

**ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВИЗИРНОЙ ЦЕЛИ – ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ МАРКИ
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СХЕМЕ ОБРАТНОЙ ЛИНЕЙНО-УГЛОВОЙ ЗАСЕЧКИ**

©2017 **И.В. Горяинов, А.А. Кодиров, А.А. Шевчук, С.В. Аверьянов, Е.В. Дельфонцев**
Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
igorgoryainow@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы влияния точности фиксации наблюдателем центра визирной цели при определении координат и высот точек, закрепленных отражательными пленками при различном удалении их от тахеометра, различных высотах и направлениях. Эмпирически получены закономерности изменения погрешностей наблюдений в зависимости от углов наклона, углов разворота и расстояний от инструмента до визирной цели.

Ключевые слова: погрешность, электронный тахеометр, пленочный отражатель, угол разворота цели, угол наклона цели, удаленность цели, визирная цель, координаты, высоты, обратная линейно-угловая засечка

**INFLUENCE OF THE POSITION OF THE VISUAL OBJECTIVE - REFLECTIVE MARK
ON THE ACCURACY OF MEASUREMENTS BY THE DIAGRAM OF THE REVERSE
LINEAR-ANGLE HEADING**

©2017 **Goryainov I., Kodyrov A., Shevchuk A., Averyanov S., Delfontsev E.**
The State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
igorgoryainow@yandex.ru

Abstract. The article deals with the influence of accuracy of the observer's fixation of the sighting target's center on determining the coordinates and heights of points fixed by reflective films with different distance from the total station, various heights and directions. Patterns of variation in observation errors, depending on the angles of inclination, the angles of rotation and the distances from the instrument to the target have been obtained empirically.

Keywords: error, electronic total station, film reflector, target rotation angle, target tilt angle, target distance, sighting target, coordinates, heights, inverse linear angular intersection

С развитием современных средств измерений достаточно широко применяются пленочные отражатели. Наибольшее распространение они получили в городской черте и на

строительных площадках. Это обусловлено высокой плотностью застройки и легкостью фиксации точек отражательными пленками. Однако в отличие от призмных отражателей пленочные не позволяют изменять свое положение относительно визирной оси тахеометра. В связи с данной особенностью исполнитель, как правило, никогда не наблюдает отражательную пленку перпендикулярно к визирной оси. Наведение на цель производится под некоторым, иногда довольно значительным углом. Ситуация усугубляется при инженерно-геодезических работах, при высотном или подземном строительстве, когда помимо горизонтальных углов возникают и большие углы наклона (рис. 1).

В периодической литературе достаточно подробно освещены вопросы точности измерения расстояния при различных углах разворота визирной цели как на отражательные пленки, так и на другие виды поверхностей [1, 2]. Однако полученные данные характеризуют точность работы лазерного дальномера при различных углах поворота цели, а не реальную погрешность измерения расстояния и, соответственно, определения координат. Так, авторы работ [1–3] жестко закрепляли дальномер (рис. 2), а

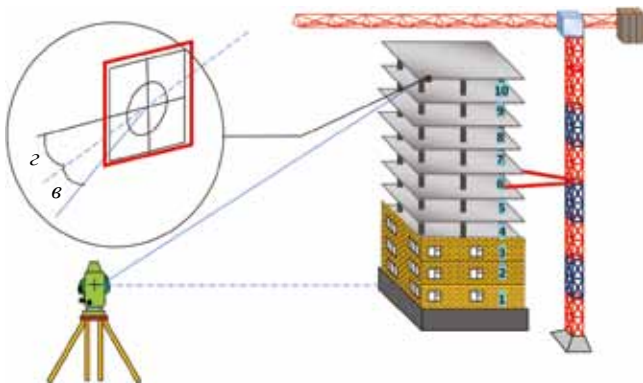


Рис. 1. Вертикальные (θ) и горизонтальные (z) углы при визировании на высотную цель



Рис. 2. Исследования точности работы лазерного дальномера

визирную цель — отражательную марку поворачивали вокруг своей оси. При такой технологии исследований исключается процесс визирования на цель и, следовательно, в результатах наблюдений не учитывается погрешность визирования.

