь была вызвана необходимостью строительства различных сооружений, начиная с простого жилища, заканчивая крепостями и сложными инженерными конструкциями в виде мостов и виадуков, а также необходимостью картографирования местности. Для измерения углов на местности человек долгое время использовал различные построения вроде всем нам известного египетского треугольника и простейшие технические приспособления и приборы. В XVI веке появился первый угломерный прибор, пантометр, являвшийся прародителем современных теодолитов и тахеометров. Он являл из себя астролябию, с помощью которой можно было измерять не только вертикальные, но и горизонтальные углы.

Первый теодолит был создан в 1725 году английским ученым Джонатаном Сиссоном, а в 1785 английский же ученый Джесси Рамсен внес в его конструкцию изменения, значительно повышающие точность измерений.

С тех пор конструкция теодолитов претерпела множество изменений: металлические лимбы с верньерами и простейшими микроскопами уступили место лимбам стеклянным и сложным оптическим отсчетным микроскопам. Им на смену пришли цифровые лимбы с электронными считывающими устройствами. Но не смотря на эти разительные перемены в конструкции, основная идея теодолита за три столетия не претерпела абсолютно никаких изменений. Теодолит как был, так и остался измерительным прибором для определения горизонтальных и вертикальных углов между направлениями на точки местности. Дополнение угломерного механизма дальномерным привело сначала к появлению оптических номограммных тахеометров, а затем и к созданию электронных тахеометров, позволяющих получать конечный результат измерений в виде координат точек местности. Поэтому всегда необходимо помнить, что угломерная часть тахеометра является все тем же теодолитом и ни чем иным. И на него должны распространяться абсолютно те же требования, что предъявляются к обычным теодолитам. И этот факт необходимо особо отметить для понимания изложенного ниже материала.

Требования, предъявляемые к теодолитам в первую очередь касаются точности измерений и обусловлены обширнейшей областью применения теодолитов. Оптические и электронные теодолиты и тахеометры применяются при построении опорных геодезических сетей, картографировании местности, трассировании дорог и других коммуникаций, в капитальном строительстве. Они широко применяются для контроля положения в пространстве сложных инженерных сооружений и для проведения землеустроительных и кадастровых работ, в гидро-метеорологии и в деле охраны окружающей среды, в промышленности и в военном деле... И каждый из видов работ устанавливает непреложные требования к точности измерений в каждом конкретном случае. Неукоснительное выполнение этих требований позволяет повысить безопасность во всех перечисленных выше областях человеческой деятельности. Ведь если, к примеру, при контроле за инженерными сооружениями или в капитальном строительстве не выдержать требуемую точность измерений, то в дальнейшем это может привести к различного рода авариям и даже крупномасштабным катастрофам, влекущим за собой пагубные последствия для окружающей среды или даже человеческие жертвы.

В свете сказанного вызывает огромное недоумение существование более чем двух десятков методик поверки теодолитов и такое же, если не большее количество методик поверки тахеометров. Но еще большее недоумение вызывает тот факт, что подавляющее большинство этих методик не охватывают собой всего спектра требований, которые должны предъявляться к теодолитам, и ограничиваются определением значений средней квадратической погрешности измерения горизонтального и вертикального углов одним приемом и коэффициентом нитяного дальномера. Единственная методика, которая охватывает все требования и подробнейшим образом описывает процессы определения метрологических характеристик для всех без исключения марок отечественных теодолитов и их зарубежных аналогов, МИ БГЕИ 08-90, была разработана Главным управлением геодезии и картографии при Совете министров СССР, но была отменена в 2000 году и заменена уступающей ей во многом методикой МИ 08-00. Но даже эта методика рассматривает процесс поверки теодолитов намного более подробно и полно, чем это делают методики, разработанные не только российскими метрологическими институтами и испытательными центрами, но даже и производителями теодолитов.

Для примера рассмотрим содержание нескольких методик периодической поверки теодолитов в части определения метрологических характеристик и сравним их с отмененной по абсолютно непонятным причинам методикой МИ БГЕИ 08-90. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Требование по МИ БГЕИ 08-90	Наличие в методике			
	МИ 08-00	VEGA TEO 5/10/20 Ростест-Москва	МП АПМ 15-17	МП ВНИИМ 56-DGT2, 56-DGT10
1. Определение коэффициента нитяного дальномера	Да	Да	Методика для тахеометра. Параметр не определяется.	Нет
2. Определение коллимационной погрешности	Да (методика измерений не описана)	Нет	Нет	Нет
3. Определение места нуля (зенита)	Да (методика измерений не описана)	Нет	Нет	Нет
4. Определение смещения визирной оси при перефокусировке трубы	Да (методика измерений некорректна)	Нет	Нет	Нет
5. Определение диапазона работы компенсатора	Да	Да	Нет	Нет
6. Определение погрешности компенсатора	Да	Да	Нет	Нет
7. Определение СКП измерения горизонтального угла одним приемом	Да	Да	Да (некорректное описание методов измерений и вычислений)	Да (некорректное описание методов измерений и вычислений)
8. Определение СКП измерения вертикального угла одним приемом	Да	Да	Да (то же)	Да (то же)
9. Проверка перпендикулярности оси вращения зрительной трубы к вертикальной оси теодолита	Да	Нет	Нет	Нет
10. Определение погрешности центрира	Да	Да	Нет	Да

Как видно из таблицы 1 ни одна из приведенных методик, разработанных различными институтами и испытательными центрами, не охватывает весь спектр требований, которые должны предъявляться к теодолитам и тахеометрам в части угловых измерений. То же можно сказать и об остальных двадцати двух методиках поверки теодолитов и таком же количестве методик поверки тахеометров.

