

УДК 624.042.7:721.011.27

## РАСЧЕТ ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ДОПУСТИМОГО РИСКА

Дроздов В. В., Пшеничкина В. А.

*ГОУ ВПО «Волгоградский архитектурно-строительный университет», Волгоград, Россия (400074, Волгоград, ул. Академическая, 1), e-mail: [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru)*

В представленной статье изложена методика расчета зданий повышенной этажности на основе базовой пространственной конечно-элементной модели по критерию предельно допустимого риска. Сейсмическое воздействие на здание моделируется в виде стационарной случайной функции с заданными статистическими характеристиками. Проведен вероятностный расчет здания, получены выходные спектральные плотности и дисперсии обобщенных координат, перемещений и напряжений в конструкциях, коэффициент динамичности. Определены эффективный период и эффективная частота системы в целом, а также количественная оценка условного и полного сейсмического риска. Предложена методика оценки предельно допустимого риска при расчете зданий на сейсмические нагрузки и соответствующее ему расчетное ускорение грунта. Разработанная методика предназначена для оценки сейсмической уязвимости эксплуатируемых зданий и сооружений, а также проектирования сейсмостойких зданий с заданным уровнем сейсмического риска.

Ключевые слова: сейсмическая нагрузка, надежность, полный сейсмический риск.

## CALCULATION OF HIGH-RISE BUILDINGS BY THE MAXIMUM ALLOWABLE RISK

Drozдов V. V., Pshenichkina V. A.

*Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Volgograd, Russia (400074, Volgograd, street Akademicheskaja, 1), e-mail: [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru)*

The article presents the design method of high-rise buildings according to the basic spatial finite element model by the maximum acceptable risk criterion. Seismic impact on the building is modeled as a stationary random function with the set statistical characteristics. Probabilistic calculation of the building has made it possible to obtain the output spectral density and the variance of the generalized coordinates, the displacements and stresses in structures, dynamic factor. The effective period and effective frequency of the system as a whole, as well as quantitative estimate of conditional and full seismic risk have been defined. The article offers the method of estimation of maximum acceptable risk when calculating seismic loads and the corresponding estimated settlement acceleration of buildings. The purpose of the method is estimating seismic vulnerability of exploited buildings and structures, as well as designing aseismic buildings with the set level of seismic risk.

Key words: seismic load, reliability, full seismic risk.

Расчет зданий и сооружений на сейсмические нагрузки связан с высокой степенью неопределенности: амплитуда, спектральный состав, направление и продолжительность, а также время начала воздействия являются случайными параметрами. Прочностные и физико-механические характеристики материалов конструкции также обладают статистической изменчивостью. Обеспечить безопасность таких объектов можно лишь с определенной степенью вероятности, что требует перехода от расчетов по методу предельных состояний к расчетам по предельно допустимому риску. Только вероятностный подход позволяет получить численную оценку надежности как проектируемых, так и эксплуатируемых зданий и сооружений на основе единого критерия допустимого риска и, следовательно, более досто-

верно и с единых позиций оценить величину экономических, социальных и других последствий в случае сильных землетрясений.

Вероятностные методы нормирования надежности конструкций зданий и сооружений с использованием показателей риска практически еще не разработаны вследствие сложности проведения вероятностных расчетов и построения функции надежности зданий и сооружений как единых пространственных систем. Так, в настоящее время оценка надежности зданий при сейсмических воздействиях основывается на оценке риска превышения сейсмического ускорения грунтового основания над заданным расчетным уровнем [2]. При этом остается неопределенной величина вероятности отказа конструкций зданий при условии реализации землетрясения проектной и более высокой интенсивности. Кроме того, существующая методика разработана в основном для одномассовых систем [1], что ограничивает область ее применения лишь частными случаями.

В настоящей статье представлена методика вероятностного расчета здания на сейсмическую нагрузку, определения условного, полного и предельно допустимого сейсмического риска. В качестве рассматриваемой расчетной схемы принята пространственная конечно-элементная модель.

