

*Л. И. ИВАНОВА, В. В. СОСНОВЫЙ*

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ СЪЕМКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

При строительстве сложных инженерных сооружений для перекрытий больших пролетов применяются различного типа оболочки с криволинейной поверхностью. Обычно такие конструкции располагаются на значительной высоте, иногда непосредственно под ними устанавливается действующее оборудование, например мостовые краны. Исполнительная съемка ответственных сооружений выполняется периодически на различных этапах строительства.

Геодезические [2] и фотограмметрические [4] методы исполнительной съемки криволинейных поверхностей основаны на использовании четких контурных или маркированных точек, расположенных в местах с заданными проектными координатами. На практике маркировка затруднена и не всегда может отразить характеристики всей поверхности в целом.

Известны геодезические методы съемки элементов пространственных конструкций вертикального и наклонного сечений, основанные на применении пространственной прямой угловой засечки и использовании характерных линий сооружений: кривых, образованных меридиональными сечениями архитектурных оболочек, стыков элементов паркетированных оболочек или швов в монолитных оболочках [1, 3]. Недостатком такого подхода к определению параметров криволинейных поверхностей является предположение, что эти характерные линии представляют собой плоские кривые. В действительности такие кривые могут отклоняться от плоскости. Без учета этого фактора возникают ошибки в определении параметров оболочек.

Цель настоящей работы — теоретические и экспериментальные исследования возможности использования общего случая фотогеодолитной съемки для определения форм и размеров криволинейных поверхностей без их маркирования.

Объектом исследования служит купол реакторного отделения одной из строящихся АЭС, представляющей собой шаровой сегмент радиусом 18 и высотой 6 м. По техническим требованиям исполнительная съемка внутренней поверхности купола выполняется трижды — после сборки его на специальной площадке, монтажа и бетонирования. Контролируемыми параметрами являются радиус образующей, эксцентricность и эллипсоидальность. Ребра купола (швеллеры или сварные швы) четко различимы на фотоснимках, что позволяет использовать их при исполнительной съем-

ке без дополнительной маркировки. Перечисленные параметры купола однозначно определяются значениями отклонений этих ребер от их теоретического расположения по высоте  $\Delta h$  и отклонениями от вертикальной плоскости  $\delta$  в нескольких точках.

Одно из условий возникновения стереоэффекта при наблюдениях пары снимков — пересечение соответствующих лучей под углом, не превышающим  $16^\circ$ . При съемке криволинейных поверхностей, и в частности внутренней поверхности куполов, это условие

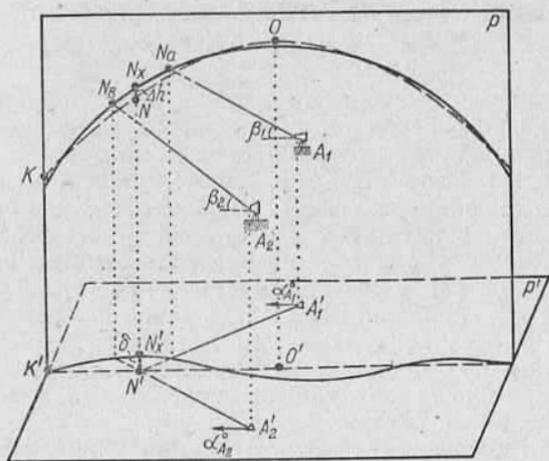


Рис. 1. Ребро купола ОК и его проекция на горизонтальную плоскость  $P'$ .

обычно не выполняется. Поэтому измерения можно производить лишь по одиночным снимкам, на которых изображены одноименные ребра.

На рис. 1 представлены одно из ребер купола  $OK$  и его проекция на горизонтальную плоскость  $P'—O'K'$ . Пунктиром показано теоретическое положение этого ребра и его проекция. Проектные координаты  $X_N$ ;  $Y_N$ ;  $H_N$  ряда точек каждого ребра рассчитываются по теоретическим параметрам оболочки. Положение станций фотографирования  $A_1$ ;  $A_2$  определяется в этой же системе координат.