В этом случае у А.И. Кузнецова в [1] получались результаты, показывающие незначительность влияния угла поворота марки на точность измерения расстояния до нее. Подобный эффект легко объясним, если рассмотреть конструкцию отражательной пленки (рис. 3). Она состоит из достаточно большого количества микропризм. Известно, что угол поворота трипель-призмы не оказывает существенного влияния на точность измерения расстояния. Таким образом, у А.И. Кузнецова получились почти равные по значениям результаты для пленочных и призмных отражателей.

Однако на производстве геодезист не имеет возможности установить отражательную марку в нормальное положение и произвести максимально точное наведение. Инструмент наводят на реальные цели под разными углами и по мере уменьшения угла визирования погрешность наведения начинает оказывать возрастающее влияние на точность измерения расстояния (рис. 4).

Существенное влияние на точность определения координат оказывает также и удаленность объекта визирования от тахеометра. Так,

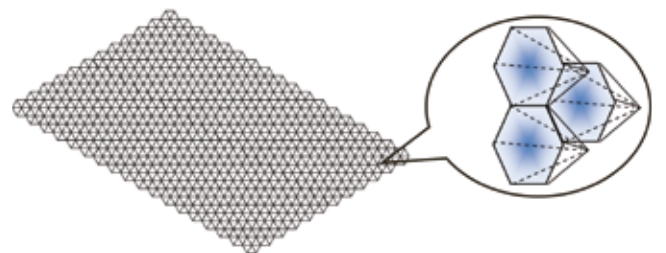


Рис. 3. Пленочный отражатель при увеличении

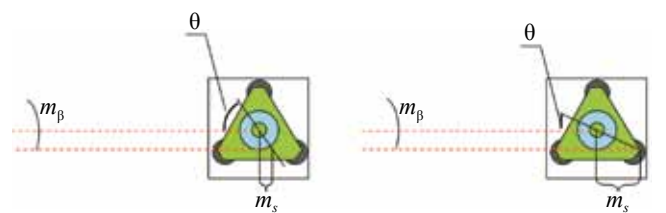


Рис. 4. Увеличение погрешности измерения расстояния m_s при уменьшении угла поворота визирной цели θ

например, в инструкциях строго регламентированы максимальные и минимальные длины сторон полигонометрии, вводя ограничения таким образом, чтобы измеряемые линии не отличались по длине между собой более чем в 2–3 раза [4]. В условиях городской застройки и на строительных объектах определяемый пункт может находиться в столь непосредственной близости от тахеометра, что неопределенность фиксации центра ее при наблюдении начинает играть существенную роль.

Таким образом, нам необходимо было установить зависимости влияния:

удаленности визирной цели на точность фиксации ее центра в поле зрения тахеометра;

горизонтального угла поворота визирной цели на точность определения ее центра;

угла наклона визирной цели на точность определения ее центра.

Исследование зависимости точности фиксации середины визирной цели от ее удаленности. Большинство современных геодезических инструментов имеет увеличение зрительной трубы 30 крат. Несомненно, что середина отражательной марки определяется непосредственно исполнителем (в нероботизированных тахеометрах), пусть и посредством определенной оптической системы.

Для проведения эксперимента и получения функциональной зависимости мы не стали использовать оптические увеличительные приборы. Была создана эквивалентная ситуация, при которой наблюдения несколькими исполнителями происходят при одинаковых температурных условиях (в помещении) одновременно и, что немало важно, при постоянном качественном (искусственном) освещении.

На стандартной отражательной марке размещалась «макетная» цель в виде бумажного квадрата размером 35×35 мм (промежуточный размер между отражательными пленками ОП-30 и МГ-40). Исполнитель, находясь на заданном удалении, визуальнo определяет её центр, а помощник фиксирует данную точку (рис. 5).

