

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ АРМЯНСКОЙ АЭС НА МОДЕЛЯХ

В настоящее время проектируются и строятся в сейсмических районах атомные электростанции, к сооружениям которых предъявляются весьма жесткие критерии расчета на сейсмостойкость, ввиду отсутствия практических данных о поведении конструкции и оборудования при сейсмических нагрузках. Между тем, крайне целесообразно накопление фактического материала по исследованиям сейсмостойкости АЭС в целях дальнейшего усовершенствования их проектирования.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований модели главного корпуса (аппаратное отделение) Армянской атомной электростанции на сейсмические воздействия, на основу которых легла теория расширенного подобия твердых деформируемых тел, разработанная А. Г. Назаровым [1].

В строительном комплексе АЭС наиболее ответственным объектом является главный корпус, поэтому к нему предъявляются повышенные требования и применяются конструктивные мероприятия по увеличению сейсмостойкости.

В целом главный корпус представляет сложную пространственную конструкцию. Это массивный железобетонный короб, динамический расчет которого встречает значительные трудности.

Обеспечение условий подобия для моделирования железобетонных конструкций связано с определенными трудностями при подборе модельного материала. Для железобетона, состоящего из различного рода материалов (арматура, бетон), обеспечение коэффициентов β и γ довольно затруднительно. Следовательно, наиболее целесообразно моделирование произвести с помощью расширенного подобия, так как в этом случае появляется возможность принятия ускорений оригинала и модели одинаковыми.

Приводим методику подбора множителей подобия модельного материала на основе теории подобия твердых деформируемых тел. На основании [2, 3] моделирование железобетонных конструкций производится с помощью следующих зависимостей:

$$\alpha = l'/l = \sqrt{F'_a/F_a}; \quad \beta = R'_{np}/R_{np} = R'_a/R_a = R'_p/R_p; *$$

$$\gamma = mC_0/C_0 = E_0R'_p m/E_0R_{np} = E_aR'_a/E_aR_a; \quad \beta/\gamma = E'_0/mE_0 = E'_aE_a;$$

$$m = \frac{1 - 0,5(\sigma/R_{np})(\lambda'_p + \lambda_p)}{1 - \lambda'_p(\sigma/R_{np})}.$$

Здесь R' и R — напряжения, E' и E — модули деформаций, C' и C — относительный модуль упругости, λ'_p и λ_p — коэффициенты пластичности в момент разрушения, m — коэффициент, учитывающий различие пластических свойств материалов оригинала и модели.

В качестве материала модели взят обычный тяжелый бетон на естественных мелкозернистых заполнителях. Механические характеристики оригинала и модели, а также множители подобия основных величин приведены в табл. 1.

* Здесь и в дальнейшем буквенные обозначения со штрихом относятся к модели.

Выбор масштаба модели—множителя подобия линейных размеров α , произведен исходя из соображений рационального размещения конструкции модели на виброплатформе с учетом габаритов самой платформы и лабораторного помещения, а также возможности использования в модели низкопрочных алюминиевых стержней. При этом наиболее удобным является масштаб $\alpha = \frac{1}{20} = 0,05$, который моделирует

основные несущие конструкции оригинала. Такой масштаб удобен еще и тем, что создаются лучшие условия для проведения эксперимента: облегчается осуществление и возведение конструктивных элементов модели, а также установка регистрирующей аппаратуры в ее характерных точках.

Модель Армянской АЭС возводилась в несколько этапов, чтобы возможно близко подойти к условиям возведения оригинала. Модель строительных конструкций главного корпуса Армянской АЭС построена в масштабе $\alpha = \frac{1}{20}$ на мелкозернистом бетоне марки 25, а стальная

арматура заменена алюминиевой. На рис. 1 изображен общий вид модели. Размеры модели в плане—330×210 см, высота фундамента—45 см, высота аппаратного отделения—65 см, общая высота модели—210 см, толщина стен коробки—10 см, толщина стен оболочки ГЦН—4 см, толщина стен шахты—12 см, общий вес модели—13,6 т.

