

УДК 528.48

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАШЕН СВЯЗИ**

*канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ; А.А. ШАБЛОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается возможность более качественного и эффективного отслеживания кренов сооружений башенного типа на основе современных измерительных и вычислительных средств. Описан метод определения крена антенных башен радиорелейной и сотовой связи, основанный на использовании электронного тахеометра и применении полученных данных для анализа геометрических параметров инженерного сооружения. Показано преимущество использования современных электронных тахеометров для решения подобных задач. Даются рекомендации по рациональному использованию предложенных методик.*

**Введение.** Башни связи представляют собой специализированные трех- и четырехгранные конструкции из металла, на которых размещается различное оборудование и антенно-фидерные устройства для организации различных видов связи и вещания. В башенных сооружениях, обладающих повышенной чувствительностью к деформациям грунтов основания, крен является одним из важных показателей общей деформации сооружения. К возникновению крена могут привести такие факторы, как изменение гидрогеологии несущих грунтов, тектонические и техногенные процессы и другие.

Для сооружений башенного типа крен – это отклонение вертикальной оси сооружения от отвесной линии. Существенное влияние на величину и направление крена оказывают ветровые нагрузки и односторонний солнечный нагрев, в результате чего верх сооружения совершает амплитудно-частотные колебания [1]. Определение крена башен связи производится в основном геодезическими методами. Для осуществления этих работ можно использовать как обыкновенные оптические приборы, так и электронные тахеометры. Для определения крена башенных сооружений применяют следующие методы [2]: горизонтальных углов и направлений; вертикальных углов и зенитных расстояний; вертикального проектирования; координат; нивелирования осадочных марок.

Применение того или иного метода измерения крена зависит от требуемой точности измерения, конструктивных особенностей фундамента, типа сооружения, его высоты, возможности применения и экономической целесообразности метода в данных условиях.

**Производство измерений.** Методика измерения крена традиционными геодезическими приборами основана в основном на способе проектирования и способе горизонтальных направлений. Для электронных тахеометров эти методы также применимы, однако в современных тахеометрах появляются новые возможности, основанные на автоматизации линейно-угловых измерений и вычислений.

Башни связи представляют собой решетчатые башни, в основном бывают треугольной (трехгранные) и четырехугольной (четырёхгранные) формы. Рассмотрим методику определения крена башен связи треугольной формы (рис. 1) с применением электронного тахеометра.



Рис. 1. Металлическая башня связи треугольного сечения

При проектировании башенных сооружений практически всегда в сечении находится правильная фигура. Фактически, например, из-за неточности изготовления конструкций, деформаций и других факторов мы будем иметь в сечении неправильную фигуру. Так как все расчеты на прочность, устойчивость и воздействие нагрузок всегда относят к оси, проходящей через центры тяжести фигур, полученных в сечениях на различных уровнях, то и все расчеты по определению крена и деформаций ствола башен связи будем относить к этой оси. Тогда для определения координат центра сечения необходимо знать координаты его вершин [3].

В нашем случае за центр тяжести плоской однородной фигуры примем центр треугольника, который получается в точке пересечения его медиан.

Из элементарной геометрии известно, что координаты центра тяжести треугольника равны среднему арифметическому координат его вершин.

Таким образом, координаты центра тяжести треугольника находятся по формулам:

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad y_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}. \quad (1)$$

В случае если несущие элементы башни имеют в сечении окружность (рис. 2, а), для определения координат вершин треугольного сечения предлагаем следующую методику наблюдений:

- приведем тахеометр в рабочее положение, визируем и берем отсчеты по горизонтальному кругу на левую и правую образующие стойки башни в выбранном сечении;
- вычисляем среднее значение, которое устанавливаем на дисплее наводящим винтом горизонтального круга тахеометра;
- измеряем расстояние до точки  $O'$  и, прибавив к нему радиус трубы, определяем координаты центра трубы  $O$  (рис. 2, б).