В связи с этим возникает справедливый вопрос. Чем обусловлена необходимость «разработки» огромного количества методик поверки на однотипные по сути средства измерений, если за триста лет их существования уже давно и в полной мере известны и проработаны теоретически и практически все основные требования, предъявляемые к этим средствам измерений? Ведь все изменения, происходившие

с теодолитами за три столетия в основном касались усовершенствования отсчетной системы и абсолютно не затрагивали саму идею, на которой базируется конструкция этих приборов и методология измерений ими. И все это только пол-беда. А беда в том, что все эти методики, похоже, создавались по принципу «написал и забыл» - лишь бы прибыль была! Почему так происходит? Что стало толчком для столь вопиющего безобразия? Это тема для отдельного исследования, но причина этому, на мой взгляд, кроется в самом фундаменте метрологической науки у нас в стране. И прежде чем перейти к подробному рассмотрению затронутой темы, хотелось бы задать вопрос разработчикам методик, тем, кто занимается испытаниями теодолитов с целью утверждения их типа и вообще всем, от кого зависит качество этой важной работы. Господа! А вам не страшно? Вам не страшно жить в домах, возведение которых контролировалось инструментами, поверенными по вашим методикам? Вам не страшно ездить по дорогам, трассирование которых проводилось инструментами, поверенными по вашим методикам? Вам не страшно пользоваться мостами, у которых неизменность конструкции и положения в пространстве контролируется этими инструментами?..

А мне вот страшно! И поэтому необходимо раз и навсегда выработать единый подход к поверке теодолитов любых типов, моделей и торговых марок, включающий в себя единую методологию определения метрологических характеристик и единые требования, предъявляемые к ним.

Рассмотрим подробно, что из себя представляют теодолиты, каковы источники погрешности измерений теодолитами и какие к ним должны применяться требования? Ведь от понимания этого во многом зависит качество и безопасность нашей жизни.

Для начала ознакомимся с принципиальной схемой теодолитов и главными условиями, которые должны быть соблюдены в конструкции любого теодолита любой модели и торговой марки.

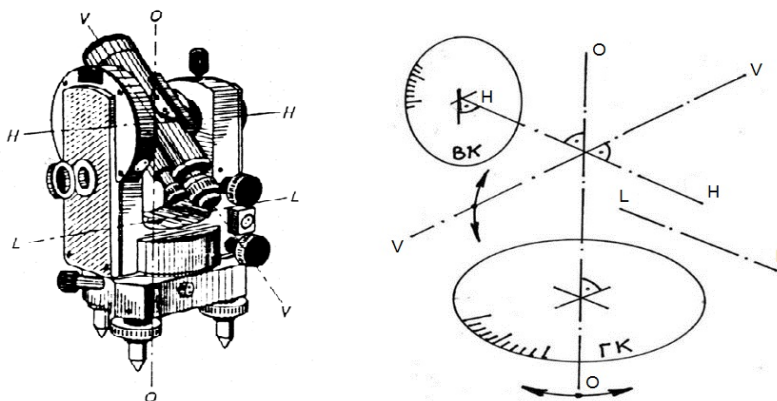


Рисунок 1 Общий вид и принципиальная схема теодолита

На рисунке 1 представлены общий вид теодолита и его принципиальная схема.

О-О — ось вращения теодолита;

Н-Н — ось вращения трубы теодолита;

V-V – визирная ось теодолита;

L-L — ось установочного цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга;

ГК — горизонтальный круг (лимб) теодолита;

ВК — вертикальный круг (лимб) теодолита.

Главным требованием, которое предъявляется к теодолитом является взаимная перпендикулярность основных осей и плоскостей теодолита.

Так ось вращения теодолита «О-О» должна быть ортогональна уровенной поверхности (плоскости горизонта), в которой лежит ось установочного уровня «L-L». Ось вращения трубы «Н-Н» должна быть перпендикулярна оси вращения теодолита. Визирная ось теодолита «V-V» должна быть перпендикулярна оси вращения трубы. Плоскость, в которой лежит горизонтальный круг должна быть перпендикулярна оси вращения теодолита, а геометрический центр делений его круговой шкалы должен совпадать с этой осью. Плоскость, в которой лежит вертикальный круг должна быть перпендикулярна оси вращения трубы, а геометрический центр делений его круговой шкалы в свою очередь должен совпадать с этой осью.

Невыполнение хотя бы одного из этих условий неизбежно повлечет за собой потерю точности измерений углов.

Кроме этих основных и очевидных геометрических требований существуют требования

неочевидные, но от этого не менее важные для соблюдения необходимой точности измерений. К ним относятся, например, неизменность положения визирной оси при перефокусировке трубы на разные расстояния, совпадение визирной оси оптического или лазерного центрира и оси вращения теодолита, а также правильность работы отсчетного устройства теодолита.