Сейсмическая нагрузка моделируется в виде стационарной случайной функции  $\tilde{X}(t)$  со следующими характеристиками: математическим ожиданием  $M_x(t) \approx 0$ , спектральной плотностью случайной функции  $S_x(\omega)$ .

Колебания расчетной пространственной системы под действием сейсмической нагрузки описывается дифференциальным уравнением [3]:

$$\ddot{\xi}_i(t) + 2c_i \dot{\xi}_i(t) + \lambda_i^2 \xi_i(t) = -\tilde{H}_i(t), \quad (1)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество учитываемых форм колебаний,

$\xi_i$  – функция обобщенных координат,

$c_i$  – коэффициент затухания,

$\lambda_i$  –  $i$ -я частота собственных колебаний системы,

$\tilde{H}_i(t)$  – обобщенная случайная нагрузка.

Спектральная плотность «выхода» случайной функции обобщенных координат:

$$S_{\xi_i}(\omega) = |\Phi_i(i\omega)|^2 \cdot S_x(\omega), \quad (2)$$

где  $|\Phi_i(i\omega)|^2$  – квадрат модуля комплексного коэффициента передачи.

Оценка условного риска превышения перемещения за данный уровень  $a$  за время землетрясения  $0 \leq \tau \leq t$  находится по формуле:

$$P(\xi > a|t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t U(a|\tau) d\tau\right), \quad (3)$$

где  $U(a,t)$  – среднее число выбросов функции за заданный уровень  $a$

$$U(a,t) = \frac{1}{T_{ek}(t)} e^{-\frac{a^2}{2\sigma_p^2(t)}}. \quad (4)$$

Вычислим эффективный период  $T_e$  изменения параметра  $\xi_i(t)$  для пространственных систем, согласно [4]:

$$T_{ek} = 2\pi \frac{\sigma_p}{\dot{\sigma}_p} = 2\pi \left( \frac{\int_0^\infty S_{\xi_i}(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \omega^2 S_{\xi_i}(\omega) d\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 2\pi \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\xi_i^2(z) z_{ik}^2 S_x(\lambda_i)}{\lambda_i^3} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\xi_i^2(z) z_{ik}^2 S_x(\lambda_i)}{\lambda_i} \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_p$  – стандарт первой производной (скорости изменения) функции обобщенных координат,  $S_{\xi_i}(\omega)$  – спектральная плотность выхода,  $k$ -номер массы.

$$\text{Тогда эффективная частота пространственной системы равна: } \lambda_{ek} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{ek}} \quad (6)$$

Уровень  $a^*$  расчетного перемещения в рассматриваемом сечении с учетом заданного срока службы сооружения, спектрального состава, продолжительности землетрясения и выбранного риска  $P^*$  вычисляется по формуле:

$$a^* = \sigma_p \sqrt{-2 \ln \left[ -\frac{T_{ek} \cdot \ln(1 - P^*)}{\tau_E} \right]} = n \sigma_p, \quad (7)$$

где  $\tau_E$  – продолжительность интенсивной фазы землетрясения.

$$\text{Определим расчетные ускорения: } \chi^* = \lambda_{e\Sigma}^2 \cdot a^* \quad (8)$$

Для вычисления оценки полного сейсмического риска, учитываем величину сейсмической опасности территории как вероятности превышения расчетного землетрясения в течение  $T_0$ , хотя бы один раз, используя закон Пуассона с постоянной интенсивностью [5]:

$$H(t) = 1 - \exp(-\Lambda t) \quad (9)$$

Полный сейсмический риск равен произведению вероятностей (4) и (9) [1]:

$$H_{seism}(a, T) = P(\varphi > a|t)H(T) = \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^t U(a, \tau)\right] \right\} [1 - \exp(-\Lambda T)] \quad (10)$$

В качестве примера рассматривается семнадцатизэтажное монолитное рамно-связевое здание с безбалочными перекрытиями. Высота здания  $h=54$  м. В плане здание прямоугольное, размерами  $27,5 \times 19,4$  м. Колонны сечением  $400 \times 400$  мм, толщина диафрагм жесткости  $200$  мм. Класс бетона конструкций В25, армирование выполнено арматурными стержнями класса А240, А400. План типового этажа изображен на рис. 1, расчетная схема МКЭ представлена на рис. 2. Расчетная интенсивность сейсмической нагрузки по карте ОСР-97, принимается равной 7 баллам, с частотой повторяемости землетрясений:  $\Lambda = 0,002$  (лет $^{-1}$ )

