

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС В РАМКАХ ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Суюмбаев Х.У.<sup>1</sup>, Ногеров И.А.<sup>1</sup>, Шогенов Б.В.<sup>1</sup>, Макшаева М.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», Нальчик, Россия (360004, Нальчик, ул. Чернышевского, 173), e-mail mad.maksh@mail.ru

Существуют различные методики определения сейсмических нагрузок на оборудование АЭС. В данной статье рассмотрены полезные оценки надежности оборудования (и его опорных конструкций) при статических и сейсмических воздействиях с помощью расчетов по поэтажным спектрам в рамках квазистатического подхода. По физико-математической основе существующие расчетные методы проверки сейсмостойкости оборудования разделяются на три принципиально отличающихся вида: статический, линейно-спектральный и динамический. Здесь мы более подробно рассмотрим линейно-спектральный. Этот метод основан на методе приведения, который позволяет свести систему с N-ной степенью свободы к N эквивалентным системам с одной степенью свободы с суперпозицией колебаний этих простых систем. Инерционные сейсмические нагрузки определяются при помощи спектров ответов на отметках установки оборудования, которые характеризуют реакцию систем с одной степенью свободы на сейсмические воздействия при заданном значении постоянной затухания колебания.

Ключевые слова: сейсмические нагрузки, землетрясения, динамические характеристики, спектр ускорения, надежность оборудования

## RELIABILITY ASSESSMENT OF NPP EQUIPMENT IN THE LINE-SPECTRAL THEORY OF SEISMIC

Suyumbaev H.U.<sup>1</sup>, Nogerov I.A.<sup>1</sup>, Chogenov B.V.<sup>1</sup>, Makshaeva M.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GOU VPO «Kabardino-Balkarian State University H.M. Berbekov» Nalchik, Russia (360000, Nalchik, Chernyshevskogo str., 173), e-mail mad.maksh@mail.ru

There are various methods for determining seismic loads on equipment plant. This article describes the evaluation of the reliability of the equipment useful (and its supporting structures) under static and seismic loads using layerwise spectra calculations in the framework of the quasi-static approach. On physical and mathematical calculation methods based on existing seismic resistance test equipment are divided into three fundamentally different types: static, linear and dynamic spectral. Here we take a closer look linear spectral. This method is based on the method of reduction, which allows to reduce the system with N degrees of freedom equivalent to the N systems with one degree of freedom with the superposition of oscillations of simple systems. The inertial seismic loads are determined using spectra responses to elevations of installation, the response of systems with one degree of freedom for the seismic effects for a given value of the damping constant fluctuations.

Keywords: seismic loads, earthquake, dynamic performance, the spectrum of acceleration, the reliability of the equipment

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных определению сейсмических нагрузок на оборудование АЭС, расположенное на различных отметках здания. Наиболее распространенный подход – построение поэтажных акселерограмм (ПА) и спектров ускорения (ПС), которые используются для расчета оборудования в рамках динамической или квазистатической (спектральной) методики [1, 2].

Обычно предлагаемые схемы оценки надежности оборудования основываются на представлении воздействия как случайного процесса, решении соответствующих задач статистической динамики для здания и оборудования, определении функции надежности (как вероятности пребывания параметров качества оборудования в допустимой области в

течение заданного интервала времени) [3]. Однако практическая реализация такого (наиболее общего) подхода связана с определенными трудностями из-за недостаточной информации о статистических характеристиках воздействия, динамических характеристиках различного оборудования и т.п.

Между тем полезные оценки надежности оборудования (и его опорных конструкций) при статических и сейсмических воздействиях можно получить при расчетах по поэтажным спектрам в рамках квазистатического подхода.

Вектор сейсмических инерционных нагрузок, отвечающих  $i$ -й собственной форме оборудования, равен:

$$|S_i| = g W(f_i, \varepsilon_i) [M] \{\eta_i\} \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;

$W(f_i, \varepsilon_i)$  – поэтажный спектр ( $f_i$  и  $\varepsilon_i$  –  $i$ -е собственная частота и затухание);

$[M]$  – матрица масс;

$\{\eta_i\}$  – соответствующим образом нормирования  $i$ -я собственная форма.

