

УДК 629.039.58

ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ АЭС С РАЗЛИЧНЫМИ МАССОВЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

О.Б. Ташчи¹, Т.Д. Талай²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. Популярность атомных электростанций во всем мире растет. Как увеличение потребления энергии, так и дифференциация источников энергии увеличили строительство объектов ядерной энергетики. Однако этот растущий спрос сделал элементы дизайна более важными. При проектировании сооружений всегда следует учитывать сейсмические факторы. Поведение конструкций при сейсмическом воздействии должно быть хорошо изучено и отражено. При исследовании воздействия сейсмических нагрузок на конструкцию можно использовать множество методов. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Однако конструкции ядерных объектов, безопасность которых очень важна, должны анализироваться наиболее чувствительными методами. В статье определены различные массовые воздействия на вспомогательные конструкции ядерных установок, вместе с этими эффектами исследовано их поведение при сейсмических нагрузках и построены спектры отклика. Путем сравнения спектров отклика, образованных различными масс-эффектами, была исследована взаимосвязь между масс-эффектом и спектрами отклика при ускорении.

Ключевые слова: сейсмический анализ, спектр отклика, переходный анализ, спектральный анализ, сейсмический анализ АЭС, динамический анализ, спектры отклика на ускорение.

Ссылка для цитирования: Ташчи О.Б., Талай Т.Д. Поведение конструкций АЭС с различными массовыми воздействиями при сейсмической нагрузке // Инженерные исследования. 2022. № 1(6). С. 19-26. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/1/19-26.pdf>

BEHAVIOR OF NUCLEAR POWER PLANT STRUCTURES WITH DIFFERENT MASS EFFECTS UNDER SEISMIC LOAD

O.B.Tasci¹, T.C.Talay²

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Nuclear power plants are growing in popularity around the world. Both the increase in energy consumption and the differentiation of energy sources have increased the construction of nuclear energy facilities. However, this increasing demand has made design elements more important. Seismic factors should always be considered in the design of facilities. The behavior of structures under seismic influence should be well studied and reflected. Many methods can be used when examining the effect of seismic loads on the structure. Each method has different advantages and disadvantages. However, nuclear facility structures, whose safety is very important, should be analyzed with the most sensitive methods. In this article, different mass effects on the auxiliary structures of nuclear facilities are defined, their behavior under seismic loads is examined together with these effects, and response spectra are formed. By comparing the response spectra formed by different mass effects, the relationship between mass effect and acceleration response spectra was investigated.

Keywords: seismic analysis, response spectrum, transient analysis, spectral analysis, seismic analysis of NPPs, dynamic analysis, acceleration response spectra.

For citation: Tasci O.B., Talay T.C. Behavior of nuclear power plant structures with different mass effects under seismic load // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No. 1(6). Pp. 19-26. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/1/19-26.pdf>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в 14 странах мира строятся 64 атомных объекта. Ожидается, что к 2030 году будут введены в эксплуатацию 164 реактора. При проектировании АЭС, которые широко используются во многих странах, необходимо учитывать всевозможные неблагоприятные ситуации. В то время как реакторы защищены сейсмическими изоляторами, во вспомогательных зданиях ситуация часто иная ситуация [1, 2]. Атомные электростанции представляют собой объекты высокого риска из-за возможности внезапных аварийных ситуаций, поскольку любой возможный отказ может вызвать катастрофическое радиоактивное загрязнение [3]. Поскольку конструкции АЭС имеют жизненно важное значение, считается, что строительные площадки находятся вдали от сейсмических воздействий. Однако очень важно, чтобы эти конструкции показали высокую стойкость при возможном сейсмическом воздействии [4]. Перед постройкой здания следует учитывать сейсмические колебания характерные для строительной площадки. Расчет должен производиться на соответствующие синтезированные акселерограммы [5].

Цель работы - является определение поведения конструкции, подверженной сейсмической нагрузке при различных массовых воздействиях, и изучение связи спектров отклика с массовым воздействием.

ЗНАЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В структурном анализе решения обычно принимаются путем признания фундамента встроенным, и считается, что в фундаменте нет смещения или поворота. Однако даже при анализе строительных систем при статических нагрузках в фундаментах происходят обрушения и повороты. В случае динамической нагрузки, такой как землетрясение, воздействующее на конструкции, конструкция перемещается вместе с землей, иногда даже конструкция и земля перемещаются в противоположном направлении, и основания могут находиться в разных положениях на земле во время динамической нагрузки [6].

Таблица 1. Свойства грунта
Table 1. Soil properties

Показатель	Значение
Модуль упругости грунта	84 и 45 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,28 и 0,2
ρ	2,85 и 2,6 (T/m^3)

Следует рассчитать свойства жесткости грунта. Изменение свойств грунта влияет на поведение здания против сейсмических воздействий.

Расчетные данные о грунте важны как для модального анализа, так и для анализа переходных процессов конструкции. Он напрямую влияет на движение и поведение конструкции под воздействием землетрясения. При анализе более мягких грунтов деформации и смещения увеличиваются.

Расчет грунтовых пружин производился в соответствии с критериями ASCE. Расчет пружин, которые будут использоваться на грунте, определяется формулами, приведенными ниже [7].

$$K_x = 2(1 + \nu)G_x\beta_x^2\sqrt{BL} \quad (1)$$

$$K_y = 2(1 + \nu)G_y\beta_y^2\sqrt{BL} \quad (2)$$

$$K_z = \frac{G_z}{1 - \nu}\beta_z^2\sqrt{BL} \quad (3)$$

$$K_{xx} = \frac{G_{xx}\beta_{xx}B^2 \cdot L}{1 - \nu} \quad (4)$$

$$K_{yy} = \frac{G_{yy}\beta_{yy}L^2 \cdot B}{1 - \nu} \quad (5)$$

$$K_{zz} = (16G_{zz}R^3)/3 \quad (6)$$

где:

$$R = \sqrt[4]{BL(B^2 + L^2)/6\pi} \quad (7)$$

где:

L – длина здания ;

B – ширина здания ;

ν – Коэффициент Пуассона ;

G – модуль сдвига для соответствующих направлений ;

β – коэффициенты, которые зависят от соотношения B к L.

Таблица 2. Динамическая жесткость
 Table 2. Dynamic stiffness

Характеристика	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Горизонтальная жесткость	Kx	кН/м	1.38E+9
Вертикальная жесткость	Ky	кН/м	1.33 E+9
Вертикальная жесткость	Kz	кН/м	1,6 E+9
Вертикальная жесткость	Kxx	кН·м/рад	2.7 E+11
Вертикальная жесткость	Kyy	кН·м/рад	1.93 E+11
Жесткость на кручение	Kzz	кН·м/рад	2.98 E+11

ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В СЕЙСМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

В исследовании использовались данные реальных землетрясений. Данные получены из записей землетрясения 2020 года в Турции. Данные реальных землетрясений были определены и зачитаны в программу ПК ANSYS. Параметры землетрясения определены по трем осям (рис.1, рис.2).

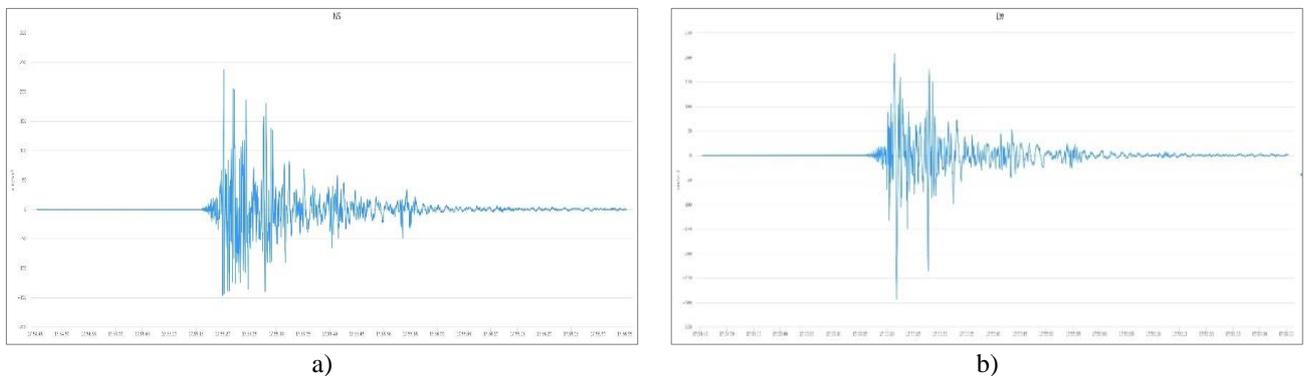


Рис. 1. График ускорений землетрясения по оси X, Y: а – для направления X; b – для направления Y
 Fig. 1. Graph of earthquake acceleration along the X, Y axis: a – for X direction; b – for Y direction