Подобным образом на каждой точке наблюдалось пять одинаковых целей, что составляло один прием наблюдений. Каждым исполнителем наблюдалось 10 точек на расстояниях от 0,5 до 5,0 м, в прямом и обратном направлениях. Чтобы исключить привыкание исполнителя и компенсировать влияние усталости к концу эксперимента между измерениями в прямом и обратном направлениях делался перерыв. Работы проводились в течение трех дней с наблюдением по 10 марок в день. Следовательно, для каждого расстояния каждым исполнителем

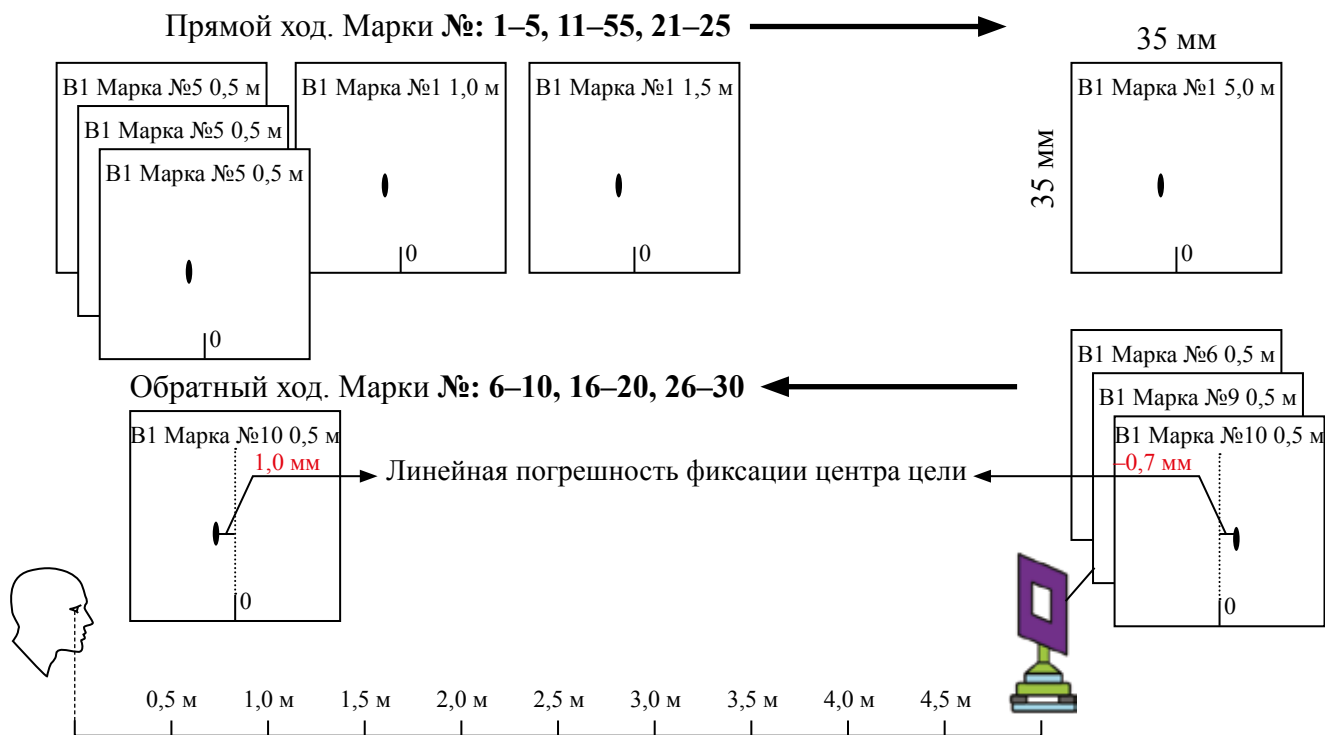


Рис. 5. Порядок проведения эксперимента

было выполнено 30 наблюдений и определены 30 отклонений x_i визуально наблюдаемого центра марки от истинного. В качестве примера в табл. 1 приведены отклонения x_i по наблюдениям одного исполнителя в течение первого дня наблюдений.

Оценка точности визуального визирования выполнялась для каждого наблюдателя по формуле Гаусса

$$\sigma_{\text{взгл}} = \sqrt{\frac{[x_i^2]}{n}}, \quad (1)$$

где x_i — i -й результат наблюдений визуального отклонения центра марки от его истинного значения, мм; n — количество наблюдений, участвующих в обработке ($n=30$).