Вектор  $\{S_i\}$  можно рассматривать как случайный в силу неизбежного разброса величин  $W$ ,  $\{\eta_i\}$  и  $[M]$ , связанного с вариацией интенсивности, повторяемости и спектрального состава землетрясений, неточностью определения характеристик сооружения и оборудования, условностью различных схем и т.п. По вероятностным характеристикам величин, входящих в первую часть (1), могут быть определены вероятностные характеристики  $\{S_i\}$ , а затем вероятность превышения заданных предельных величин (напряжений, смещений и т.д.), от которых зависят прочность и работоспособность оборудования. Задача решается в следующем порядке: определение на основе имеющейся информации вероятностных характеристик параметров воздействия, сооружения и оборудования (математических ожиданий, дисперсий, функций распределения и т.п.); построение ПА и ПС с учетом вариации расчетных схем, деформационных характеристик и параметров затухания сооружения и оборудования; определение вероятностных характеристик  $W(f_i, \varepsilon_i)$  и  $\{S_i\}$ ; статический расчет оборудования (и опорных конструкций) на случайную нагрузку  $\{S_i\}$  и определение усилий  $N_i$  (или напряжений) по каждой собственной форме; определение вероятностных характеристик расчетных усилий

$N_p = \left( \sum_{i=1}^n N_i^2 \right)^{1/2}$  ( $i$  — число учитываемых форм); оценка надежности оборудования при особом сочетании воздействий (т.е. при статических и сейсмических нагрузках) и принятом критерии отказа.

В данной работе в первом приближении принимается следующая система основных допущений: повторяемость землетрясений подчиняется закону Пуассона; величина пикового ускорения (в пределах данного балла) распределена по нормальному закону, при построении ПА используются линейно-упругие расчетные модели сооружений.

В силу последнего допущения

$$W(f_i, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = AW^*(f_i, \lambda_1, \dots, \lambda_k) \quad (2)$$

где  $A$  – пиковое значение ускорения грунта;

$W^*$  – спектр при  $A = 1$ ;

$\lambda_k$  – параметры расчетной модели (жесткость основания, характеристики затухания и т.д.), рассматриваемые как случайные величины.

Далее можно принять, что величины  $W^*(f_i, \lambda_1, \dots, \lambda_k)$  для каждого  $f_i$  вычисленные по акселерограммам различного спектрального состава и длительности при вариациях  $\lambda_k$ , распределены по нормальному закону. В другом варианте можно принять, что по нормальному закону распределены параметры  $\lambda_k$ . При этом, как обычно в задачах такого типа, гипотеза нормальности, принимаемая непосредственно относительно величин  $W^*(f_i, \lambda_k)$  либо относительно параметров расчетной модели  $\lambda_k$ , а также для величин пиковых ускорений, прочностных характеристик и иного, рассматривается в качестве первого приближения, восполняющего недостаток эмпирических данных о реальных распределениях.

При использовании второго подхода функцию  $W^*(f_i, \lambda_1, \dots, \lambda_k)$  можно линеаризовать по параметрам  $\lambda_k$  при фиксированном значении  $f_i$ :

$$W_i^* \equiv W^*(f_i, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = \{a(f_i)\}^\tau \{\lambda\} + b(f_i) \quad (3)$$

где  $\{a(f_i)\}$ ,  $b(f_i)$  – соответствующие коэффициенты. Тогда величины  $W_i^*$  также будут распределены по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией:

$$m(W_i^*) = \{a(f_i)\}^\tau \{m(\lambda)\} + b(f_i);$$

$$D(W_i^*) = \{a(f_i)\}^\tau [K_\lambda] \{a(f_i)\} \quad (4)$$

где  $\{m(\lambda)\} = \{m(\lambda_1), \dots, m(\lambda_k)\}$ ;  $[K_\lambda]$  — корреляционная матрица параметров  $\lambda_k$ .

Коэффициент корреляции между  $W_i^*$  и  $W_j^*$

$$K(W_i^* W_j^*) = \{a(f_i)\}^\tau [K_\lambda] \{a(f_j)\} \quad (5)$$

В частном случае, когда параметры  $\lambda_k$  некоррелированы,

$$D(W_i^*) = \sum_{s=1}^k a_s^2(f_i) D(\lambda_s);$$

$$K(W_i^* W_j^*) = \sum_{s=1}^k a_s(f_i) a_s(f_j) D(\lambda_s). \quad (6)$$

Разложив правую часть (2) в ряд Тейлора в окрестности точки  $(m(A), m(W^*))$ , получим в линейном приближении:

$$W = Am(W^*) + W^* m(A) - m(A)m(W^*) + \dots, \quad (7)$$

т.е. величины  $W(f_i)$  так же будут распределены по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией:

$$\begin{aligned} m(W_i) &= m(A)m(W_i^*); \\ D(W_i) &= m^2(W_i^*)D(A) + m^2(A)D(W_i^*) \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициент корреляции между  $W_i^*$  и  $W_j^*$  равен

$$K(W_i W_j) = m(W_i^*)m(W_j^*)D(A) + m^2(A)K(W_i^* W_j^*) \quad (9)$$

Усилия (напряжения) в оборудовании  $N_i$ , соответствующие сейсмическим нагрузкам по  $i$ -й форме, определяются линейной комбинацией компонент  $\{S_i\}$ , т.е.

