

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СООРУЖЕНИЙ АЭС

При исследовании динамики осадок фундаментов сооружений АЭС первостепенное значение, кроме регулярных измерений, приобретает их теоретическое прогнозирование. Поскольку на величину осадок влияет множество разнообразных факторов, учесть их при математическом моделировании практически невозможно. Даже учет нескольких факторов приводит к системе дифференциальных уравнений в частных производных, реализация которой представляет собой достаточно сложную математическую задачу.

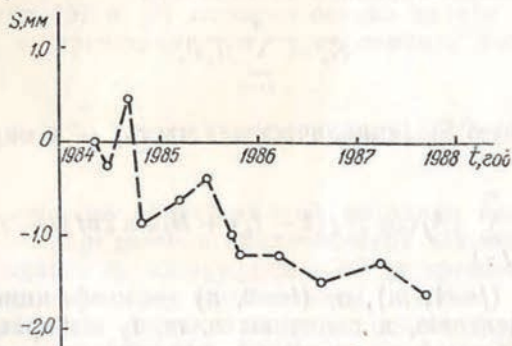


График средних осадок сооружения АЭС.

В то же время эксплуатация сооружений АЭС требует постоянного (хотя и приближенного) прогноза величин осадок фундаментов. Очевидно, прогноз должен базироваться на достаточно простом алгоритме, который не требует применения ЭВМ.

Один из путей реализации этой проблемы заключается в следующем. На основании имеющихся измерений за четыре года (1984—1987 гг., всего 12 циклов измерений) можно вывести закон изменения величин осадок фундаментов зданий, который в дальнейшем можно использовать в качестве недолговременного прогноза. Увеличение количества измерений (циклов) по-

зволит более точно интерполировать осадки в прошлом и более надежно прогнозировать их в будущем (см. рисунок).

В настоящее время регулярные геодезические измерения в зоне АЭС проводятся с ошибкой около 0,3 мм [10]. Это обуславливает требования к точности теоретического метода определения осадок сооружений.

Анализ данных измерений дает основание при выводе функциональной зависимости величины осадки фундамента S от времени t исходить из следующих соображений.

1. Часть величины S составляет осадка фундамента $S_{\text{в}}$, вызванная массой всего здания.

2. Остальная часть $S_{\text{ц}} = S - S_{\text{в}}$ зависит от циклических факторов, которые из года в год имеют тенденцию повторяться.

Поскольку в процессе интерполяции учтены только эти два основных фактора, то при использовании экспериментальных данных измерений осадок речь идет только о средних значениях этих величин для каждого фундамента.

Выполним исследования по аппроксимации осадок сооружений объектов АЭС полиномиальными и тригонометрическими зависимостями. В отдельности этими вопросами занимались многие исследователи [1—5, 7—10], однако в такой постановке задачи исследования проводились впервые.

Представим составляющую $S_{\text{в}}$ («стержневую» часть) в виде временной полиномиальной зависимости

$$S_{\text{в}} = \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad (1)$$

а составляющую $S_{\text{ц}}$ («циклическую» часть) — в виде конечного ряда Фурье

$$S_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^m [A_j \cos 2\pi j(t - t_0) + B_j \sin 2\pi j(t - t_0)]. \quad (2)$$

Здесь A_j, B_j ($j = \overline{1, m}$), a_i ($i = \overline{0, n}$) — коэффициенты, подлежащие определению, а величины n, m, t_0 выбираем в зависимости от требуемой точности интерполяционных формул (1), (2) и значений осадок, полученных экспериментальным путем; $2m < l, n < l$, где l — количество циклов измерений.

Коэффициенты A_j, B_j ($j = \overline{1, m}$) и a_i ($i = \overline{0, n}$) определяем следующим образом.

1. Вначале методом наименьших квадратов (МНК) [6] находим коэффициенты a_i . При этом разрешающая система имеет вид

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} \sum_{k=1}^l t_k^{n+j-i} = \sum_{k=1}^l t_k^j S_k \quad (j = \overline{0, n}), \quad (3)$$

где S_k ($k = \overline{1, l}$) — значения осадок фундамента в момент времени t_k , полученные экспериментальным путем.

2. После нахождения «стержневой» кривой (1) определяем коэффициенты A_j, B_j ($j=\overline{1, m}$). Разрешающая система имеет вид

$$\sum_{j=1}^m A_j \cos 2\pi j (t_k - t_0) + \sum_{j=1}^m B_j \sin 2\pi j (t_k - t_0) = S_k - S_B^{(k)} \quad (4)$$

$$(k = \overline{1, l}),$$

где $S_B^{(k)}$ — значение осадок, полученных по формуле (1).

Систему (4) в виду ее несовместимости ($2m < l$) решаем методом наименьших квадратов. В конечном итоге получим следующую систему:

$$\sum_{j=1}^{2m} C_j \sum_{k=1}^l \bar{A}_{ik} \bar{A}_{jk} = \sum_{k=1}^l \bar{A}_{kl} b_k, \quad (i = \overline{1, 2m}). \quad (5)$$

Здесь

$$c_j = A_j (j = \overline{1, m}), c_j = B_{j-m} (j = \overline{m+1, 2m});$$

$$\bar{A}_{ik} = \cos 2\pi i (t_k - t_0) \quad (i = \overline{1, m}; k = \overline{1, l});$$

$$\bar{A}_{jk} = \sin 2\pi (j - m) (t_k - t_0) \quad (j = \overline{m+1, 2m}; k = \overline{1, l});$$

$$B_k = S_k - S_B^{(k)} \quad (k = \overline{1, l}).$$

После решения (3) и (5) искомая осадка здания S , как функция времени t , представляется суперпозицией выражений (1) и (2):

$$S(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i + \sum_{j=1}^m [A_j \cos 2\pi j (t - t_0) + B_j \sin 2\pi j (t - t_0)]. \quad (6)$$

Для иллюстрации разработанной методики более подробно остановимся на определении аналитической зависимости осадок фундамента одного из сооружений АЭС от времени. Указанное сооружение находится под наблюдением с 1984 г.

