

О ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Изучение процесса деформаций высотных сооружений, в том числе уникальных монументов — это изучение сложного взаимодействия таких факторов, как ветровая нагрузка, неравномерный нагрев внешней оболочки фигуры, осадка фундаментов, а также факторов, которые зависят от рассеянной солнечной радиации.

Для изучения и прогнозирования деформаций монумента «Мать-Родина» в 1981—1985 гг. выполнено восемь серий наблюдений марок и реперов, заложенных в период строительства монумента. Осадки и горизонтальные смещения марок определяли путем геометрического нивелирования II класса и прямыми угловыми засечками с пунктов триангуляции 4 класса.

Учитывая уникальность сооружения скульптуры, была составлена программа наблюдений по выяснению характера и причин пространственных перемещений деформационных марок фигуры (рис. 1). Особое внимание уделялось определению движения фигуры и отдельных ее частей в различных условиях. В этой связи наблюдения за венчающей скульптурой производили не периодически во времени, а в зависимости от тех или иных метеорологических условий. Задача состояла в том, чтобы разделить на составляющие влияния различных факторов на движение марок, расположенных на скульптуре.

Наблюдения, выявляющие величину и характер деформаций, возникающих в результате неравномерного нагрева солнечными лучами внешней оболочки скульптуры, производили в тихую солнечную погоду. Влияние ветровых нагрузок фиксировали в пасмурные ветреные дни.

С целью определения положения фигуры при минимальном воздействии на нее внешних факторов наблюдения производили в пасмурные безветренные дни.

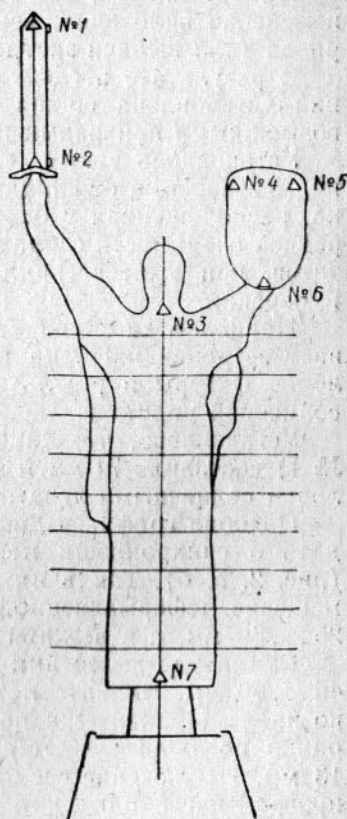


Рис. 1. Схема расположения деформационных марок на скульптуре.

Предложенная методика наблюдений значительно упростила обработку результатов наблюдений и повысила надежность информации.

Положение деформационных марок на фигуре определяли прямой засечкой с двух пунктов триангуляции 4 класса, расположенных на расстоянии 120 м от центра фигуры. Измерение горизонтальных направлений производили двумя теодолитами 2Т2 при соблюдении строгой синхронности взаимного ориентирования и наведения на одноименные марки. Для определения высот деформационных марок измеряли зенитные расстояния.

Наблюдения вели по программе триангуляции 4 класса шестью круговыми приемами. Предварительные вычисления координат высот и марок производили на микрокалькуляторе БЗ-21. Окончательный расчет координат марок и их высоты производили на ЭВМ ЕС-1033.

На протяжении всего периода наблюдений контролировали изменение положения всех марок относительно начального периода (для выдачи экстренной информации).

В результате последующей обработки материалов наблюдений установлена общая зависимость между деформациями и возможными причинами их возникновения.

Установлено также, что наибольшим постоянством положения, независимо от влияния внешних факторов, отличается марка, расположенная у основания фигуры. По результатам внутренней сходимости сделана оценка точности полученных результатов, при этом возникла необходимость отбора равноточных измерений.

Наиболее заметное влияние на положение фигуры оказывает ветровая нагрузка и неравномерный нагрев внешней оболочки фигуры в результате воздействия прямой и рассеянной солнечной радиации.

Установлено, что наибольшее перемещение фигуры (марка № 1) составило 71 мм и вызвано неравномерным нагревом оболочки солнечными лучами.