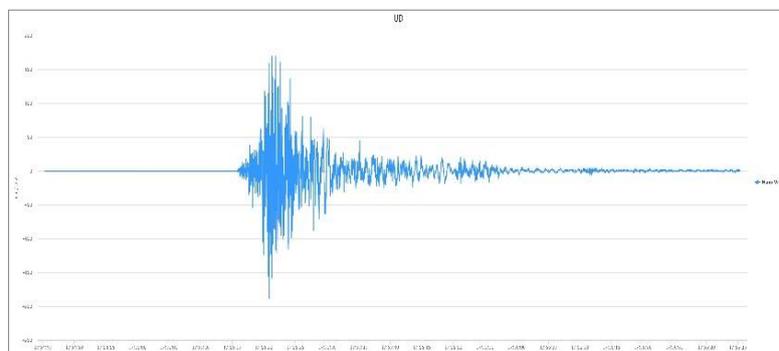


Рис. 2. График ускорений землетрясения по оси Z
 Fig.2. Graph of earthquake acceleration along the Z

Анализируемое здание было смоделировано с помощью ANSYS. Его размеры 47,1 x 31,3 м в длину и 21,8 м в высоту. Вся конструкция выполнена из железобетона с указанием толщины использованных материалов (табл.3).

Таблица 3. Свойства материалов (все материалы определены как железобетон)
Table 3. Material properties

Свойство	Значение
Плиты	600мм
Перегородки	400мм
Наружные стены	600мм
Фундаментная плита	1100мм
Плотность	2300 kg/m ³
Коэффициент Пуассона	0,18

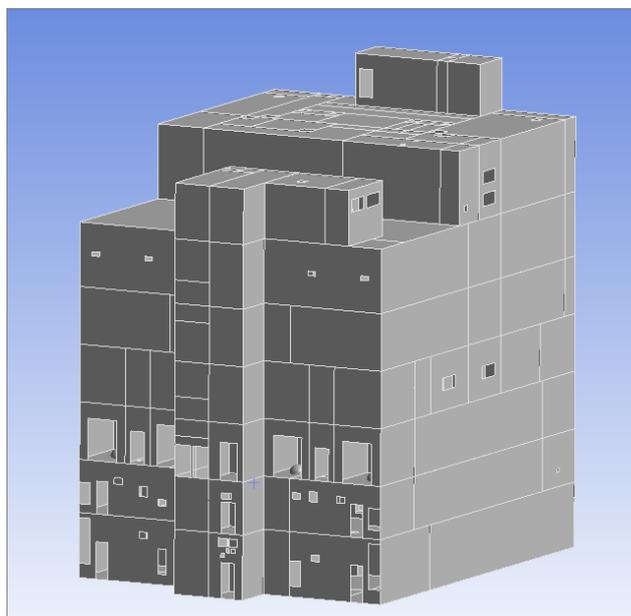


Рис. 3. Модель здания, использованная в анализе
Fig. 3. The building model used in the analysis

Временной интервал, в течение которого землетрясение создает максимальную деформацию, - это моменты времени, когда ускорение входящего землетрясения является наиболее частым, и с этой частотой значение ускорения является самым высоким. Ускорения, действующие на землетрясения, через определенный промежуток времени усиливаются, а затем начинают затухать. По этой причине смещение и деформации сводятся к минимуму, поскольку движение грунта прекращается с окончанием землетрясения. Мгновенные максимальные деформации возникают, когда сейсмические нагрузки учащаются. По окончании землетрясения можно обнаружить постоянные деформации.