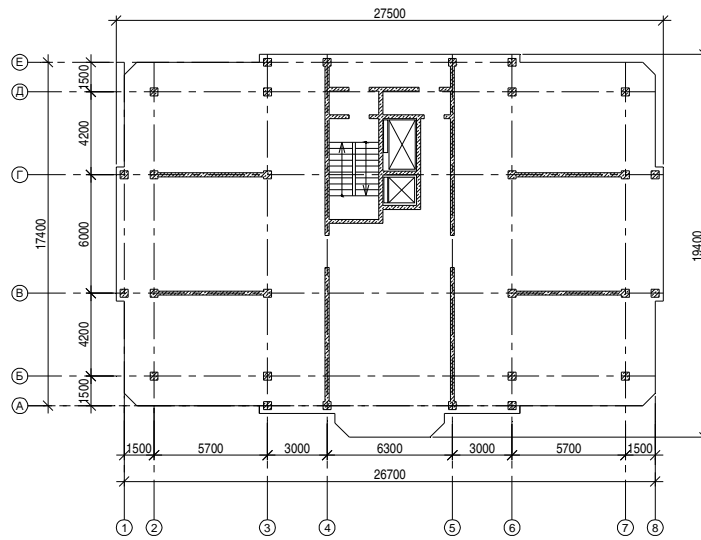


Рис.1. План типового этажа здания

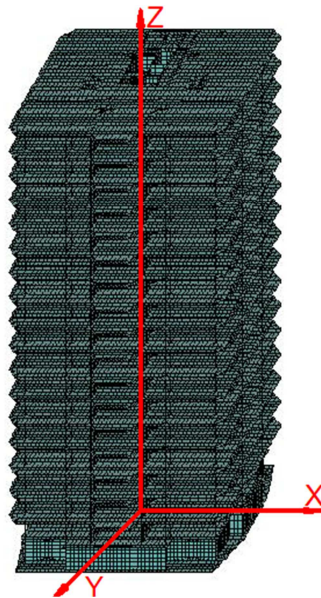


Рис.2. Расчетная схема здания

Спектральную плотность сейсмического воздействия определяем по формуле:

$$S_x(\omega) = D \frac{2}{\pi} \alpha \frac{m^2 + \omega^2}{m^4 + 2a \omega^2 + \omega^4}, \quad (11)$$

где  $m^2 = \alpha^2 + \theta^2$ ,  $a = \alpha^2 - \theta^2$ .

Дисперсию принимаем, согласно [5], равной  $D = \sigma^2 = (0,25 \text{ м/с}^2)^2$  для 7-балльного землетрясения. Коэффициенты спектральной плотности  $\alpha = 6 \text{ с}^{-1}$ ;  $\theta = 14 \text{ с}^{-1}$ .

График нормированной спектральной плотности  $S_x(\omega)$  приведен на рис.3.

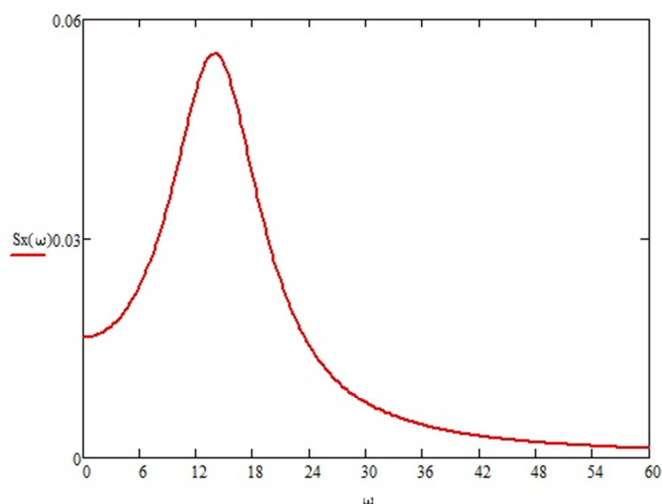


Рис.3. Нормированная спектральная плотность сейсмической нагрузки

После проведения расчетов были выбраны наиболее загруженные элементы 12 сечений, находящиеся в диафрагмах жесткости и колоннах здания. Спектральная плотность «выхода» случайной функции обобщенных координат определяется по формуле (2).