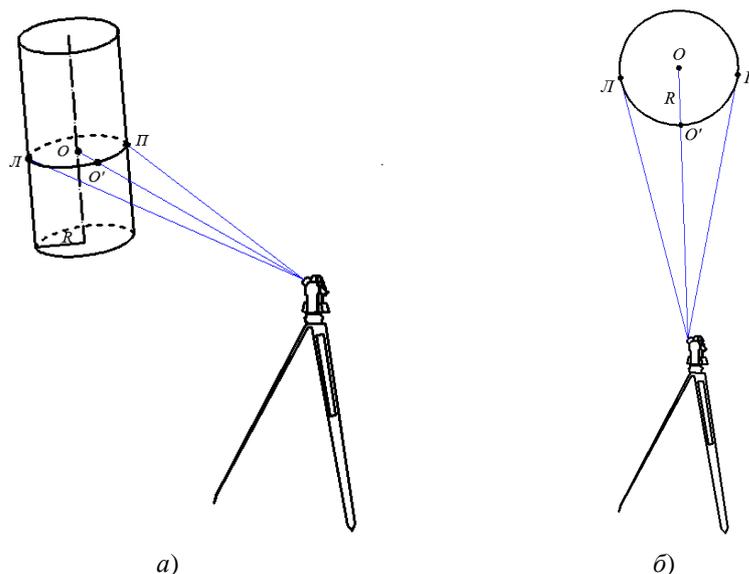


Рис. 2. Схема наблюдения поясов металлической башни

В большинстве тахеометров есть функция «измерение со смещением», используемая для определения местоположения точки, на которой невозможно установить отражатель, либо для определения расстояния и угла на точку, на которую нельзя непосредственно навестись. Положение измеряемой точки (в нашем случае – центра сечения) можно определить, введя горизонтальное проложение между измеряемой и смещенной точками (радиус сечения трубы). После выполнения этих процедур тахеометр будет вычислять и записывать в память координаты центра сечения трубы.

Следует отметить, что для применения этого способа необходимо знать фактические радиусы стойки башни, от точности которых в значительной степени будет зависеть точность получаемых результатов. Фактические радиусы трубы могут быть вычислены путем непосредственных измерений длины окружности трубы на основании общеизвестной формулы:

$$P = 2\pi R.$$

Степень соблюдения вертикальности башенного сооружения определяется положением в пространстве его главной оси. Только совместное определение крена и кривизны может дать полную и достоверную информацию о положении в пространстве главной оси сооружения. Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, наряду с верхней и нижней точками наблюдать также и промежуточные точки главной оси.

Апробация предлагаемой методики наблюдений была выполнена на примере башни связи треугольной формы высотой 40 м (см. рис. 1), опорные элементы которой представляют собой металлические трубы. В качестве промежуточных были выбраны сечения на высотах 10, 20, и 30 метров (рис. 3).

Геодезический контроль отклонения от вертикали оси ствола башни выполнялся с использованием тахеометра Trimble M3. Наблюдения осуществлялись с двух станций (рис. 4).