Затем из наблюдений были исключены «грубые» отклонения, не попадающие в интервал:

$$x_{\text{ср}} - 2\sigma_{\text{взгл}} \leq x_i \leq x_{\text{ср}} + 2\sigma_{\text{взгл}}, \quad (2)$$

где x_i — i -й результат наблюдений (отклонение от истинного значения); $x_{\text{ср}}$ — среднее значение

отклонений, характеризующее смещенность; $\sigma_{\text{взгл}}$ — СКП результатов ряда наблюдений (n).

Число таких ошибок для каждого расстояния колебалось от 1 до 5. По оставшимся значениям была повторно выполнена оценка точности по формуле (1) для каждого расстояния и для каждого исполнителя. Её величины, выраженные в линейной и угловой мерах, представлены в табл. 2.

Принимая, что с применением оптической трубы с 30-ти кратным увеличением длины линий увеличиваются в 30 раз, а угловые погрешности уменьшаются в 30 раз, с учетом табл. 2 получим следующие данные для реальных полевых измерений (табл. 3).

Анализируя табл. 1, видим четкую закономерность: уменьшение величины погрешности определения центра наблюдаемой марки при увеличении удаленности до нее. Из этих данных следует, что результаты пятого исполнителя отличаются от остальных. Это объясняется, очевидно, тем что пятый наблюдатель имел

Таблица 1

Отклонения x_i визуально определяемого центра от истинного

Удаленность визирной цели от наблюдателя, м	Отклонения x_i от истинного центра, мм									
	в прямом направлении					в обратном направлении				
	Номер марки					Номер марки				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	0,3	0,1	0,5	-0,5	0,2	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	0,4
1,0	-1,4	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	-0,4	-0,4	1,1
1,5	0,1	0,6	0,6	1,0	-0,4	0,6	-0,3	1,0	0,2	0,1
2,0	0,5	0,6	0,1	0,1	0,5	0,0	-0,5	0,4	-0,3	0,0
2,5	-0,5	-0,5	-0,3	-0,4	0,0	-0,5	0,0	0,5	-0,3	0,1
3,0	0,0	0,0	-0,2	-0,5	-0,4	-0,2	0,2	0,1	-0,5	0,1
3,5	0,4	-1,0	-0,2	0,5	-0,6	-0,5	0,2	-0,3	0,1	-0,6
4,0	0,0	0,7	-1,0	-0,3	-0,2	-2,0	1,0	-0,6	-0,6	0,6
4,5	0,7	0,5	1,3	1,0	2,3	0,1	1,0	1,2	2,0	0,3
5,0	-0,3	-0,5	0,0	0,5	-0,5	0,0	0,1	0,5	0,2	-0,6

Таблица 2

СКП визуальной фиксации центров визирных целей

Расстояние до марки, м	Наблюдатель									
	1		2		3		4		5	
	мм	"	мм	"	мм	"	мм	"	мм	"
0,5	0,68	279,8	0,86	353,2	0,86	353,1	0,62	257,1	0,43	177,4
1	0,57	117,3	1,15	236,9	1,05	217,2	0,61	126,8	0,36	74,3
1,5	0,99	136,0	1,06	146,4	1,05	144,3	0,53	72,8	0,48	66,0
2	0,98	100,6	0,87	89,3	0,90	92,6	0,70	72,3	0,31	31,7
2,5	0,84	69,5	1,04	86,1	0,78	64,6	0,49	40,8	0,27	22,6
3	0,66	45,5	0,92	63,3	1,07	73,2	0,85	58,8	0,24	16,5
3,5	0,76	44,8	0,82	48,3	1,04	61,4	0,66	38,8	0,17	10,2
4	0,77	39,9	1,13	58,2	1,00	51,8	0,83	42,9	0,17	8,7
4,5	1,39	63,8	0,60	27,5	1,08	49,5	0,85	39,1	0,18	8,3
5	0,77	31,9	0,90	37,2	1,10	45,4	0,65	26,9	0,18	7,5

Сводная таблица СКП оптической фиксации центров визирных целей, угл. секунды

Расстояния в поле, м	Наблюдатель					
	1	2	3	4	5	Среднее (без пя- того наблюдателя)
1	2	3	4	5	6	7
15	9,3	11,8	11,8	8,6	5,9	10,4
30	3,9	7,9	7,2	4,2	2,5	5,8
45	4,5	4,9	4,8	2,4	2,2	4,2
60	3,4	3,0	3,1	2,4	1,1	3,0
75	2,3	2,9	2,2	1,4	0,8	2,2
90	1,5	2,1	2,4	2,0	0,6	2,0
105	1,5	1,6	2,0	1,3	0,3	1,6
120	1,3	1,9	1,7	1,4	0,3	1,6
135	2,1	0,9	1,7	1,3	0,3	1,5
150	1,1	1,2	1,5	0,9	0,2	1,2