Ниже приведены значения средних осадок фундамента одного из сооружений АЭС ($t_0=1984$):

t_k , год	0,35	0,42	0,69	0,79	1,21	1,42	1,71	1,85	2,27	2,75	3,30	3,80
S_k , мм	0	-0,35	+0,5	-0,9	-0,6	-0,3	-1,0	-1,2	-1,2	-1,5	-1,3	-1,6

Для облегчения выбора «стержневой» кривой, а также определения качества гармоник и фазы (числа n, m, t_0) построим график (см. рисунок), анализ которого показывает, что «стержневую» кривую можно записать в виде

$$S_B = a_0 + a_1 (t - 1984), \quad (7)$$

а «циклическую» часть представить следующим образом:

$$S_u = A_1 \cos 2\pi (t - 1984) + B_1 \sin 2\pi (t - 1984). \quad (8)$$

Системы (4) и (5) в рассматриваемом случае принимают вид

$$\begin{aligned} 12 a_0 + 20,26 a_1 &= -9,4; & 2,78 A_1 - 1,93 B_1 &= -0,74; \\ 20,56 a_0 + 49,26 a_1 &= -23,48; & -1,93 A_1 + 9,24 B_1 &= 0,72. \end{aligned} \quad (9)$$

Решив их, находим $a_0 = 0,12$; $a_1 = -0,53$;
 $A_1 = -0,25$; $B_1 = 0,03$.

Таким образом, зависимость осадки фундамента сооружения от времени имеет вид

$$S(t) = -0,53(t - 1984) + 0,12 - 0,25 \cos 2\pi(t - 1984) + 0,03 \sin 2\pi(t - 1984). \quad (10)$$

Оценка кривой аппроксимации (10) по результатам осадок составляет 0,3 мм, что показывает вполне удовлетворительную согласованность (в пределах точности измерений) теоретических расчетов с экспериментальными, кроме «всплеска» в районе $t_k = 0,69$, наличие которого трудно объяснить.

Далее на основании зависимости (10) прогнозируем среднюю осадку фундамента сооружения на 1988 г. и сравниваем теоретические расчеты с имеющимися экспериментальными измерениями. На период $t_k = 4,28$ $S_{\text{теор.}} = -2,06$ мм и $S_{\text{экс.}} = -1,90$ мм; на $t_k = 4,88$ $S_{\text{теор.}} = -2,31$ мм и $S_{\text{экс.}} = -2,12$ мм.

Отсюда видно, что результаты прогнозирования удовлетворительно согласуются с результатами измерений в пределах точности измерений.

В результате исследований приходим к выводу, что настоящая методика прогноза средних осадок фундаментов сооружений вполне приемлема и мы рекомендуем ее для прогнозирования осадок крупных сооружений. Она опробована на многих контролируемых объектах атомной станции.

Следует отметить, что прогноз осадок сооружений по изложенной методике репрезентативный только в том случае, когда на весь период сохранены такие же условия (геологические, климатические, техногенного характера), как и в период наблюдений, по которым составлялась модель осадки сооружения.

1. Гридчин А. Н. Выбор оптимального метода подбора уравнений осадок при их прогнозировании // Методы инженерной геодезии в ирригационном и гидротехническом строительстве. Ростов/н-Дону, 1973. С. 11—16.
2. Гридчин А. Н. Исследование осадок инженерных сооружений методом случайных функций // Тр. НИИГАНК. 1967. Т. 20. С. 45—57.
3. Гридчин А. Н. Прогнозирование затухающих осадок инженерных сооружений по результатам геодезических наблюдений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1970. Вып. 1. С. 3—10.
4. Гуляев Ю. П. О точности математического описания процесса деформации основания фундамента // Геодезия и картография. 1975. № 10. С. 27—33.
5. Дзулит П. Д., Яосипчук Н. Д. Прогнозирование вертикальных смещений инженерных сооружений методами равномерной аппроксимации // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. Вып. 45. С. 17—19.
6. Кальницкий Л. А. Специальный курс высшей математики для вузов. М., 1976.
7. Кулешов Д. А., Гуляев Ю. П. Некоторые задачи и методологические принципы статистического моделирования деформаций оснований сооружений по геодезическим данным // Изв. вузов. Геодезия и аэро-

фотосъемка. 1976. Вып. 4. С. 3—13. 8. *Николаев С. А.* Статистические исследования осадок инженерных сооружений. М., 1983. 9. *Пилягин А. В.* Опыт определения осадок фундаментов по данным краткосрочных геодезических наблюдений // Геодезия и картография. 1973. № 11. С. 28—31. 10. *Писовский П. И., Романчук С. В.* Методика наблюдений за деформациями сооружений // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. Вып. 45. С. 82—85.

Статья поступила в редколлегию 29.04.89