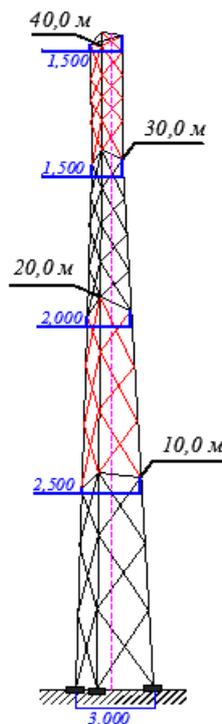


Рис. 3. Схема наблюдаемых сечений треугольной башни

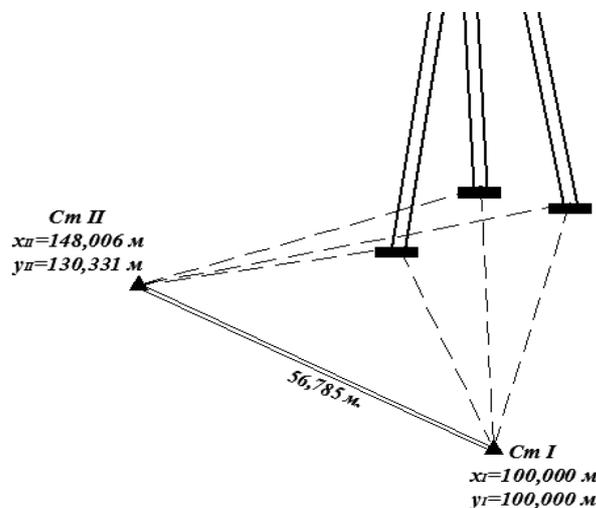


Рис. 4. Схема измерений при проведении работ по определению крена треугольной башни

Радиус стойки  $R$  определен путем измерения длины окружности трубы ( $L = 53,1$  см):

$$R = L/2\pi = 84,5 \text{ мм.}$$

Контролем определения радиуса (диаметра) трубы может служить сравнение полученного значения со значением по ГОСТу или с проектным значением. Так как в данном случае пояса башни выполнены из труб равного радиуса, то на экране «Измерение со смещением» в поле «Режим» указывался постоянный режим («Пост»), то есть значение введенного нами смещения применялось для всех измерений. После завершения установок смещения выполнили измерения на все выбранные точки.

**Обработка результатов измерений.** В результате выполненных измерений были получены координаты вершин сечений башни, определённые с двух станций (табл. 1).

Разности координат одноименных точек  $B$  в таблице 1 вычислены по формулам (2) и (3):

$$d_x = x_I - x_{II}; \quad (2)$$

$$d_y = y_I - y_{II}. \quad (3)$$

Средняя квадратическая ошибка может быть вычислена по формуле Гаусса [4]:

$$m = \sqrt{\frac{[\theta_i^2]}{n}}, \quad (4)$$

где  $\theta_i$  – истинные ошибки результатов измерений;  $n$  – число измерений.

Таблица 1

Координаты вершин треугольных сечений башни, полученных с двух станций

Номера точек	Координаты вершин, определенные с I станции (м)		Координаты вершин, определенные со II станции (м)		Разности, (м)	
	$x_I$	$y_I$	$x_{II}$	$y_{II}$	$d_x$	$d_y$
1	100,083	203,338	100,077	203,343	0,006	-0,005
2	102,921	202,398	102,924	202,396	-0,003	-0,002
3	102,289	205,36	102,287	205,366	0,002	-0,006
4	100,331	203,408	100,329	203,409	0,002	-0,001
5	102,691	202,599	102,695	202,605	-0,004	-0,006
6	102,275	205,061	102,281	205,065	-0,006	-0,004
7	100,61	203,443	100,605	203,449	0,005	-0,006
8	102,498	202,852	102,497	202,849	0,001	0,003
9	102,127	204,744	102,129	204,749	-0,002	-0,003
10	100,888	203,542	100,877	203,535	0,011	0,007
11	102,314	203,064	102,317	203,055	-0,003	0,009
12	102,009	204,533	102,01	204,532	-0,001	0,001
13	100,865	203,582	100,871	203,583	-0,006	-0,001
14	102,317	203,096	102,322	203,098	-0,005	-0,002
15	102,007	204,534	102,015	204,538	-0,008	-0,004

Однако истинные значения величин и истинные ошибки при ограниченном числе измерений обычно не известны, и в практике измерений получают вероятнейшие значения измеренных величин и вероятнейшие ошибки. В связи с этим, как правило, пользуются для получения средней квадратической ошибки формулой Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{[\delta_i^2]}{n-1}}, \quad (5)$$

где  $\delta_i^2$  – вероятнейшие ошибки результатов измерений.