значительно больший профессиональный опыт работы как на высокоточных объектах, так и на топографо-геодезическом производстве. Для того чтобы результаты его наблюдений не сказывались на завышении точности, они были исключены при вычислении средних значений (см. графу 7 табл. 3).

Для лучшего восприятия данных по усредненным значениям СКП построим график (рис. 6).

Из графика (см. рис. 6) виден характер зависимости: с уменьшением расстояния до цели происходит рост погрешности визирования. При удалении на 30 м погрешность определения центра марки составляет 5,3", что превышает точность большинства современных угломерных инструментов.

Воспользовавшись системой подбора линии тренда в ПО MS Excel, по данным табл. 3 получена следующая формула для определе-

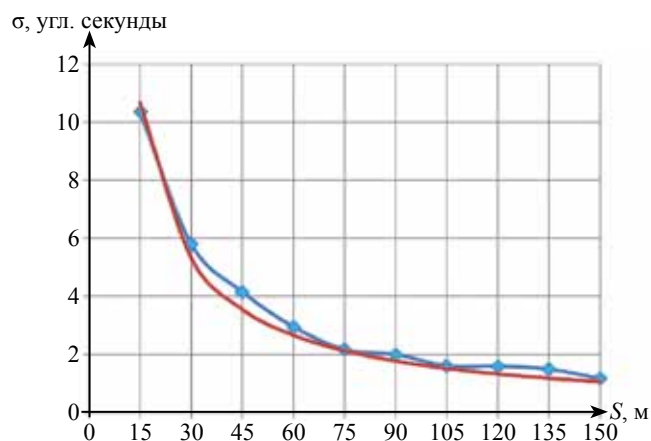


Рис. 6. Среднеквадратические погрешности фиксации центра визирной цели при различном удалении:

— данные эксперимента; — эмпирическая функция

ния погрешности визирования электронным тахеометром:

$$\sigma''_{\text{взгл}} = \frac{160''}{S_m}, \quad (3)$$

где S_m — расстояния от тахеометра до цели, м.

При удалении марки менее чем на 30 м наблюдается существенный рост погрешности визирования. Работа на коротких расстояниях приводит к значительным ошибкам в ориентировании небольших выработок при строительстве метро и на других объектах, когда геодезистам необходимо переносить координатную сеть в замкнутом пространстве без специального оборудования.

Однако, если пересчитать угловые погрешности, определяемые по формуле (3) в линейную меру, они будут практически постоянными, для расстояний от 15 до 150 м, равными 0,7 мм.

Исследование зависимости точности фиксации середины визирной цели от угла разворота. Для определения влияния угла разворота цели на точность определения ее центра была доработана стандартная отражательная марка. На ней был установлен лимб, позволяющий быстро фиксировать необходимый угол разворота (рис. 7).

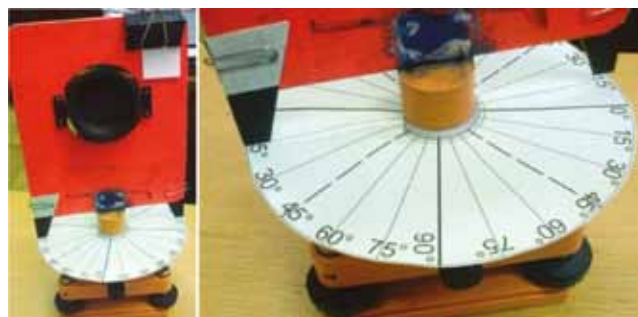


Рис. 7. Устройство марки для исследования влияния угла разворота цели на точность фиксации середины

При помощи этой марки исполнители могли наблюдать визирную цель под различными углами.