$$N_i = \{h_i\}^T \{S_i\} = W_i g \{h_i\}^T [M] \{\eta_i\} = W_i C_i \quad (10)$$

где  $C_i = g \{h_i\}^T [M] \{\eta_i\}$ ;  $\{h_i\}$  — соответствующие коэффициенты.

Таким образом,  $N_i$  распределены по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией:

$$\begin{aligned} m(N_i) &= C_i m(W_i) \\ D(N_i) &= C_i^2 D(W_i) \end{aligned} \quad (11).$$

Коэффициент корреляции между усилиями по двум различным формам:

$$K(N_i N_j) = C_i C_j K(W_i W_j) \quad (12)$$

Из формулы для расчетных усилий  $N = \left( \sum_{i=1}^n N_i^2 \right)^{1/2}$  в линейном приближении получаем:

$$N = \frac{1}{m(N)} \sum_{i=1}^n N_i m(N_i) + \dots, \quad (13)$$

т.е.  $N$  также распределено по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией:

$$m(N) = \left( \sum_{i=1}^n m^2(N_i) \right)^{1/2} \quad (14)$$

где  $\{m(N_s)\} = \{m(N_1), \dots, m(N_n)\}$ ;  $\{K(N_s)\}$  — корреляционная матрица усилий  $N_s$ .

Если при расчете оборудования учитываются несколько различных сейсмических усилий, например  $N^{(1)}$  и  $N^{(2)}$ , то их математические ожидания и дисперсия вычисляются по формулам (14), а коэффициент корреляции между  $N^{(1)}$  и  $N^{(2)}$

$$K(N^{(1)}N^{(2)}) = \frac{\{m(N_s^{(1)})C_s^{(1)}\}[K(W)]\{m(N_s^{(2)})C_s^{(2)}\}}{m(N^{(1)})m(N^{(2)})} \quad (15)$$

где  $\{m(N_s^{(1)})C_s^{(1)}\} = \{m(N_i^1)C_i^1, \dots, m(N_n^1)C_n^1\}$ ;  $[K(N)]$  — корреляционная матрица значений  $W_s$ .

Критерий прочности (жесткости, устойчивости и т.п.) или работоспособности оборудования

$$F(G, R) \geq 0, \quad (16)$$

где  $F$  — заданная функция параметров нагрузки (в том числе сейсмической)  $G$  и прочности  $R$ . Во многих случаях он может быть сведен к виду:

$$F = R - G \geq 0, \quad (17)$$

где  $F$  имеет смысл резерва прочности [4]. В этом случае вероятность отказа

$$V = \int_{-\infty}^0 p_f(F) dF = P_f(0), \quad (18)$$

где  $p_f$  и  $P_f$  — плотность и интегральный закон распределения  $F$  соответственно.

Если  $F$  распределена по нормальному закону, то

$$V = 0.5 - \Phi(\gamma), \quad (19)$$

где  $\gamma = \frac{m(F)}{\sqrt{D(F)}}$ , а  $\Phi$  — интеграл вероятности Гаусса.

При больших значениях  $\gamma$  используется асимптотическая формула [4]

$$V = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \exp \frac{-\gamma}{2} \quad (20)$$

Если оборудование, срок службы которого  $T$ , работает в  $r$  различных режимах продолжительностью  $t_i$  каждый ( $\sum t_i = T$ ), при которых оно имеет различные динамические характеристики (собственные частоты, формы и т.п.), то вероятность отказа может быть определена по формуле полной вероятности:

$$V = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^t V_i t_i \quad (21)$$

где  $V_i$  – вероятность отказа при  $i$ -м режиме работы, определяемая по формуле (18).