Модель была подвергнута статическим и динамическим нагружениям. Статические испытания проводились в два этапа. Первый—при прогибе модели горизонтальной силой, которая прикладывалась ступенями. Максимальная нагрузка в большинстве опытов доводилась до 0,5 разрушающей. Второй этап испытаний заключался в возбуждении собственных затухающих колебаний модели путем мгновенного снятия горизонтальной нагрузки, приложенной к ее верхнему свободному концу при нижнем защемленном. По результатам этих испытаний определяли частоту собственных колебаний модели, декремент затухания, коэффициент внутреннего сопротивления, которые соответственно имеют следующие значения $T=0,022$ сек, $\delta=0,202$, $\eta=0,065$.

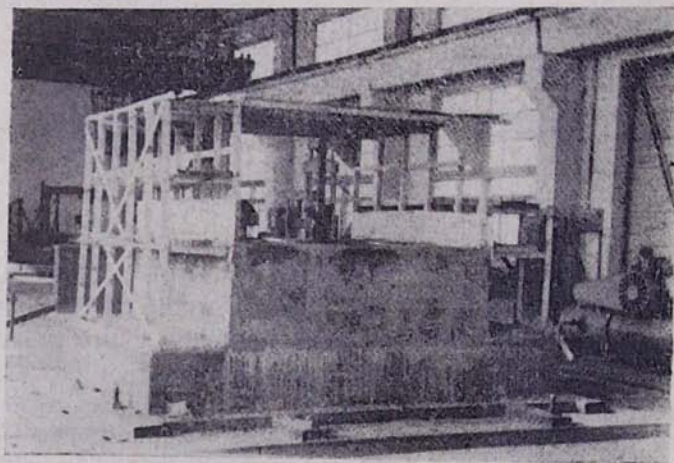


Рис. 1. Общий вид модели Армянской АЭС, установленной на виброплатформу

Таблица 1

Величина	Единица измерения	Оригинал		Модель		Коэффициент подобия		Среднее значение коэффициента подобия
		бетон	арматура	бетон	арматура	по бетону	по арматуре	
Предел прочности, текучести	кгс/см ²	210	3400	18	270	$\beta_b=0,086$	$\beta_a=0,79$	$\beta=0,082$
Модуль упругости	кгс/см ²	315000	$2,1 \cdot 10^6$	52000	$450 \cdot 10^3$	$\frac{\beta_b}{\gamma_b}=0,17$	$\frac{\beta_a}{\gamma_a}=0,21$	$\frac{\beta}{\gamma}=0,192$
Относительный модуль упругости	—	1500	—	2600	—	$\gamma_b=0,58$	—	$\gamma=0,44$
Относительная деформация	—	$185 \cdot 10^{-5}$	$16,2 \cdot 10^{-5}$	$80 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$\gamma_b=0,43$	$\gamma_a=0,37$	$\gamma=0,44$
Коэффициент пластичности бетона при разрушении	—	0,64	—	0,63	—	$m=1$	—	$m=1$

Динамические испытания модели проводили на сейсмической виброплатформе ВП-100, колебания платформы имели частоты от 5 до 40 гц и амплитуды от 0,04 до 3 мм. Испытание модели производили в направлении ее продольной оси при режимах движения виброплатформы на вынужденные гармонические колебания. Частота собственных колебаний виброплатформы—20 гц. Величины амплитуд колебательного движения платформы постепенно увеличивались в зависимости от производительности самой виброплатформы.

Параметры колебательного движения модели измеряли приборами ВБП-3, установленными на различных по высоте уровнях в элементах конструкции. Схема расстановки приборов показана на рис. 2. Кроме того, с целью дублировки приборов и оценки надежности результатов были установлены также датчики перемещений. С помощью этих приборов записывали смещения. Для измерения деформаций на элементах конструкции модели наклеивали тензодатчики деформаций сопротивления. Колебания модели регистрировали электродистанционной аппаратурой.

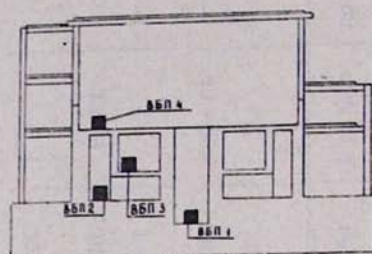


Рис. 2. Схема расстановки приборов ВБП-3 на модели

Основным параметром, характеризующим динамическую нагрузку, в наших опытах является величина ускорения возмущающих и вынужденных колебаний. Колебания платформы и модели без ущерба для точности можно принять за гармонические, то есть максимальные ускорения будут иметь вид:

$$W_{\max} = -A4\pi^2 f^2.$$

Значения инерционных сил, измеренные в уровнях модели в зависимости от рассматриваемых расчетных схем, вычислялись по формуле:

$$S_i = \frac{Q_i}{g} Y_i''(t),$$

где

Q_i —вес массы, сосредоточенной в уровне перекрытий;

$Y_i''(t)$ —величина ускорения точки.