Поэтому среднюю квадратическую ошибку разности координат можно вычислить по формуле

$$m_d = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{n-1}}. \quad (6)$$

Тогда среднюю квадратическую ошибку определения координаты  $m_x$  или  $m_y$ , вычислим из выражения

$$m = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{2(n-1)}}. \quad (7)$$

Получаем, что средние квадратические ошибки разностей координат

$$m_{dx} = \sqrt{\frac{[d_{x_i}^2]}{14}} = 5,0 \text{ мм}; \quad m_{dy} = \sqrt{\frac{[d_{y_i}^2]}{14}} = 4,8 \text{ мм}.$$

Средняя квадратическая ошибка определения координат  $m_x$  и  $m_y$  составила:

$$m_x = \sqrt{\frac{m_d}{\sqrt{2}}} = 3,6 \text{ мм}; \quad m_y = \sqrt{\frac{m_d}{\sqrt{2}}} = 3,4 \text{ мм}.$$

По приведенным выше формулам также возможно выполнить оценку точности для данной задачи путем сравнения длин сторон треугольников, полученных с разных станций, а именно:

$$\delta_i = S_i - S_{in}, \quad (8)$$

где

$$S_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}.$$

В таблице 2 приведены результаты вычислений длин сторон треугольников и их разностей.

Таблица 2

Вычисление длин сторон треугольников и их разностей

№ станции	Параметр, м	1 сечение	2 сечение	3 сечение	4 сечение	5 сечение
I	$S_{12}$	2,990	2,495	1,978	1,504	1,531
	$S_{13}$	2,992	2,552	1,998	1,496	1,487
	$S_{23}$	3,029	2,497	1,928	1,500	1,471
II	$S_{12}$	3,000	2,499	1,985	1,518	1,530
	$S_{13}$	2,996	2,560	2,003	1,509	1,490
	$S_{23}$	3,038	2,495	1,935	1,509	1,472
	$\delta_{12}$	-0,010	-0,004	-0,007	-0,014	0,001
	$\delta_{13}$	-0,004	-0,008	-0,005	-0,013	-0,003
	$\delta_{23}$	-0,009	0,002	-0,007	-0,009	-0,001

По разностям длин сторон треугольников было получено:

$$m_d = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{2(n-1)}} = 5,5 \text{ мм.}$$

Так как проект башни предусматривал в сечении треугольники, то по полученным значениям длин сторон треугольников возможно оценить качество изготовления секций башни и точность их монтажа.

Окончательные значения координат центров сечений башни связи определим как среднее арифметическое с двух станций (табл. 3).

Таблица 3

Нахождение прямоугольных координат точек главной оси башни

Номер сечения	Координаты центров (м)				Координаты центров сечений	
	с I станции		со II станции			
	X	Y	X	Y	X (м)	Y (м)
1 (низ)	101,764	203,699	101,763	203,702	101,764	203,701
2	101,766	203,689	101,768	203,693	101,767	203,691
3	101,745	203,680	101,744	203,682	101,745	203,681
4	101,737	203,713	101,735	203,707	101,736	203,710
5 (верх)	101,730	203,737	101,736	203,740	101,733	203,739

По координатам точек главной оси путем решения обратных геодезических задач определим величину крена  $K$  и его направление.

Определим отклонения  $q_x$  и  $q_y$  и центра  $O_i$  каждого сечения от вертикали (табл. 4) соответственно по осям  $x$  и  $y$ ; вычислим величину общих кренов  $K_i$ . Отклонение оси ствола башни в плане относительно проектной оси допускается не более 0,001 высоты контролируемого сечения над фундаментом [5].