И если сравнить приведенный список требований, предъявляемых к теодолиту с тем, что содержится в подавляющем большинстве современных методик поверки, то можно смело сделать вывод о том, что применение этих методик на практике будет сопровождаться допуском к работам громадного числа теодолитов и тахеометров, которые к работе не должны допускаться. Что за этим может последовать? - думаю, объяснять смысла нет. Особенно если вспомнить обширный перечень областей хозяйственной деятельности человека, где применяются теодолиты и тахеометры.

Рассмотрим более подробно перечень источников погрешностей измерения углов теодолитами и тахеометрами.

Таблица 2

№ п/п	Источник погрешности	Оптические теодолиты	Электронные теодолиты
1	Рен отсчетного устройства горизонтального и вертикального кругов	Да	Нет
2	Эксцентриситеты горизонтального и вертикального кругов	Да	Да
3	Эксцентриситет алидады горизонтального круга	Да	Да
4	Погрешность устройства центрирования	Да	Да
5	Отклонение оси вращения инструмента от отвесной линии	Да	Да
6	Неперпендикулярность оси вращения трубы к оси вращения инструмента (неравенство подставок)	Да	Да
7	Увод неравенства подставок	Да	Да
8	Смещение визирной оси при перефокусировке трубы	Да	Да
9	Погрешность работы компенсатора теодолита	Да	Да
10	Разрешающая способность трубы	Да	Да
11	Дискретность отсчета по лимбам	Да	Да

Итак. Если принять 10 и 11 пункты таблицы 2 за постоянную величину, которой они и являются для каждой конкретной модели теодолитов и тахеометров, то при измерении углов между направлениями на равноудаленные точки, находящиеся в одной горизонтальной плоскости, на погрешность измерений будут влиять неотвесное положение оси вращения инструмента, рен отсчетного устройства (для оптических теодолитов), эксцентриситеты горизонтального круга и алидады и погрешность центрирующего устройства. Если измеряемые точки будут находиться на разных углах возвышения, то к вышеперечисленным влияющим факторам добавятся неравенство подставок, увод неравенства подставок, эксцентриситет вертикального круга и погрешность работы компенсатора. В случае же, если измеряемые точки будут еще и разноудалены от теодолита, то ко всему прочему на погрешность измерений будет оказывать влияние еще и смещение визирной оси при перефокусировке трубы. В реальных условиях все эти факторы влияют на качество измерений в различных и всевозможных комбинациях. Поэтому оценить совместное влияние всех этих факторов на качество измерений не представляется возможным по вполне очевидным причинам. В связи с этим методика поверки теодолитов должна содержать нормирование метрологических характеристик, а также описание следующих операций их определения:

1. Поверка и юстировка установочного уровня;
2. Определение рена шкалового микроскопа (для оптических теодолитов);
3. Определение коллимационной погрешности теодолита;
4. Определение места нуля (места зенита) теодолита;
5. Определение средней квадратической погрешности измерения горизонтальных углов одним приемом;

6. Определение средней квадратической погрешности измерения вертикальных углов одним приемом;
7. Определение неравенства подставок и его увода;
8. Определение величины углового смещения визирной оси в горизонтальной и вертикальной плоскостях при перефокусировке трубы;
9. Определение диапазона работы и погрешности компенсатора;
10. Определение коэффициента нитяного дальномера (для теодолитов).

При этом следует учесть, что методология определения метрологических характеристик теодолитов, независимо от их модели и типа, может быть разной. Но разница эта обусловлена только и исключительно тем, что для поверки теодолитов могут применяться различные по конструкции эталонные установки, к которым относятся универсальные коллиматоры (УК) различных модификаций, автоколлимационные установки для поверки нивелиров и теодолитов (АУПНТ), установки для поверки теодолитов и нивелиров (УПТН) и др. Поэтому существующее сегодня правило, регламентирующее для поверки теодолитов только ту методику, которая указана в описании типа СИ, не может быть применено к по сути однотипным приборам пусть даже и различных моделей и торговых марок. То есть использование той или иной методики поверки теодолитов должно обуславливаться не описанием типа СИ, а применяемым для поверки эталоном и его точностью. В принципе, это правило может и должно распространяться и на другие группы средств измерений, имеющих одинаковую конструкцию и одинаковые принципы в отношении измерений. Но это уже совсем другая тема, выходящая далеко за рамки данной статьи и требующая отдельного подробного рассмотрения.

Рассмотрим более подробно методы определения некоторых метрологических характеристик теодолитов, особенно тех, что имеются в действующих методиках поверки, но либо не раскрывают сути определяемого параметра, либо имеют теоретические изъяны, либо не выполнимы на практике. И начать, на мой взгляд, следует с параметра, который не представлен ни в одной из действующих методик, кроме МИ 08-00. Правда и в указанной методике способ определения данного параметра описан настолько некорректно, что можно смело сказать, что и не описан вовсе. Этот параметр — смещение визирной оси при перефокусировке трубы — напрямую влияет на погрешность измерения углов между направлениями на точки местности, разноудаленные по отношению к теодолиту. На смещение визирной оси при перефокусировке трубы оказывают влияние смещение оси движения фокусирующей линзы внутри корпуса трубы теодолита по отношению к геометрической оси трубы, а также перекося фокусирующей линзы по отношению к геометрической оси трубы. Для понимания процесса рассмотрим устройство трубы теодолита с внутренней фокусировкой.