Аналогично учитываются направления сейсмического воздействия, а также повторяемость землетрясений разной интенсивности (например, ПЗ и МРЗ, фигурирующих в нормативных расчетах). Так, если вероятность  $P_j$  землетрясения с периодом повторяемости  $T_j$  за срок службы оборудования  $T$  равна и задано  $m$  акселерограмм, то полная вероятность отказа оборудования может быть оценена снизу и сверху с помощью соотношений:

$$V_{min} = \sum_{j=1}^m V_j P_j \quad (22)$$

$$V_{max} = \sum_{j=1}^{m-1} V_j P_j + V_m \left( 1 - \sum_{j=1}^{m-1} P_j \right) \quad (23)$$

где  $V_j$  — вероятность отказа при  $j$ -м землетрясении, в качестве  $V_m$  в (23) следует принять наименьшую из вероятностей отказа.

Обычно при ПЗ и МРЗ предъявляются различные требования к оборудованию, что может быть учтено путем использования разных критериев отказа.

В качестве примера дается оценка надежности опорной конструкции цилиндрического резервуара с жидкостью (водой), установленного на трех стойках, жестко закрепленных в корпусе и шарнирно опертых на основание (рис. 1).

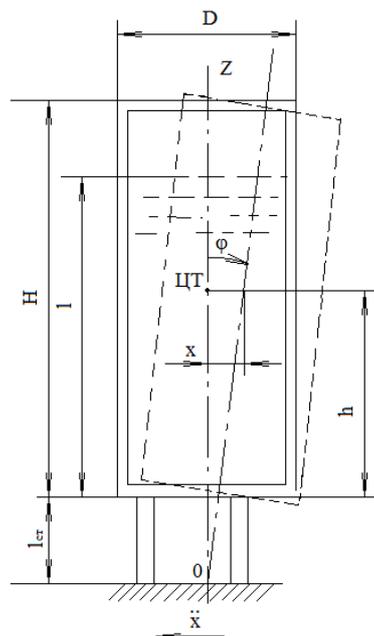


Рис. 1. Резервуар с жидкостью

Сооружение, в котором установлен резервуар, может подвергаться землетрясениям с интенсивностью  $I_1 = 8$  баллов (с периодом повторяемости  $T_1 = 10\,000$  лет),  $I_2 = 7$  баллов ( $T_2 = 100$  лет) и  $I_3 = 6$  баллов ( $T_3 < 100$  лет). В таблице 1 приводятся величины  $m(A)$  и  $D(A)$ , вычисленные на основе интегральных законов распределения [5], а также вероятности  $P_i$  землетрясений за срок службы резервуара 30 лет (вероятность шестибалльного землетрясения принята  $P_3 = 1 - (P_1 + P_2)$ ).

таблица 1

Вероятностные характеристики землетрясений					
Номер Землетрясения, $i$	Интенсивность $I_i$ , балл	Период повторяемости, $T_i$ , лет	Пиковое ускорение, $A$ (g)		Вероятность за срок службы, $P_i$
			Математическое ожидание, $m(A)$	Дисперсия, $D(A)$	
1	8	10000	0,2	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,003
2	7	100	0,1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,222
3	6	100	0,05	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,775

Случайными параметрами расчетной модели являются:  $\lambda_1$  – модуль упругости грунтового основания, на котором расположено сооружение ( $E \cdot 10^{-4}$  МПа);  $\lambda_2$  – затухание в оборудовании (в процентах от критического). Коэффициенты линеаризации спектра  $W^*(f, \lambda_1, \lambda_2)$  определяются по формуле (3), выполняемой методом наименьших квадратов (для простоты примера спектр принят одинаковым при всех землетрясениях).

Расчетная схема резервуара представляет собой твердое тело с двумя степенями свободы ( $x$  и  $\varphi$ ); масса жидкости суммируется с собственной массой резервуара [1]; резервуар работает в двух режимах ( $t_1$  – время заполнения до верха, а  $t_2$  – на высоту  $l$ ); воздействие приложено горизонтально, в плоскости чертежа, оба направления равновероятны.

Критерий отказа одной стойки – развитие напряжений, превышающих временное сопротивление  $\sigma_{вр}$  (также распределенное по нормальному закону); критерий отказа опорной конструкции – выход из строя хотя бы одной стойки.

Критерий прочности для стоек, расположенных слева и справа от оси  $OZ$  (при показанном на рисунке 1 направлении воздействия  $X_0$ ), имеет вид:

$$F_{л} = \sigma_{вр} - \sigma_c + \sigma_{с.в} \geq 0;$$

$$F_{п} = \sigma_{вр} - \sigma_c - \sigma_{с.в} \geq 0,$$

где  $\sigma_c$  и  $\sigma_{с.в}$  – напряжения от сеймики и собственного веса соответственно. При перемене направления воздействия условия (25) и (26) меняются местами.