Определялись центры 30 марок тремя исполнителями для точки, установленной на расстоянии 2,5 м при углах поворота от 90 до 15° с шагом 15°. Эксперимент проводился в течение трех дней. В день каждым исполнителем наблюдалось по 10 целей: 5 — в прямом и 5 — в обратном разворотах (вращение марки по ходу и против хода часовой стрелки). В качестве примера в табл. 4 приведены отклонения x_i по наблюдениям одного исполнителя в течение первого дня наблюдений.

Таблица 4

Отклонения x_i (мм) визуально определяемого центра от истинного

Номер марки	Угол разворота визирной цели					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	-7	-4,5	-2,5	-1,5	-2,0	0,1
2	-4,4	-3,7	-2	-1,9	-1,2	-1,0
3	-4,6	-2,3	-2,5	-1,9	-1,0	-1,0
4	-2,5	-3,5	-1,1	-2,7	-1,0	-1,5
5	-5,5	-3,0	-1,0	-2,5	-2,5	-1,0
6	2,5	1,5	0,0	-1,0	-1,5	0,0
7	5,0	1,5	1,7	0,5	-0,2	-0,5
8	4,5	0,0	0,2	0,5	0,5	0,0
9	-2,8	1,0	0,5	1,0	0,0	0,2
10	3,0	0,4	-0,3	1,5	-0,5	0,0

Из рядов измерений исключены грубые ошибки (см. формулу (2)) и определены СКП фиксации центра марки. Результаты сведены в табл. 5.

Таблица 5

Сводная таблица СКП фиксации центра визирной цели σ , мм

Наблюдатель	Угол разворота визирной цели θ					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	3,3	2,1	1,6	1,5	1,3	0,7
2	2,4	1,3	1,0	0,8	0,9	0,7
3	2,9	1,6	1,1	0,9	0,7	0,5
Среднее	2,9	1,7	1,2	1,1	0,9	0,6

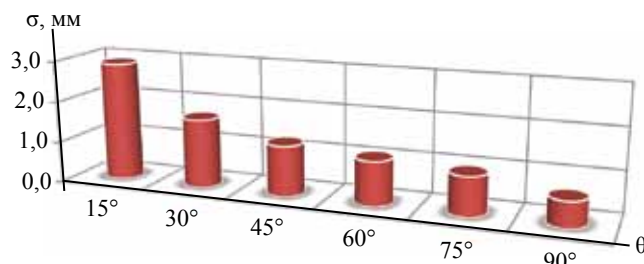


Рис. 8. Гистограмма погрешностей определения центра визирной цели в зависимости от горизонтально-го угла её поворота

По результатам табл. 5 построим гистограмму (рис. 8).

Данные табл. 5 аппроксимировались по МНК функцией $y = a \sin^{-1}\theta$ и получена формула

$$m_{\text{мм}} = 0,6 \text{ мм}/\sin \theta, \quad (4)$$

где θ — угол разворота визирной цели.

Исследование зависимости точности фиксации центра визирной цели от угла наклона. Аналогичные исследования были выполнены для определения влияния угла наклона цели на точность визирования на нее тахеометром. Для выполнения данных работ была модернизирована стандартная марка, на нее устанавливался вертикальный лимб для быстрой фиксации углов наклона (рис. 9). В качестве примера в табл. 6 приведены отклонения x_i по наблюдениям одного исполнителя в течение первого дня наблюдений.

Таблица 6

Отклонения x_i (мм) визуально определяемого центра от истинного

Номер марки	Угол наклона визирной цели v					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	-0,5	0,5	-1,4	-1,0	-2,0	0,1
2	-1,2	-0,5	-1,5	-2,5	-1,2	-1,0
3	-4,5	-1,5	0,5	0,4	-1,0	-1,0
4	-6,7	1,5	-1,7	-1,5	-1,0	-1,5
5	-2,5	-0,5	0,5	-0,8	-2,5	-1,0
6	-3,5	-2,1	-0,4	0,4	-1,5	0,0
7	-5,7	-1,5	-1,5	-0,1	-0,2	-0,5
8	-0,5	-1,8	0,2	0,5	0,5	0,0
9	-0,6	-2,5	-3,0	0,4	0,0	0,2
10	-4,7	-2,0	-1,3	-1,5	-0,5	0,0

Из рядов измерений исключены грубые ошибки (см. формулу (2)) и определены СКП фиксации центра марки (табл. 7).