Сущность метода заключается в измерении на стереокомпараторе по одиночным снимкам аппликат  $z_N$  при наведении марки на ребро купола для расчетов значений абсцисс  $x_N$ , которые вычисляются по известным элементам ориентирования и проектным координатам точки  $N$  по формуле

$$x_N = (\cos \omega \cdot f - \sin \omega \cdot z_N) \cdot \operatorname{tg} (\alpha_{AN} - \alpha_A), \quad (1)$$

где

$$\alpha_{AN} = \operatorname{arctg} \frac{Y_N - Y_A}{X_N - X_A}; \quad (2)$$

$$z_N^{\circ} = \frac{\operatorname{tg} \beta_{AN}^{\circ} \cdot \cos \omega - \cos (\alpha_{AN} - \alpha_A^{\circ}) \cdot \sin \omega \cdot f}{\operatorname{tg} \beta_{AN}^{\circ} \cdot \sin \omega + \cos (\alpha_{AN} - \alpha_A^{\circ}) \cdot \cos \omega}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \beta_{AN}^{\circ} = \frac{H_N - H_A}{S_{AN}}. \quad (4)$$

После измерения каждого ребра по двум снимкам вычисляют отметки точек  $H_{N_x}$  по формулам (5)–(8), при этом участки ребер  $N_A - N_B$  (см. рис. 1) заменяют прямыми линиями:

$$H_{N_x} = \frac{H_1 + H_2 \cdot K}{1 + K}, \quad (5)$$

где  $H_j = H_{A_j} + S_{A_j N} \operatorname{tg} \beta_{A_j N}, \quad (6)$

$$K = \frac{\sin (\alpha_{A_1 N} - \alpha_{OK}) \cdot \operatorname{tg} \beta_{A_2 N}}{\sin (\alpha_{OK} - \alpha_{A_2 N}) \cdot \operatorname{tg} \beta_{A_1 N}}. \quad (7)$$

Здесь значения  $S_{AN}$ ,  $\alpha_{AN}$  определяют путем решения обратной геодезической задачи между точками  $N$  и центрами проекций фототеодолита  $A_1$ ;  $A_2$ , а значения  $\operatorname{tg} \beta_{AN}$  вычисляют по формуле

$$\operatorname{tg} \beta_{AN} = \left( \frac{\sin \omega \cdot f + \cos \omega \cdot z_N}{\cos \omega \cdot f - \sin \omega \cdot z_N} \right) \cos (\alpha_{AN} - \alpha_A^{\circ}). \quad (8)$$

Значения  $\Delta h$  определяют по разностям проектных и фактических отметок по формуле

$$\Delta h = H_x - H_N. \quad (9)$$

Отклонения от вертикальной плоскости  $\delta$  вычисляют по формуле

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2 K^*}{1 - K^*}, \quad (10)$$

где  $\delta_j = \left( \frac{H_{N_x} - H_{A_j}}{\operatorname{tg} \beta_{A_j N}} - S_{A_j N} \right) \cdot \sin (\alpha_{A_j N} - \alpha_{OK}). \quad (11)$

$$K^* = \frac{\sin (\alpha_{A_2 N} - \alpha_{OK})}{\sin (\alpha_{A_1 N} - \alpha_{OK})}. \quad (12)$$

Для решения различных инженерных задач от величин  $\delta$  можно перейти к координатам точек  $N_x$  по формулам:

$$X_{N_x} = X_N + \delta \cdot \sin \alpha_{OK}; \quad (13)$$

$$Y_{N_x} = Y_N - \delta \cdot \cos \alpha_{OK}. \quad (14)$$

Для наклонного снимка расчетные значения  $x_N$  зависят от измеренных величин  $z_N$ . Поэтому при измерениях на стереоком-

параторе необходимо использовать метод приближений, т. е. уточнять  $x_N$  по  $z_N$  по формуле (1). Для этой цели удобно использовать МК БЗ-34, позволяющий выполнять одно приближение за 8 с. Среднее время на измерение и вычисление координат одной точки по программам, составленным по приведенным формулам, 4 мин.

Точность определения  $\Delta h$  зависит от погрешностей координат исходных пунктов  $m_{NA}$ ,  $m_p$ , расстояний до наблюдаемых точек

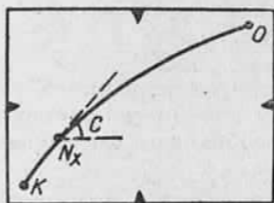


Рис. 2. Изображение ребра купола на фототеодолитном снимке.