При максимальном смещении максимальное ускорение, влияющее на конструкцию, составляет 178,28 см/с² в направлении Y. Однако максимальные ускорения, влияющие на здание во время землетрясения, составляют 205,04 см/с² по оси X, 235,79 см/с² по оси Y и 178,58 см/с² по оси Z. Максимальных ускорений, влияющих на конструкцию, не произошло одновременно. Следовательно, максимальное смещение произошло в конструкции в любой момент времени, когда сумма ускорений для каждой оси максимальна. Следует хорошо проанализировать места, где суммарные ускорения максимальны, и промежутки времени до них. Если суммарные ускорения аналогичной величины наблюдаются слишком сильно за короткий период времени, смещения соответственно увеличиваются (рис.4).

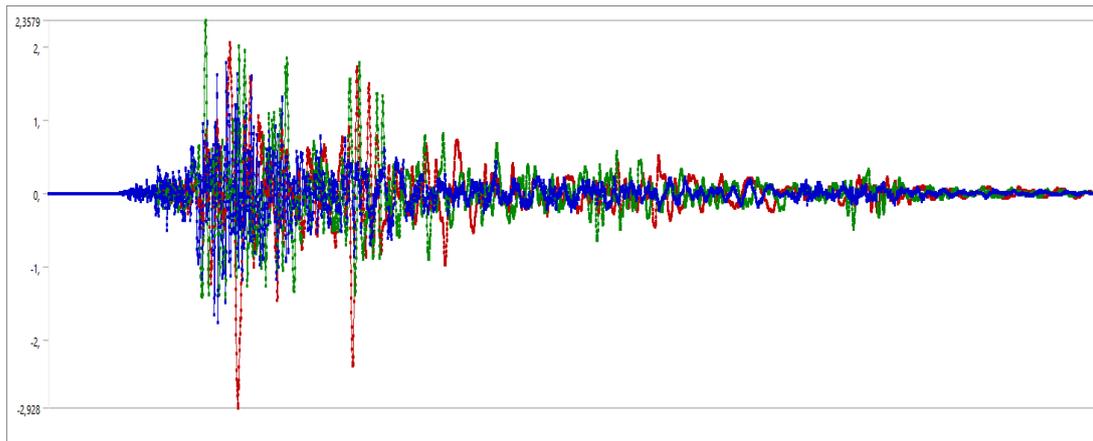


Рис. 4. Комбинированный сейсмический график ускорений
Fig. 4. Combined seismic acceleration graph

Результаты основаны на данных истории времени. По этой причине анализ позволяет выявить деформацию, которая возникнет в здании из-за сейсмической нагрузки в желаемый интервал времени.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТКЛИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МАССОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Анализ спектра реакции - это метод оценки реакции конструкции на короткие, недетерминированные, переходные динамические события. Примеры таких событий - землетрясения и толчки [8]. Поскольку точная временная история нагрузки неизвестна, трудно выполнить анализ, зависящий от времени [9].

При анализе сейсмического отклика строительных конструкций входные колебания грунта оказывают значительное влияние на нелинейные характеристики сейсмического отклика конструкций. Характеристики почвы и местоположение участка, где были зарегистрированы эти колебания грунта, влияют на содержание хронологий колебаний грунта [10].

Для динамического анализа массы воздействуют на разные части конструкции (рис.5).