Ускорение точек на уровне перекрытий вычислялось по формуле:

$$Y'' = A \cdot p^2,$$

где

A —амплитуда смещения точки на уровне перекрытий согласно показаниям вибродатчиков;

p —круговая частота колебаний модели,

В табл. 2 приведены значения величин ускорения точек модели от высоты для всего рассматриваемого диапазона частот от 5 до 40 гц.

Вычислим сейсмические силы, действующие на уровнях перекрытий, рассматривая схему сооружения модели как систему с тремя степенями свободы, для максимальных значений ускорений, соответствующих частоте 20 гц.

Таблица 2
Значение ускорений в различных точках по высоте модели

Частота, гц	Ускорение, мм/сек ²			Ускорение, мм/сек ²			Ускорение, мм/сек ²			Ускорение, мм/сек ²		
	ВБП № 1 (в %)			ВБП № 2 (в %)			ВБП № 3 (в %)			ВБП № 4 (в %)		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
5	794	1310	3865	733	1666	5206	1039	1117	3424	1223	1794	4170
10	3191	5238	9860	2721	4812	8381	2733	4417	8874	2504	4141	8381
15		12459			8253	13133		10383	10382		9406	13151
20	15019	25084	35811	19430	23822		7760	22244	31063	11485	15618	25084
25	6113	14790	39933	7495	11585		5916	10698	31059	4141	9614	18488
30	781	8485	9938	390	1810	5446	259	958	37270	1526	3656	7454
35	823	483	1739	821	676	1159	386	531	579	1353	1835	3478
40	757	1010	1149	430	820	568	567	568	442	631	1514	2272

Опытные значения сейсмических сил, а также значения, вычисленные по СНиП, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Этажи (уровни)	Максимальное ускорение на уровнях в долях g	Сейсмические силы, т	
		по СНиП П-А 12-69	эксперимент
Первый уровень	1,6	0,164	0,74
Второй уровень	3,67	0,219	0,99
Третий уровень	2,56	1,916	4,7

Из сопоставления этих величин обнаруживается, что фактические значения сейсмических сил, действующих на модель сооружения, в 4—6 раз превышают значения сейсмических сил, подсчитанных по СНиП. Это обнаруживается и при испытании модели, так как при доведении сейсмической нагрузки в основании модели до 2g с помощью виброплатформы, в элементах конструкции никаких повреждений не наблюдалось.

Коэффициент динамичности для рассматриваемого диапазона частот от виброплатформы от 5 до 40 гц лежит в пределах от 0,264 до 2,136, при среднем значении 1,2.

Экспериментально полученный материал при испытании модели позволяет сделать следующие выводы:

1. Конструкция модели главного корпуса Армянской АЭС, рассчитанная по СНиП П-А. 12—69 на 9 баллов, перенесла колебания на виброплатформе интенсивностью в 9 баллов без каких-либо повреждений.

2. Экспериментальные значения частот свободных колебаний модели близки к расчетным, полученным с учетом сдвига и поворота массива на податливом основании.

3. Проведенные исследования дают основание утверждать, что, являясь достаточно жесткой конструкцией, модель сооружения главного корпуса Армянской АЭС при горизонтальных колебаниях в основном перемещалась, не деформируясь, как единое целое.

ИГИС АН Армянской ССР
Армянский филиал ВНИИАЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Изд. АН АрмССР, 1965.
2. Мнацаканян В. Л. Экспериментальные исследования работы железобетонных балок на моделях. Сб. докладов Моделирование строительных конструкций на сейсмические воздействия. Изд. АН АрмССР, 1968.
3. Шагинян С. А. Исследование деформационных свойств строительных материалов для целей моделирования. ДАН АрмССР, XLII, № 2, 1966.