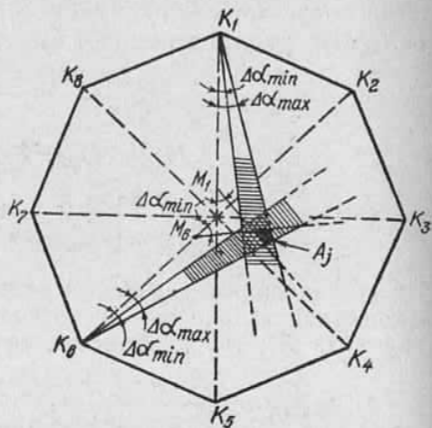


Рис. 3. Определение зоны оптимального расположения фотостанций  $A_j$  по предельным углам  $\Delta\alpha$ .

$S_{AN}$ , превышений наблюдаемых точек над исходными пунктами  $(H_N - H_A)$ , погрешностей измерений координат по фотоснимкам  $m_x$ ,  $m_z$  и различных угловых элементов. Средние квадратические погрешности определения  $\Delta h$  рассчитывают по формуле

$$m_{\Delta h} = \sqrt{\frac{m_{\Delta h_1}^2 + m_{\Delta h_2}^2}{2}}, \quad (15)$$

где

$$m_{\Delta h_j} = \sqrt{m_{H_{A_j}}^2 + \frac{(H_N - H_{A_j})^2 \cdot \cos^4(\alpha_{A_j}^\circ - \alpha_{A_j N}) \operatorname{ctg}^2(\alpha_{A_j N} - \alpha_{OK}) \cdot m_x^2}{f^2} + \frac{S_{A_j N}^2 \cdot T_j^2(C)}{f^2} \cdot m_z^2 + \operatorname{tg}^2 \beta_{A_j N} \cdot m_p^2}. \quad (16)$$

Здесь  $(\alpha_{AN} - \alpha_{OK})$  — угол, составленный направлением из исходного пункта на наблюдаемую точку и проекцией ребра купола на горизонтальную плоскость (см. рис. 1);  $C$  — угол наклона изображенной на снимке грани купола к оси  $XX$  (рис. 2). При  $C \leq 45^\circ$  принимаем коэффициент  $T(C)$  равным единице, а при  $C > 45^\circ$   $T(C) = \operatorname{tg} C$ .

параторе необходимо использовать метод приближений, т. е. уточнять  $x_N$  по  $z_N$  по формуле (1). Для этой цели удобно использовать МК БЗ-34, позволяющий выполнять одно приближение за 8 с. Среднее время на измерение и вычисление координат одной точки по программам, составленным по приведенным формулам, 4 мин.

Точность определения  $\Delta h$  зависит от погрешностей координат исходных пунктов  $m_{H_A}$ ,  $m_p$ , расстояний до наблюдаемых точек

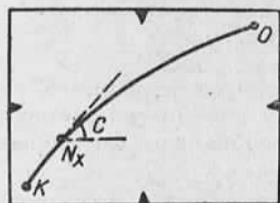


Рис. 2. Изображение ребра купола на фототеодолитном снимке.

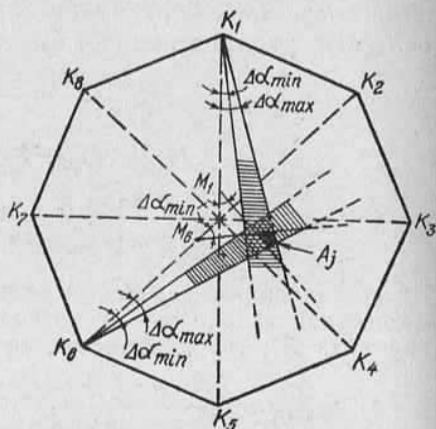


Рис. 3. Определение зоны оптимального расположения фотостанций  $A_j$  по предельным углам  $\Delta\alpha$ .