Динамические характеристики здания приведены в таблице 1, а значения перемещений при  $z=h$  и напряжений при  $z=0$  от сейсмического воздействия в таблицах 2 и 3:

Табл. 1. Собственные частоты здания

№ загр.	№ формы	Круг. частота (рад/с)	Период (с)	Коэф. распред.	Мод. масса (%)	Сумма мод. масс (%)
2	1	5.386	1.167	1.715	51.958	51.958
2	2	7.010	0.896	0.122	0.415	52.372
2	3	7.975	0.788	0.786	12.396	64.768
2	4	19.178	0.328	-0.730	8.307	73.075
2	5	28.168	0.223	-0.483	5.590	78.665
2	6	28.839	0.218	-0.284	2.026	80.692
2	7	36.018	0.174	-0.370	2.644	83.335
2	8	37.579	0.167	-0.023	0.001	83.336
2	9	37.759	0.166	0.242	0.094	83.430
2	10	38.019	0.165	-0.001	0.000	83.430

Табл. 2. Перемещения узлов системы

Перемещения, мм, при $z=h$ .										
№ узла	1-я реал.	2-я реал.	3-я реал.	4-я реал.	5-я реал.	6-я реал.	7-я реал.	8-я реал.	9-я реал.	10-я реал.
878	-30.98	-33.30	-31.66	-29.92	-36.49	-37.83	-21.13	-41.87	-39.26	-36.72
879	-30.96	-33.27	-31.63	-29.90	-36.46	-37.80	-21.12	-41.84	-39.24	-36.70
882	-30.97	-33.28	-31.64	-29.90	-36.47	-37.81	-21.12	-41.85	-39.24	-36.70
883	-30.99	-33.30	-31.66	-29.92	-36.49	-37.83	-21.13	-41.87	-39.27	-36.73
886	-22.93	-24.64	-23.43	-22.14	-27.00	-28.00	-15.64	-30.99	-29.06	-27.18
887	-22.91	-24.62	-23.41	-22.12	-26.98	-27.97	-15.63	-30.96	-29.03	-27.15
890	-22.91	-24.62	-23.41	-22.13	-26.98	-27.98	-15.63	-30.96	-29.04	-27.16
891	-22.93	-24.64	-23.43	-22.14	-27.00	-28.00	-15.64	-30.99	-29.06	-27.18
938	-38.59	-41.47	-39.43	-37.26	-45.44	-47.11	-26.32	-52.14	-48.90	-45.73
939	-28.72	-30.86	-29.35	-27.73	-33.82	-35.07	-19.59	-38.81	-36.40	-34.04
942	-38.59	-41.47	-39.43	-37.27	-45.45	-47.12	-26.32	-52.15	-48.91	-45.74
943	-28.74	-30.88	-29.36	-27.75	-33.84	-35.09	-19.60	-38.83	-36.42	-34.06