Таблица 7

Сводная таблица СКП фиксации центра визирной цели σ , мм

Наблюдатель	Угол наклона визирной цели v					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1-й (К.А.)	3,8	1,6	1,0	1,1	0,7	0,5
2-й (Г.И.)	3,0	1,8	1,4	1,0	0,9	1,1
3-й (Ш.А.)	2,4	0,8	1,0	0,7	0,8	0,9
Среднее	3,1	1,4	1,1	0,9	0,8	0,8

По результатам табл. 7 построим гистограмму (рис. 10)

Данные табл. 7 аппроксимировались по МНК функцией $y = a \sin^{-1}v$ и получена формула

$$m_{\text{мм}} = 0,8 \text{ мм}/\sin v, \quad (5)$$

где v — угол наклона визирной цели.

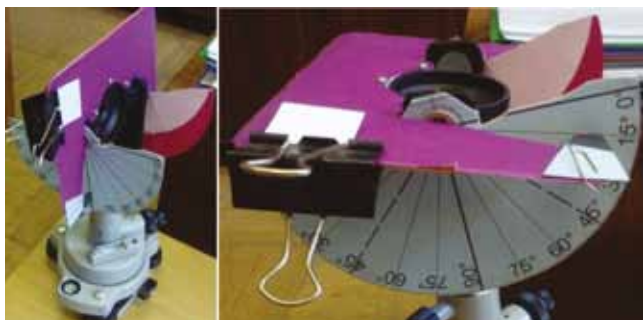


Рис. 9. Устройство марки для исследования влияния угла наклона визирной цели на точность фиксации центра

Таким образом, по результатам экспериментальных наблюдений можно сделать следующие выводы:

при малых расстояниях угловая погрешность фиксации центра визирной цели электронным тахеометром существенна. Она превышает паспортную точность пятисекундного тахеометра ($5,3''$) и растёт с уменьшением расстояния (для 10 м составляет $16''$). Величину этой погрешности можно определять по формуле $m''_{\text{взгл}} = \frac{160''}{S_{\text{м}}}$. В линейной мере эта величина равна $0,7$ мм;

на точность определения центра визирной цели, следовательно, её координат и высот, существенное влияние оказывают углы разворота и наклона марки относительно визирной оси тахеометра. Эти погрешности не зависят

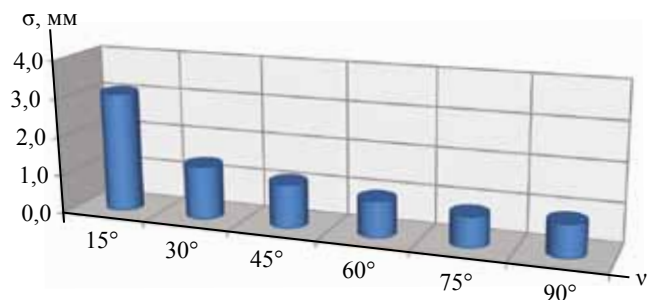


Рис. 10. Гистограмма погрешностей определения центра визирной цели в зависимости от угла наклона

от удаленности визирной цели от тахеометра и могут определяться по формулам:

$$\text{для углов разворота } m_{\text{мм}} = 0,6 \text{ мм}/\sin \theta;$$

$$\text{для углов наклона } m_{\text{мм}} = 0,8 \text{ мм}/\sin \nu$$

и увеличиваются с уменьшением углов наклона ν и угла разворота θ визирной цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А. И., Моисеенко С. А., Савин М. С. Определение зависимости систематической погрешности измерения расстояний от угла разворота пленочного отражателя. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 3 (17). www.vestnik.vgasu.ru.
2. Назаров И.А. Исследование влияния угла падения лазерного луча и отражающих свойств поверхности на точность измерения расстояний безотражательным электронным тахеометром. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 2 (16). www.vestnik.vgasu.ru.
3. Родиков П. С. Разработка и исследование системы полигонометрических ственных знаков в виде отражателей пленочных. М.: ГУЗ, 2006.
4. Инструкция по полигонометрии и трилатерации, М.: Недра, 1976.

Принята к печати 20 марта 2017 г.