Подобие графиков движения марок на фигуре позволяет судить о синхронности перемещения различных частей фигуры (рис. 2, а, б). Так, в нижней части фигуры наблюдается перемещение деформационной марки на 10...11 мм, в средней — 25...30 мм, а в верхней — 70...71 мм (вершина меча).

Амплитуда колебания марки по всей ее плоскости достигает 40...60 мм. Влияние ветровой нагрузки проявляется несколько иначе. Практически по всей высоте фигуры амплитуда колебания различных частей фигуры находится в пределах 10...13 мм. Исключение составляет вершина меча. Дополнительной программой наблюдения установлено, что под действием ветровой нагрузки амплитуда колебания меча достигала 60...62 мм. Если во всех частях фигуры уход марок наблюдается по направлению ветра на 10...13 мм, то вершина меча с одновременным перемещением в этом же направлении на 20...

22 мм совершала колебательные движения перпендикулярно направлению ветра с частотой $1 \dots 0,5$ Гц.

Средняя квадратическая погрешность определения координат марок составляла в нижней части фигуры ± 6 мм, на мече ± 25 мм, с учетом ошибок исходных данных соответственно ± 10 и ± 26 мм.

Для исследования закономерности процесса деформаций монумента «Мать-Родина» в Киеве вычислены и построены графики движения деформационных марок из обработки результатов повторных геодезических измерений в течение дня (рис. 2, а, б). При выявлении закономерностей процесса деформаций

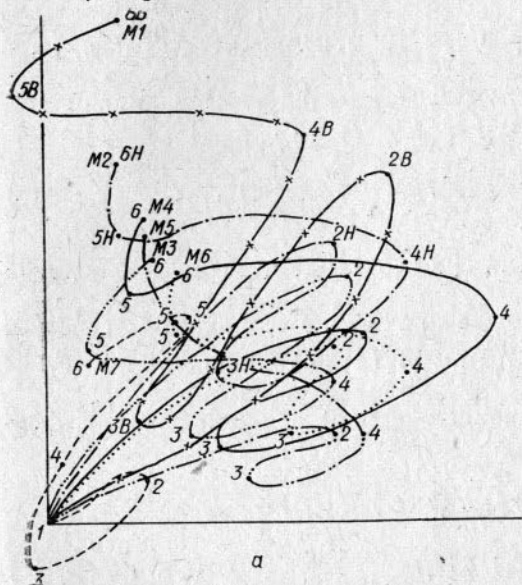
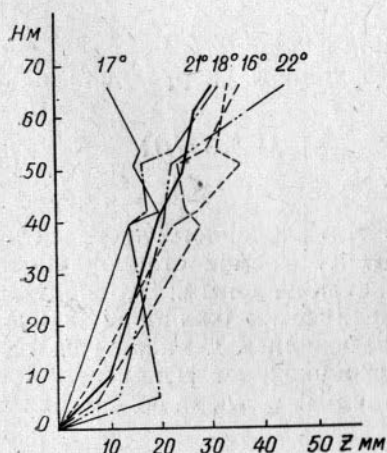
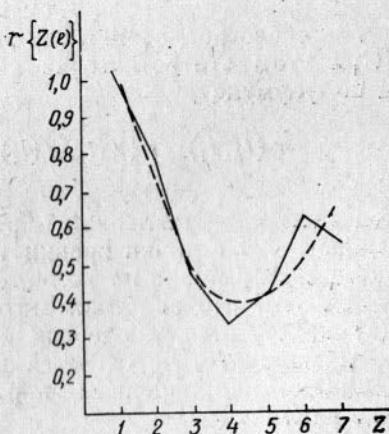


Рис. 2. График движения деформационных марок (7 марок) по шести сериям наблюдений (а), по высоте скульптуры от изменения температуры (б); график нормированной корреляционной функции (в).



б



в

от динамических нагрузок использована теория случайных стационарных процессов*. Исследования деформации внешней оболочки скульптуры монумента показали, что указанными свойствами стационарных случайных функций обладают горизонтальные перемещения отдельных марок за время t , полученные в результате повторных геодезических наблюдений. Перемещение одной марки по отношению к другой, расположенных на скульптуре, носит случайный характер, и поэтому накопление взаимных смещений марок при нагреве оболочки и действии ветра, полученных из двух последующих геодезических наблюдений, можно представить как реализацию случайной функции $x(t)$. Находим семь сечений, интервал между смежными сечениями l принимаем равным 10 м по высоте скульптуры и 1° для температуры.