Таблица 4

Определение отклонений и крена башни связи

Номер уровня	H (м)	Координаты центров (м)		$q_x$ , мм	$q_y$ , мм	$Q$ , мм	Допустимое значение, (0,001 H) мм
		X	Y				
1		101,764	203,701	0	0	0	±0
2	10	101,767	203,691	+4	-10	11	±10
3	20	101,745	203,681	-19	-20	28	±20
4	30	101,736	203,710	-28	+9	29	±30
5	40	101,733	203,739	-30	+38	48	±40

По полученным результатам определений отклонений оси ствола от вертикали (см. табл. 4) для наглядности составляются исполнительные схемы вертикальности оси ствола башни (рис. 5).

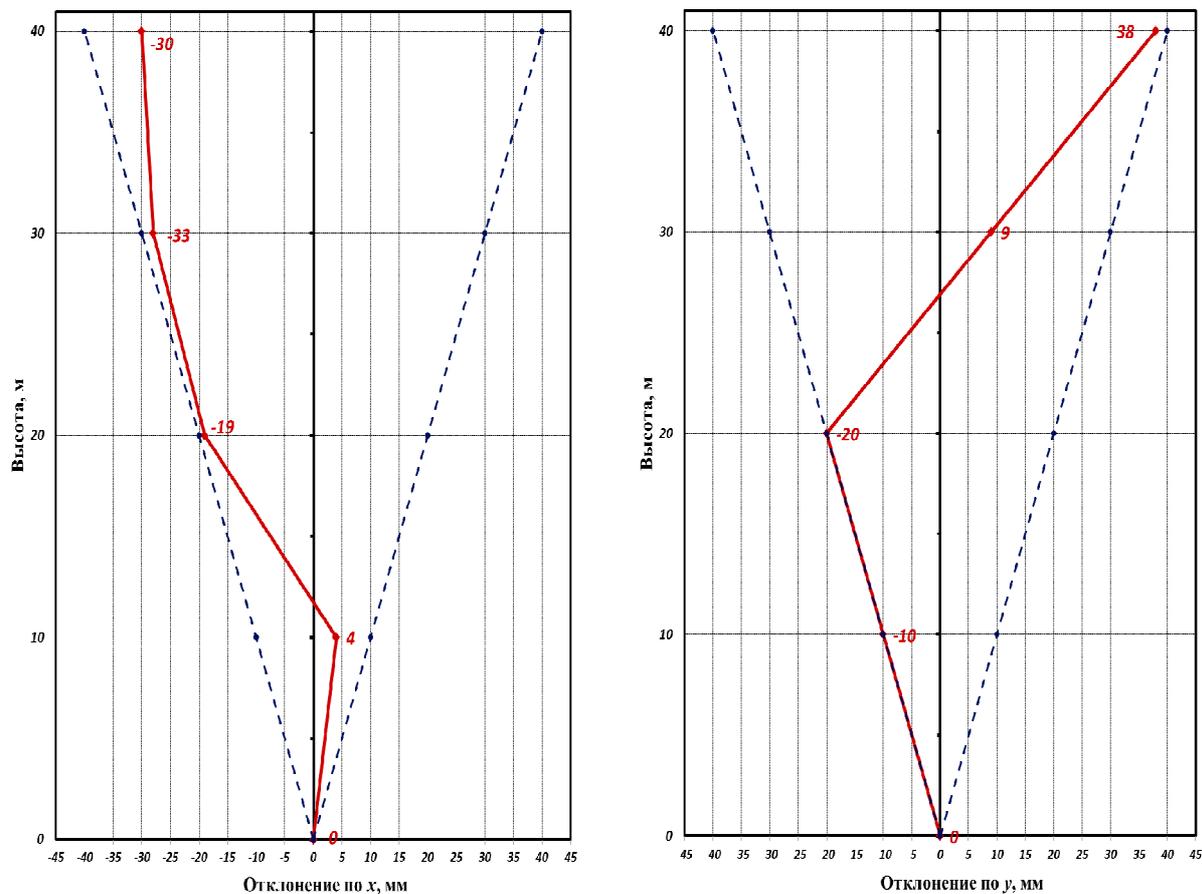


Рис. 5. Схема отклонений оси ствола треугольной башни от вертикали

По результатам геодезического контроля башни связи установлено, что значение общего крена рассматриваемой трёхгранной башни составляет 48 мм, что незначительно превышает предельно допустимое значение ( $\pm 40$  мм) в соответствии с [5] и не препятствует нормальной эксплуатации данной башни.