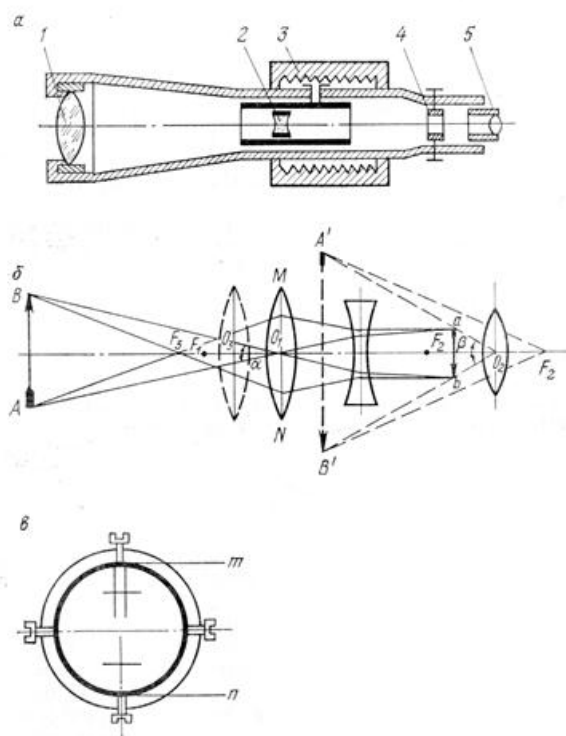


Рисунок 2. Зрительная труба с внутренней фокусировкой

На рисунке 2 представлены: а) — схема устройства трубы; б) — ход лучей в зрительной трубе; в) — сетка нитей.

Зрительная труба состоит из закрепленных в корпусе объектива (1), фокусирующей линзы (2) в подвижной оправе, движущейся посредством зубчатой передачи кремальеры (3), диафрагмы со стеклянной пластинкой, на которой награвированы тонкие штрихи, образующие сетку нитей (4) и окуляра (5). Точка пересечения центральных горизонтального и вертикального штрихов сетки нитей называются перекрестием сетки нитей и являются ее центром. Горизонтальные штрихи, расположенные выше и ниже перекрестия называются дальномерными штрихами и предназначены для измерения расстояний по рейке. Прямая, проходящая через перекрестие сетки нитей и оптический центр объектива, является визирной осью зрительной трубы. Прямая, проходящая через оптические центры объектива и окуляра, является оптической осью зрительной трубы.

В идеале оптический центр фокусирующей линзы и перекрестие сетки нитей должны лежать на оптической оси зрительной трубы, то есть визирная ось трубы должна точно совпадать с оптической осью. Но на практике выполнить данное условие невозможно — визирная ось смещается неверным положением перекрестия сетки нитей, а также искажается неправильным ходом и положением фокусирующей линзы. И если величина смещения визирной оси из-за неверного положения сетки нитей является величиной постоянной и из результатов измерений может быть исключена, то влияние, обусловленное неправильным ходом и положением фокусирующей линзы, имеет переменную величину. Конечно, многие геодезисты могут мне возразить и сказать, что и эта величина так же может быть исключена методом измерения направлений полными приемами при двух положениях вертикального круга («круг лево» и «круг право»). Но признайтесь честно: всегда ли вы выполняете измерения полными приемами, а не ограничиваетесь полуприемом и введением в отчет заранее определенной поправки за коллимационную погрешность и место нуля? Сколько раз я слышал от горе-геодезистов, что при разбивке фундамента «почему-то» не замыкается полигон. А в конце-концов выясняется, что они проводили измерения полуприемами, чтоб сэкономить время и ускорить процесс измерений. А уверены ли вы, что из-за износа или производственного брака у фокусирующей линзы не появился непредсказуемый люфт, о котором вы даже и не догадываетесь, но он тем не менее оказывает ощутимое влияние на точность измерений? Именно поэтому все же необходимо при проверке теодолитов контролировать смещение визирной оси при перефокусировке трубы.

Итак, как же нам предлагает это делать методика поверки МИ 08-00? Прочитав этот пункт поверки полностью, тем более, что это не очень объемный фрагмент текста.

7.2 5 При опробовании должно быть проверено смещение визирной оси зрительной трубы вследствие перефокусирования трубы с помощью фокусирующего устройства. Для проверки зрительную трубу, отфокусированную на бесконечность, наводят на сетку нитей коллиматора или на визирную цель. При перефокусировке трубы вращением головки фокусирующего устройства по ходу и против хода часовой стрелки наблюдают за положением изображения сетки. Смещение изображения сетки нитей не должно превышать двойной толщины штриха сетки зрительной трубы. (Прочитано дословно, с сохранением стиля и орфографии автора.)

Что это? Как это вообще можно выполнить на практике? Я не буду акцентировать внимание читателей на орфографических и стилистических ошибках, содержащихся в приведенном тексте. Просто ответьте, как можно оценить смещение сетки нитей по отношению к сетке коллиматора или визирной цели, если вращением кремальеры фокусировка трубы сбивается и ни сетку коллиматора, ни визирную марку уже видно не будет? А ведь это официальный документ и его кто-то проверял и утверждал. И на «разработку» этой методики были выделены вполне конкретные суммы. И ввод в действие этого документа отменил действие прекрасной методики поверки МИ БГЕИ 08-90, многие из положений которой, кстати сказать, просто перекочевали в МИ 08-00. А ведь в МИ БГЕИ 08-90 приведен абсолютно простой метод определения данного параметра и даны абсолютно четкие допуски на него, выраженные в числовом виде для всех типов теодолитов. И это далеко не абстрактное «не должно превышать двойной «толщины» штриха сетки зрительной трубы»!