Далее находим зависимость математического ожидания горизонтального смещения марок z от H и t° .

$$\bar{\mu} \{z(t_k^0)\} = \bar{z}(t_k^0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i(t_k^0)^*, \quad (1)$$

где n — число реализаций (число геодезических наблюдений $n=6$).

По (1) вычислены следующие значения для принятых сечений:

$$m_z(t) = 13,1 \dots 23,7 \text{ мм}, \quad m_H(z) = 10,3 \dots 30,5 \text{ мм}.$$

Статистические корреляционные функции вычислены по формуле

$$\begin{aligned} \tilde{k}(t_k, t_l) &= \tilde{k}\{z(t_k), z(t_l)\} = \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n z_i(t_k); z(t_l) - \frac{n}{n-1} \bar{z}(t_k) z(t_l), \end{aligned} \quad (2)$$

где n — число реализаций случайной функции.

При этом статистические коэффициенты корреляции находим по формуле

$$\bar{r}(t_k, t_l) = r\{z(t_k), z(t_l)\} = \frac{k\{z(t_k), z(t_l)\}}{\sigma(t_k), \sigma(t_l)}. \quad (3)$$

Результаты представленной обработки случайного процесса показывают, что с точки зрения предполагаемой стационарности процесс деформаций не является стационарным. Это подтверждается тем, что значения математических ожиданий $m_z(t)$ и $\tilde{m}_H(z)$ колеблются, дисперсия с изменением температуры t° и высоты марок H_m не остается постоянной, коэффициенты корреляции по направлениям, параллельным главной диагонали, также изменяются.

* Вентель Е. С. Теория вероятностей. М., 1969.

Однако, принимая во внимание сравнительно небольшое число реализаций ($n=6$) и в связи с этим большое количество случайностей в статистических характеристиках, эти отступления от стационарности можно считать незначительными, так как они не имеют закономерного характера. Поэтому приближенное представление процесса горизонтальных смещений марок, а следовательно, и скульптуры, как стационарного, можно считать достаточно правдоподобным.

Такой процесс может характеризоваться усредненными значениями математического ожидания $m_z(t) = 21,4$ мм, $m_H(z) = 19,8$ мм дисперсии $\sigma_t^2 = 63,8$, $\sigma_H^2 = 52,6$; среднего квадратического отклонения $\sigma(z_t) = 7,8$ и $\sigma(z_H) = 6,7$. При стационарном случайном процессе корреляционная функция и коэффициенты корреляции зависят только от $t^0 = t_k^0 - t_i^0$ и $H = H_0 - H_i$.

Для одного и того же значения t^0 и H_m они должны быть постоянными. Такому постоянному значению t^0 и H_m соответствует главная диагональ таблицы коэффициентов корреляции и направление, параллельные ей. Средние значения нормированной корреляционной функции для приведенных сечений составили:

$$r\{z(t)\} = 0,43 \dots 0,88, \quad r\{H(t)\} = 0,34 \dots 0,79.$$

По результатам вычислений составлен график функций (рис. 2, в), из которого видно, что от наличия некоторых z меняются значения корреляционной функции $r\{z(e)\}$. Это указывает на то, что в структуре случайной функции существует некоторый элемент периодичности. На расстоянии по высоте, равном примерно $1/2 H$ и температуре $20 \dots 21^\circ$, имеет место резкий перегиб графика, что указывает на колебание функции $r\{z(t)\}$ для больших значений.

Амплитуда колебаний марок (горизонтальных смещений) возрастает с увеличением их высоты на скульптуре и увеличении перепада температуры нагрева оболочки.

Так как при больших значениях z точки графика получены осреднением небольшого числа данных, то, очевидно, они недостаточно надежны. В этом случае имеет смысл сгладить корреляционную функцию, как показано пунктирной линией на рис. 2, в.

Статья поступила в редколлегию 16. 12. 86