$S_{AN}$ , превышений наблюдаемых точек над исходными пунктами ( $H_N - H_A$ ), погрешностей измерений координат по фотоснимкам  $m_x$ ,  $m_z$  и различных угловых элементов. Средние квадратические погрешности определения  $\Delta h$  рассчитывают по формуле

$$m_{\Delta h} = \sqrt{\frac{m_{\Delta h_1}^2 + m_{\Delta h_2}^2}{2}}, \quad (15)$$

где

$$m_{\Delta h_j} = \sqrt{m_{H_{A_j}}^2 + \frac{(H_N - H_{A_j})^2 \cdot \cos^4(\alpha_{A_j} - \alpha_{A_j N}) \cdot \operatorname{ctg}^2(\alpha_{A_j N} - \alpha_{OK}) \cdot m_x^2}{f^2} + \operatorname{tg}^2 \beta_{A_j N} \cdot m_p^2 + \frac{S_{A_j N}^2 \cdot T_j^2(C)}{f^2} \cdot m_z^2}. \quad (16)$$

Здесь  $(\alpha_{AN} - \alpha_{OK})$  — угол, составленный направлением из исходного пункта на наблюдаемую точку и проекцией ребра купола на горизонтальную плоскость (см. рис. 1);  $C$  — угол наклона изображенной на снимке грани купола к оси  $XX$  (рис. 2). При  $C \leq 45^\circ$  принимаем коэффициент  $T(C)$  равным единице, а при  $C > 45^\circ$   $T(C) = \operatorname{tg} C$ .

Для экспериментальных исследований предложенного метода выполнена фотосъемка внутренней поверхности купола при наклонном положении камеры УМК 10/1318 с нескольких пунктов, расположенных симметрично центру сооружения. При этом одноименные ребра купола изобразились на четырех снимках, что позволило дважды определить значения  $\Delta h$  и  $\delta$  для каждой точки  $N$ . Оценка точности произведена по разностям двойных измерений для 36 точек одного ребра, расположенных на четырех участках

Теоретические и эмпирические средние квадратические погрешности определения  $\Delta h$  и  $\delta$

Интервал	$m_{\Delta h_{т}}$ , мм	$m_{\delta_{т}}$ , мм	$m_{\Delta h_{э}}$ , мм	$m_{\delta_{э}}$ , мм	Количество точек	$S_{\Delta N}$ среднее, м
1	1,28	1,10	0,77	0,35	6	8,7
2	1,48	1,42	0,98	0,56	13	11,0
3	1,61	1,55	1,20	1,50	11	12,5
4	5,40	3,03	16,1	18,9	6	19,0

с различными характеристиками. В таблице сравниваются эмпирические значения средних квадратических погрешностей  $m_{\Delta h}$  и  $m_{\delta}$  с величинами, рассчитанными по формулам (15) и (18). Для участка № 4 угол  $C = 70^\circ$ .

Для повышения точности определения параметров купола необходимо вводить поправки в фокусное расстояние камеры за неприжим [5], в угловые элементы внешнего ориентирования по измерениям контрольных направлений [7], а также выполнять фотографирование на две и более фотопластины [6].

Из анализа данных экспериментальных исследований следует: разработанный метод позволяет определять параметры криволинейных поверхностей при использовании характерных линий сооружений, расположенных в вертикальных плоскостях с заданной точностью;

незначительный объем полевых работ при использовании данного метода, по сравнению с известными, обеспечивает непрерывность технологических процессов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений;

использование ЭВМ для вычислений позволит оперативно получать информацию о состоянии сооружения.

1. Баран П. И., Нишанбаев Н., Давлатов Ш. Съемка недоступных вертикальных кривых. — Инж. геодезия, 1975, вып. 17, с. 98—106.
2. Войтенко С. П., Колесник И. Н. Методика геодезического обеспечения возведения сооружений из оболочек. — Инж. геодезия, 1978, вып. 21, с. 100—104.
3. Войтенко С. П., Колесник И. Н. Геодезическая съемка элементов пространственных конструкций наклонного сечения. — Инж. геодезия, 1979, вып. 22, с. 75—78.
4. Крумелис В. А., Иванова Л. И., Дерех З. Д. Определение формы вантовых покрытий инженерных сооружений фотограмметрическим методом. — Геодезия и картография, 1979, № 2, с. 48—49.
5. Сердюков В. М. Фотограмметрия в инженерно-

строительном деле. — М.: Недра, 1970. — 136 с. 6. *Сердюков В. М.* Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. — М.: Недра, 1977. — 245 с. 7. *Смирнов Е. И.* Зависимость между координатами точек снимка и корректурными углами, измеренными с концов базиса. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1983, вып. 38, с. 141—144.

Статья поступила в редколлегию 30. 04. 85