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: диаметр резервуара  $D = 150$  см; высота  $H = 450$  см; длина стойки  $l_{ст} = 100$  см, площадь ее поперечного сечения  $F_{ст} = 18,8$  см<sup>2</sup>, момент инерции  $I_{ст} = 340$  см<sup>4</sup>,

момент сопротивления  $W_{ст} = 54,4 \text{ см}^3$ ; масса сухого резервуара  $Q = 3,8 \text{ т}$ , центральный момент инерции относительно горизонтальной оси  $I_p = 10 \text{ т-м}^2$ ; срок службы резервуара 30 лет; общее время работы при заполнении до верха  $t_1 = 6 \text{ лет}$ ; время работы при заполнении на высоту  $l = 1,7 \text{ м}$   $t_2 = 24 \text{ года}$ ; математические ожидания и дисперсии случайных параметров и прочностных характеристик:  $m(\lambda_1) = 1,06 * 10^{-2} \text{ МПа}$ ;  $D(\lambda_1) = 0,26 * 10^{-4} \text{ МПа}^2$ ;  $m(\lambda_2) = 3$ ;  $D(\lambda_2) = 0,33$ ;  $m(\sigma_{вр.}) = 718 \text{ МПа}$ ;  $D(\sigma_{вр.}) = 5155 \text{ МПа}^2$ ;  $\sigma_{с.в.} = 20,7 \text{ МПа}$ .

При интенсивности  $I_1 = 8$  баллов в случае полного резервуара вероятность отказа оказывается равной: для левой стойки  $V'_л = 0,79$ , для правой стойки  $V'_п = 0,81$ , для опорной конструкции в целом  $V'_1 = 0,992$  (надежность  $\psi = 8 * 10^{-3}$ ).

При частичном заполнении резервуара вероятность отказа опорной конструкции  $V'_1 = 9 * 10^{-12}$ . Полная вероятность отказа при 8 баллах  $V'_1 = 0,198$ , при 7 и 6 баллах соответственно  $V_2 = 0,094$  и  $V_3 = 9,06 * 10^{-5}$ . В результате вероятности отказа опорной конструкции оказывается равной  $V = 0,021$ , т. е. надежность  $\psi = 1 - V = 0,979$ .

Таким образом, надежность конструкции оказывается достаточно высокой, хотя при  $I_1 = 8$  баллов и заполненном резервуаре математическое ожидание сейсмических напряжений на 75% превышает значение  $\sigma_{вр.}$ , данное в сортаменте, и при обычном расчете опорная конструкция была бы признана несейсмостойкой.

Надежность может быть повышена за счет несложных конструктивных мероприятий. Так, если установить резервуар на шести стойках вместо трех (при той же суммарной площади их сечения, т.е. металлоемкости конструкции), то можно принять за критерий отказа выход из строя трех рядом расположенных стоек или более трех стоек. В этом случае вероятность отказа составляет  $V = 1,85 * 10^{-3}$ , т.е. уменьшается более чем в 10 раз.

### Список литературы

1. Динамика и проблемы безопасности экологически опасных технических систем при сейсмических воздействиях. Отчет КБГУ НИИ ПМИМ. 1994.
2. Прочность, устойчивость, колебания. Справочное руководство. В 3 Т. Т. 3. М.: Машиностроение 1968, 567 с.
3. Суюмбаев Х.У. Динамические исследования оборудования на действующих и пусковых АЭС. Препринт КБГУ, Нальчик 1996, 8 с.
4. Суюмбаев Х.У. Расчетно-экспериментальная проверка и обеспечение сейсмостойкости энергетического оборудования на пусковых и действующих АЭС.: Дисс. ... канд.техн.наук. М., 1996. С. 121.

5. Чеченов Х.Д., Суюмбаев Х.У. Дискретный мониторинг больших технических систем // Тяжелое машиностроение. М. , № 8. 1996.

**Рецензенты:**

Кравец С.Б., д.т.н., профессор, зав. отделом сейсмостойкости ВНИИАМ, г. Волгодонск;

Созаев В.А., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой общей физики ГМИ, г. Владикавказ, профессор кафедры физики наносистем КБГУ, г. Нальчик.