Кроме определения крена башни связи, по полученной информации возможно произвести вычисление отклонений центров сечений ствола от прямой, то есть деформацию ствола башни.

Данная задача сводится к вычислению расстояния от точки до прямой в пространстве, которую можно решать разными способами.

Из аналитической геометрии известно, что длина перпендикуляра к прямой (расстояние, показанное на рисунке 6) может быть вычислено по формуле:

$$|M_1H_1| = \frac{|\vec{a} \times \overrightarrow{M_3M_1}|}{|\vec{a}|}, \quad (9)$$

где  $\vec{a} = \overrightarrow{M_3M_2} = \{x_2 - x_3; y_2 - y_3; z_2 - z_3\}$  – направляющий вектор прямой (см. рис. 6), проходящей через две точки  $M_3(x_3; y_3; z_3)$  и  $M_2(x_2; y_2; z_2)$ .

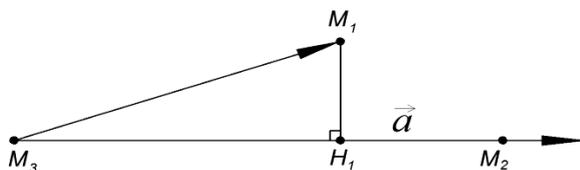


Рис. 6. Определение длины перпендикуляра

В таблице 5 приведены результаты вычислений отклонения оси ствола башни от прямой (изгиб ствола башни).

Таблица 5

Значение изгиба ствола башни

Номер уровня	Н (м)	Отклонение от прямой, мм	Допустимое значение, мм
1		0	40
2	10	22	
3	20	39	
4	30	20	
5	40	0	

Максимальный изгиб ствола башни (отклонение оси башни от прямой, соединяющей центры нижнего и верхнего сечений) составляет 39 мм, что не выходит за пределы допустимого значения, равного  $0,001 H$  [5].

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) предложенная методика позволяет определять крен с необходимой точностью в  $0,0001$  высоты башенного сооружения, то есть 4 мм для башни высотой 40 м;

2) по результатам измерений кроме значения крена можно вычислить по приведенным в данной работе формулам величину изгиба ствола сооружения, а также оценить точность изготовления и монтажа металлических конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Интулов, И.П. Инженерная геодезия в строительном производстве: учеб. пособие для вузов / И.П. Интулов. – Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2004. – 329 с.
2. Шеховцов, Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: моногр. / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 156 с.
3. Желтко, Ч.Н. Измерения геометрии высоких стальных трёхгранных сооружений / Ч.Н. Желтко // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – М., 2010. – № 6. – С. 13–19.
4. Лесных, Н.Б. Теория математической обработки геодезических измерений / Н.Б. Лесных. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 43 с.
5. Стальные конструкции. Правила монтажа = Стальныя канструкцыі. Правілы мантажу: ТКП 45-5.04-41-2006 (02250). – Введ. 01.07.07 (с отменой раздела 4 СНиП 3.03.01-87). – Минск: М-во архит. и стр-ва, 2007. – 40 с.

Поступила 23.03.2015

#### THE DETERMINATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF COMMUNICATION TOWERS

V. YALTYKHOV, A. SHABLOVA

*The article touches upon the issue of more quality and efficient possibility of tower construction bank's tracking on the basis of modern measuring and computing resources. It is spoken about the method of the radio relay and mobile communication antenna tower bank's determination. This method is based on the use of tachymeter and applying analyzing the data obtained for the geometric parameters of the engineering structure. The advantage of using modern electronic transit instrument for solving such problems. In this article is given the recommendations on the rational use of the proposed methods.*