Но в МИ 08-00 хоть что-то написано об определении смещения визирной оси при перефокусировке трубы. В других же современных методиках, разработанных в том числе и ведущими метрологическими институтами, нет даже упоминания об этой важной характеристике теодолитов!

А что же было до этого? Как нам предлагает действовать отмененная методика? Смещение визирной оси при перефокусировке трубы, согласно МИ БГЕИ 08-90, оценивается как разность значений коллимационной погрешности и места нуля (зенита), определенных по измерениям на марки коллиматоров, имитирующие бесконечность и расстояния 10 метров и 2 метра. Изменение коллимационной погрешности дает нам представление о смещении визирной оси в горизонтальной

плоскости, а изменение места нуля (зенита) — о смещении в вертикальной плоскости. Все предельно просто! И на все есть допуски, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Наименование характеристики	Тип теодолита							
	3Т1	2Т2	3Т2	2Т5	3Т5	Т15	Т30	2Т30
Изменение коллимационной погрешности при визировании от бесконечности, <ul style="list-style-type: none"> • До 10м не более • До 2м не более 	5" 10"	3" 15"	4,5" 15"	10" 15"	4,5" 15"	18" 30"	– 60"	– 30"
Изменение места нуля (зенита) при визировании от бесконечности, <ul style="list-style-type: none"> • До 10м не более • До 2м не более 	5" 10"	5" 20"	4,5" 15"	10" –	10" –	18" 30"	– –	– 30"

При желании эту таблицу можно дополнять в соответствии с требованиями, приведенными в паспортах на теодолиты различных моделей и марок. И при этом совершенно не надо придумывать какие-то «ноу-хау» для определения величины смещения визирной оси при перефокусировке трубы.

Следующий параметр, на который хотелось бы обратить внимание, - это неперпендикулярность оси вращения трубы к оси вращения инструмента (неравенство подставок).

В подавляющем числе современных методик данный пункт либо не рассматривается вовсе, либо рассматривается только полевой метод контроля. К примеру в упомянутой уже методике МИ 08-00 данный параметр предлагается определять следующим образом:

7.9 Проверка перпендикулярности оси вращения зрительной трубы к вертикальной оси теодолита.

Для проведения этой операции устанавливают теодолит на расстоянии D не более 30 м от стены здания или сооружения. Вертикальную ось теодолита тщательно приводят в отвесное положение. Наводят трубу на марку (точку), расположенную максимально высоко. После каждого наведения при двух положениях круга, составляющих один прием, проецируют центр сетки нитей на шкалу линейки или штриховой меры, установленной примерно на уровне горизонта прибора, перпендикулярно к линии визирования. При проецировании берут отсчеты a_1 и a_2 по шкале в мм. Значение i - отклонения от перпендикулярности - вычисляют по формуле:

$$i = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot (a_1 - a_2) \cdot \rho}{2D}, \quad (1)$$

где D – расстояние от прибора до шкалы, в мм;

$\rho = 206265''$ – значение угла 1 рад. в угловых секундах;

α – угол наклона визирной оси к горизонту при наведении на марку.

В силу масштабности построений (расстояние до стены 5-30 м и положение марки на стене порядка 5 м по высоте и более), данный метод мало подходит для лабораторных исследований. Кроме того данный метод не отличается высокой точностью. То же самое можно сказать о методах, описанных в методиках поверки, разработанных Уральским оптико-механическим заводом.

Поэтому в МИ БГЕИ 08-90 был также предусмотрен метод лабораторных измерений, не требующий больших расстояний, и гораздо более точный, чем полевой метод. Смысл метода сводится к следующему:

1. Определить значение коллимационной погрешности C_1 по измерениям на марку коллиматора, находящегося под углом $\alpha_1 \geq +20^\circ$ по отношению к горизонту;
2. Определить значение коллимационной погрешности C_2 по измерениям на марку коллиматора, находящегося под углом α_2 близким или равным 0° по отношению к горизонту;
3. Определить значение коллимационной погрешности C_3 по измерениям на марку коллиматора, находящегося под углом $\alpha_3 \leq -20^\circ$ по отношению к горизонту;

Значение неравенства подставок i рассчитать по формуле:

$$i = \left(\frac{C_1 - C_2 \cdot \sec \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_1} + \frac{C_3 - C_2 \cdot \sec \alpha_3}{\operatorname{tg} \alpha_3} \right) / 2, \quad (2)$$

Данный метод можно свести к более простому, который заключается в следующем:

Навести перекрестье сетки нитей теодолита на перекрестье марки коллиматора, находящегося под углом $+50^\circ$ по отношению к горизонту, при круге лево и снять отсчет по горизонтальному кругу теодолита «А».

Перевести зрительную трубу теодолита через зенит, развернуть теодолит на 180° , навести перекрестье сетки нитей теодолита на перекрестье марки автоколлиматора при круге право и снять отсчет по горизонтальному кругу теодолита «В».

Навести перекрестье сетки нитей теодолита на перекрестье марки коллиматора под углом -50° по отношению к горизонту и снять отсчеты по горизонтальному кругу «С» и «D» при круге лево и при круге право соответственно.