Табл. 3. Напряжения в элементах

Напряжения, МПа, при $z=0$ .										
№ эл-та	1-я реал.	2-я реал.	3-я реал.	4-я реал.	5-я реал.	6-я реал.	7-я реал.	8-я реал.	9-я реал.	10-я реал.
41909	-5.92	-6.37	-6.06	-5.72	-6.98	-7.24	-4.04	-8.01	-7.51	-7.02
41970	4.34	4.67	4.44	4.20	5.12	5.30	2.96	5.87	5.51	5.15
41987	-4.40	-4.73	-4.50	-4.25	-5.18	-5.38	-3.00	-5.95	-5.58	-5.22
42048	5.88	6.32	6.01	5.68	6.92	7.18	4.01	7.94	7.45	6.97
42065	-3.99	-4.29	-4.08	-3.85	-4.70	-4.87	-2.72	-5.39	-5.06	-4.73
42126	2.26	2.43	2.31	2.18	2.66	2.76	1.54	3.05	2.87	2.68
42143	-2.37	-2.55	-2.42	-2.29	-2.79	-2.89	-1.62	-3.20	-3.00	-2.81
42204	3.88	4.17	3.97	3.75	4.57	4.74	2.65	5.25	4.92	4.60
42834	1.96	2.11	2.01	1.90	2.31	2.40	1.34	2.65	2.49	2.33
42906	-1.63	-1.76	-1.67	-1.58	-1.92	-1.20	-1.11	-2.21	-2.07	-1.94
42924	-0.89	-0.96	-0.91	-0.86	-1.05	-1.09	-0.61	-1.21	-1.13	-1.06
42996	0.79	0.85	0.81	0.76	0.93	0.97	0.54	1.07	1.00	0.94

Максимальное значение стандарта напряжений  $\sigma_{\phi} = 13.54$  МПа в элементе № 41909 (с учетом статической нагрузки). Этому напряжению соответствует стандарт перемещения  $\xi^* = 34.05$  мм. При напряжении в сечении равном расчетному сопротивлению  $R_b = 14.5$  МПа стандарт перемещения составляет:  $\xi_{R_b}^* = 37.17$  мм.

$$T_{ek} = 1.489, \lambda_{ek} = 4.22 \left( \frac{pa\delta}{c} \right)$$

Среднее число выбросов за уровень  $a = \xi^*$ , при  $\sigma = \xi_{Rb}^*$  и  $t=10$  с. равно:  $U(a, t) = 0.368$ .

Условный риск превышения перемещения заданный расчетный уровень  $a$ :  $P(\varphi > a|t) = 0.975$

Расчетному перемещению  $a^* = 37.169$  мм соответствует ускорение  $\chi^* = 661.994 \left( \frac{мм}{с^2} \right)$

и полный сейсмический риск:  $H_{seism}(a, T_1) = 0.110$ .

Проанализировав полученные значения условного сейсмического риска, можно сделать следующие выводы: при полученном НДС расчетных сечений коэффициент использования прочности по предельному моменту сечения равен 1.044, коэффициент использования по деформациям в сжатом бетоне равен 1.155, что не приемлемо.

Вычислим величину предельно допустимого риска, при условии, что коэффициенты использования прочности по предельному моменту сечения и деформаций в сжатом бетоне будут равны единице.

Для обеспечения требуемых условий расчетная нагрузка 7 баллов снижена в 1.67 раза.

Используя (7), получим соответствующую величину условного риска:

$$P^* = 1 - \exp \left[ - \exp \left( \frac{-n^2}{2} \right) \cdot \frac{\tau_E}{T_{e\Sigma}} \right] = 0.813$$

Для данного уровня сейсмического риска расчетное ускорение равно:  $\chi^* = 460.133 \left( \frac{мм}{с^2} \right)$ ,

что соответствует амплитудному коэффициенту  $A = 1.67$ .

Полный сейсмический риск равен:  $H_{seism}(a, T_1) = 0.077$ .

Данная методика расчета позволяет определить предельно допустимый, полный сейсмический риск при расчете зданий повышенной этажности на сейсмическую нагрузку.

### Список литературы

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984.
2. Булгаков С. Н., Тамразян А. Г., Рахман А. Г., Степанов А. Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. – М.: МАКС Пресс, 2004. – 304 с.

3. Николаенко Н. А., Назаров Ю. П. Динамика и сейсмостойкость сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
4. Пшеничкина В. А. Вероятностный расчет зданий повышенной этажности на динамические воздействия. – Волгоград: ВолгГАСА, 1996. – 118 с.
5. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 2002. – 75 с.

**Рецензенты:**

Беликов Георгий Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры сопротивления материалов, Волгоградский архитектурно-строительный университет, г. Волгоград.

Богомолов Александр Николаевич, д.т.н., профессор, проректор по научной работе, Волгоградский архитектурно-строительный университет, г. Волгоград.