Значение неравенства подставок i рассчитать по формуле:

$$i = \frac{A - C - B + D}{4,8}, \quad (3)$$

Если же говорить о методе полевых измерений, то он может применяться для теодолитов с низкой чувствительностью отсчетного устройства, то есть для технических теодолитов типа Т30, 2Т30 и 4Т30. Хотя, в случае, когда для поверки используется установка УПТН или же универсальный коллиматор УК-1, у которого нижний коллиматор вертикального веера имеет специальную шкалу для проверки неравенства подставок у теодолитов, чувствительность отсчетного устройства технических теодолитов не будет влиять на точность определения неравенства подставок.

Практика показывает, что из-за неравномерного износа оси вращения трубы теодолита неравенство подставок может иметь увод в сторону от среднего положения при измерениях полным приемом.

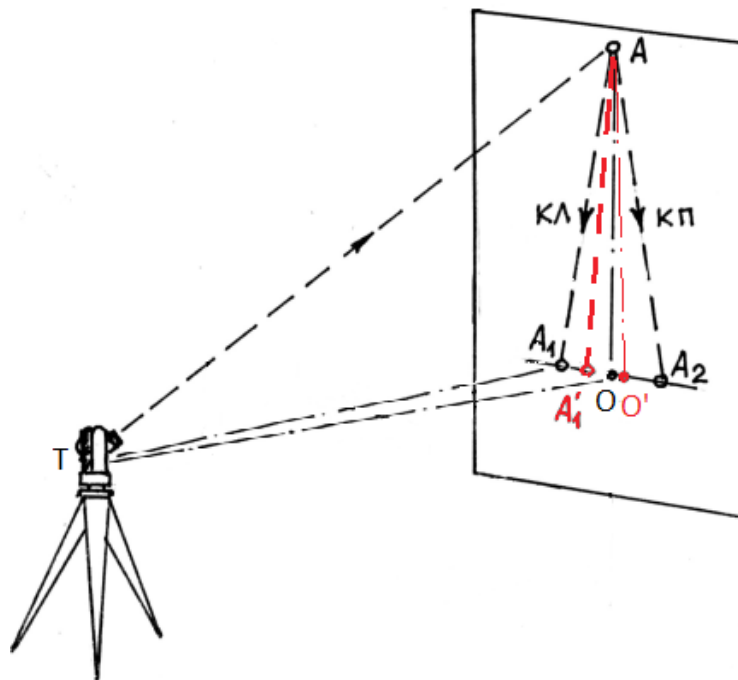


Рисунок 3. Увод неравенства подставок

Обратимся к рисунку 3. На рисунке изображено влияние неравенства подставок на смещение визирной оси при изменении вертикального угла и влияние на отсчет по горизонтальному кругу. При выполнении условия перпендикулярности оси вращения трубы к оси вращения прибора его визирная ось будет находиться всегда в вертикальной плоскости, которая определяется тремя точками — А, О и Т. То есть в данном случае значения горизонтальных направлений на точки местности, находящиеся на различной высоте, будут полностью свободны от погрешности, вызванной неравенством подставок. Если ось вращения трубы не перпендикулярна оси вращения теодолита и не имеет износа (или же износ равномерный), то его визирная ось, согласно рисунку, будет находиться в плоскости А-А₁-Т при положении вертикального круга слева («круг лево») и в плоскости А-А₂-Т при положении вертикального круга справа («круг право»). А это значит, что средний отсчет по горизонтальному кругу будет опять же свободен от влияния неравенства подставок — отрезки А₁О и А₂О равны. То есть проведение измерений полными приемами исключает данную погрешность измерений. Но это происходит далеко не всегда. При неравномерном износе оси трубы в лагерах может случиться так, что при одном круге визирная ось пройдет по линии А-А'₁, а при другом круге — по линии А-А'₂, а соответственно средняя линия А-О' отклонится на определенный угол от вертикального положения. Угол отклонения средней линии от вертикали и есть увод неравенства подставок. И отклонение это может быть достаточно большим при том, что само значение неравенства подставок и будет находиться в допустимых пределах. Кроме того, учесть или же исключить этот параметр при измерениях достаточно затруднительно. К чему такое отклонение может привести, к примеру, при контроле вертикальности стены жилого дома, думаю объяснять не надо. А соответственно данный параметр у теодолитов должен подлежать обязательному нормированию в соответствии с требованиями решаемых задач и должен подлежать периодической проверке. На сегодняшний день увод неравенства подставок не нормируется нигде, - ни в одной методике и ни в одном паспорте на теодолит. Его нет даже в МИ БГЕИ 08-90. Его никто не контролирует и никому не известно, сколько теодолитов с подобным дефектом допущено к использованию.

Перейдем теперь к самому важному для каждого метролога этапу проверки теодолитов — к определению средней квадратической погрешности (да-да, именно так это принято называть в геодезии) измерения углов одним приемом.

Прочитав, как это предлагается делать в одной из множества похожих друг на друга, как близнецы, методик проверки, разработанных в одной из уважаемых организаций:

Абсолютная погрешность и СКП измерений, углов определяется на эталонном коллиматорном стенде путем многократных измерений (не менее четырех циклов измерений, состоящих из измерений в положении «Круг право» (КП) и «Круг лево» (КЛ)) горизонтального угла (90±30)° и вертикального угла (более +20°).

Абсолютная погрешность измерений (при доверительной вероятности 0,95) горизонтального и вертикального углов вычисляется по формуле:

$$\Delta_{vi} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{ji}}{n} - V_{oj} \right) \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(V_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^n V_{ij}}{n} \right)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где Δ_{vi} — абсолютная погрешность измерений горизонтального (вертикального) угла, ... ";

V_{oj} — значение горизонтального (вертикального) угла по эталонному коллиматорному стенду, взятое из свидетельства о проверке на него, ... ";

V_{ij} — значение горизонтального (вертикального) угла по поверяемому тахеометру, ... ";

n — число измерений.

СКП измерений горизонтального и вертикального углов вычисляется по формуле:

$$m_{vi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}}, \quad (5)$$

где m_{vi} — СКП измерений горизонтального (вертикального) угла, ... ";

V_i — разность между измеренным поверяемым тахеометром значением i -го горизонтального

(вертикального) угла, и значением i -го горизонтального (вертикального) угла по эталонному коллиматорному стенду, взятое из свидетельства о поверке на него...";

n — число измерений.

Рассматриваемый текст не только не раскрывает сути и методики измерений, он, кроме того, просто вводит поверителей в заблуждение. Начать следует с того, что в тексте совершенно не описан эталонный коллиматорный стенд. А ведь конструкция стенда или же установки напрямую влияет на порядок измерений углов. Кроме того, абсолютно непонятно что имеется в виду под «абсолютной погрешностью» измерений углов, если для теодолита таковой является коллимационная погрешность и место нуля (зенита) при измерении горизонтальных и вертикальных направлений и углов соответственно. И под абсолютным их значением может пониматься только их среднее арифметическое значение, а отклонения их значений от среднего на каждом участке лимба обусловлены эксцентриситетами лимбов и алидады теодолита. Да и формула определения этих погрешностей значительно отличается от той, что предлагается рассматриваемой методикой для вычисления абсолютной погрешности измерений углов. Также необходимо отметить, что описанный метод позволяет определить скорее личностную погрешность исполнителя, чем инструментальную погрешность теодолита, так как не предполагает перестановку лимба (алидады) горизонтального круга между приемами измерений и не регламентирует метод наведения на визирную цель с одной и той же стороны. Этот метод необходим для исключения погрешности наведения из результатов измерений, так как погрешность наведения у каждого исполнителя всегда имеет свой определенный знак (кто-то не доводит визирную ось до цели, а кто-то переводит) и носит систематический характер. А это в свою очередь позволяет получить значение угла, как разность отсчетов двух направлений, свободную от влияния погрешности наведения.

Поэтому для оценки СКП измерения горизонтального угла следует сначала понять, какие факторы в первую очередь влияют на ее значение. К влияющим факторам относятся:

1. Разрешающая способность трубы;
2. Рен отсчетного устройства;
3. Эксцентриситет отсчетного лимба;
4. Эксцентриситет алидады;
5. Погрешность наведения на визирную цель;
6. Неточность отсчетов по шкалам лимбов;
7. Погрешность нанесения штрихов круговой шкалы лимба.

Из перечисленного можно исключить влияние эксцентриситета горизонтального круга и алидады, проводя измерения полными приемами и учитывая при этом коллимационную погрешность для каждого из измеряемых направлений, а также влияние погрешности наведения на визирную цель, проводя наведение всегда с одной и той же стороны. Правда, если эксцентриситет лимба будет слишком велик, то он будет оказывать влияние и на значение рена отсчетного устройства, а вернее на его непостоянство. Поэтому значения эксцентриситетов все же следует ограничивать некоторыми рамками допустимых значений. Рен отсчетного устройства определяется отдельно и в случае выхода его значения за установленные пределы теодолит не допускается к дальнейшим измерениям. Определение погрешности нанесения штрихов круговой шкалы лимба — процесс очень трудоемкий и кропотливый и проводится он выборочно при изготовлении лимбов, как один из этапов производственной цепочки в соответствии с ГОСТ 13424-68.

В связи с тем, что влияние разрешающей способности трубы на значение СКП измерения углов уже физически включено в это значение, рассмотрим более подробно влияние на значение СКП измерения углов только одного фактора — неточности отсчетов по лимбам.

Неисключенная погрешность, обусловленная неточностью отсчета по горизонтальному и вертикальному лимбам, вызванной дискретностью работы отсчетного устройства электронного теодолита, может быть вычислена с учетом того, что к ней применяется равновероятный закон распределения, по формуле:

$$u_{отсч} = \frac{C \cdot D}{\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где C — цена наименьшего деления отсчетного устройства;

D — дискретность отсчета по вертикальному и горизонтальному кругу.

Дискретность отсчета у электронных отсчетных устройств равна 0,5 от цены наименьшего разряда на табло. У оптических же теодолитов отсчеты принято снимать с точностью 0,1 деления. Опытные же геодезисты могут с легкостью снять отсчеты 0,05, 0,25, 0,75 и 0,95 деления. Тем не менее отсчеты все же снимаются с точностью 0,1 деления и отсчеты меньше, половины дискретности отсчитывания будут отнесены к меньшему значению а отсчеты больше половины — к большему. Данный факт тяжело воспринимается большинством метрологов, которые считают, что точность взятия отсчета может быть только 0,5 цены наименьшего деления шкалы. Но все же это не отменяет того, что отсчет может быть взят с точностью 0,1 и даже 0,05 цены наименьшего деления. Именно поэтому теодолиты типа 2Т30 или же 4Т30П, имеющие цену наименьшего деления шкалы 5' (300"), характеризуются СКП измерения угла равной 30". С учетом сказанного, значения неисключенной погрешности, обусловленной неточностью отсчета по лимбам будут уже рассчитываться, исходя из треугольного закона распределения погрешности, и формула (6) для оптических теодолитов примет следующий вид:

$$u_{отсч} = \frac{C \cdot D}{\sqrt{6}}, \quad (7)$$

где $D = 0,1$

Используя формулы (6) и (7) для основных типов теодолитов можно определить значения неисключенной погрешности, обусловленной неточностью отсчета по лимбам и свести их в одну таблицу 4.

Таблица 4

Типы теодолитов	Электронные теодолиты (равновероятный закон распределения)				Оптические теодолиты (треугольный закон распределения)			
	0,1"	1"	5"	10"	10'	5'	1'	1"
Цена деления отсчетной шкалы (младший разряд)	0,1"	1"	5"	10"	10'	5'	1'	1"
Неисключенная погрешность, обусловленная неточностью отсчета по лимбам	0,03"	0,29"	1,44"	2,89"	24,5"	12,2"	2,4"	0,04"

Если принять, что вертикальный угол определяется, как разность между направлением в горизонт или зенит и вертикальным направлением на точку местности (визирную марку коллиматора), то есть фактически является измеренным вертикальным направлением, исправленным на значение мета нуля или зенита, то неисключенная погрешность, обусловленная неточностью отсчета по вертикальному лимбу ($U_{верт}$) будет рассчитываться по формулам (6) и (7) в зависимости от того, какой теодолит используется — с электронным отсчетным устройством или же с оптическим.

Горизонтальный же угол образуется двумя измеренными направлениями, а соответственно неисключенная погрешность, обусловленная неточностью отсчета по горизонтальному лимбу будет рассчитываться по формуле:

$$U_{гор} = \sqrt{2} \cdot u_{отсч}, \quad (8)$$

С учетом сказанного выше, действительное значение СКП измерения углов теодолитом или тахеометром может быть рассчитана по формуле:

$$M = \sqrt{m^2 + U^2}, \quad (9)$$

где m — значение СКП, вычисленное по результатам измерений горизонтальных и вертикальных углов между визирными марками коллиматоров, настроенных на бесконечность, с использованием формул Гаусса или Бесселя; U — значение неисключенной погрешности, обусловленной неточностью отсчета по горизонтальному или вертикальному лимбам, вычисленное по одной из формул (6), (7) или (8).

Справедливость формулы (9) можно доказать, исходя из идеального случая при измерениях углов, когда значение первого из ее подкоренных слагаемых будет равно нулю. Такое может произойти, если чувствительность отсчетного устройства инструмента настолько низкая, что на его показания не будут оказывать ощутимого влияния ни малые эксцентриситеты лимбов и алидады, ни разрешающая способность визирной трубы, ни какие-либо еще малые влияющие факторы. Но в то же время неисключенная погрешность измерения углов будет уже обусловлена самим низким разрешением отсчетного устройства теодолита или тахеометра. Для точных и высокоточных теодолитов, у которых чувствительность отсчетного устройства высока, значение второго подкоренного слагаемого будет либо сопоставимо со значением первого слагаемого, либо даже пренебрежимо мало в сравнении с ним, но все же будет оказывать влияние на точность измерения углов.

Что касается поверки дальномерной части электронных тахеометров, то этой теме необходимо посвятить отдельную статью. Единственно, что необходимо отметить, - это то, что при создании современных методик поверки дальномерного канала тахеометров и светодальномеров не учитываются требования инструкций по топографической съемке, регламентирующие максимальное значение измерительного плеча при проведении тахеометрической съемки, а также не берется в расчет тот факт, что для измерений расстояний используются гармонические электро-магнитные колебания формируемые несколькими генераторами, на основе модуляции которых формируются периодические электромагнитные импульсы. Следствием этого является периодическая повторяемость значений погрешности измерений, а соответственно нет абсолютно никакой необходимости проводить поверку на всем заявленном диапазоне измерений. Ведь если произойдет сбой в работе хотя бы одного из генераторов, то точность измерений измерения расстояний упадет сразу во всем диапазоне. А если точность измерений соответствует установленным требованиям в диапазоне, установленном инструкцией по тахеометрической съемке, то она будет соответствовать требованиям и во всем заявленном производителем диапазоне измерений.

Вывод из всего сказанного однозначен: нет абсолютно никакой необходимости разрабатывать громадное число методик поверки на по-сути однотипные приборы и тратить на это бесполезное по своей сути занятие громадные средства, а можно воспользоваться (после необходимой для современных требований доработки, разумеется) уже готовой, разработанной еще в СССР, методикой поверки теодолитов МИ БГЕИ 08-90, распространив ее методы и требования на все существующие сегодня их типы, модели и модификации. А это в свою очередь приведет не только к унификации поверки, но и создаст более благоприятные условия для совершенствования производства теодолитов и тахеометров в Российской Федерации.