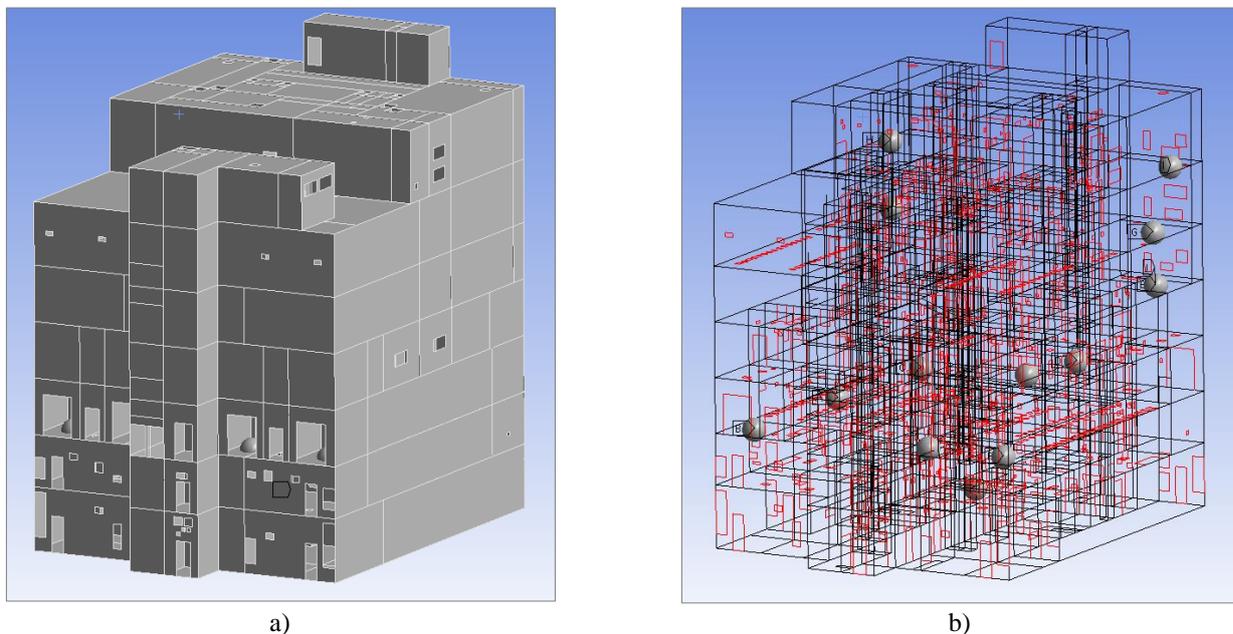


Рис. 5. Здание и массовые эффекты; а – Общий вид здания; б – Расположение массовых эффектов
Fig. 5. Building and mass effects; a - General view of the building; b - Location of mass effects

К конструкции были применены три различных массовых эффекта: 25,50 и 75 тонн. Для каждой массы были проведены отдельные анализы и определены спектры отклика.

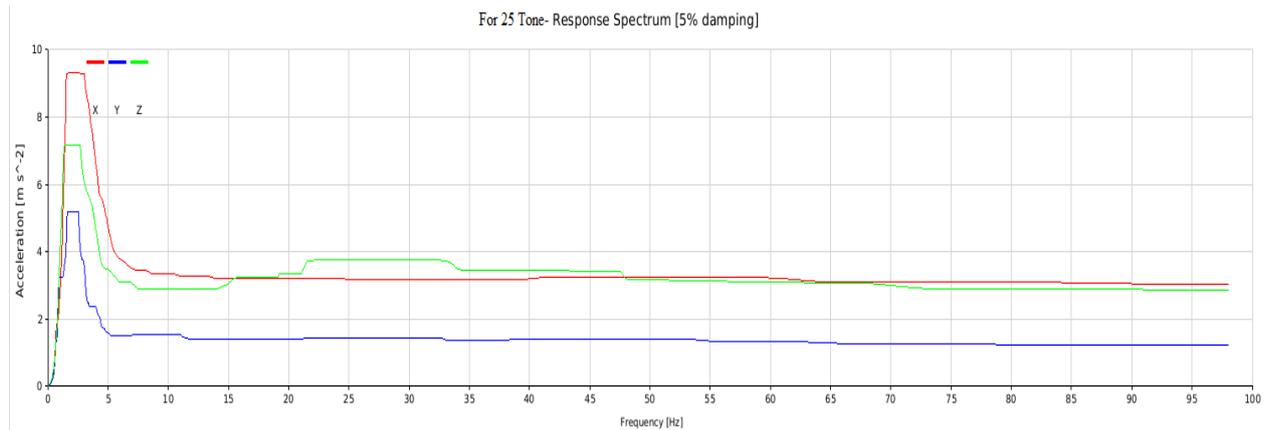


Рис. 6. График спектра отклика для 25 тонов
Fig. 6. Response Spectrum graph for 25 Tones

Для 25-тонного масс-эффекта максимальное значение ускорения в направлении X составило $9,309 \text{ м/с}^2$, в направлении Y $5,3 \text{ м/с}^2$ и в направлении Z $7,2 \text{ м/с}^2$.

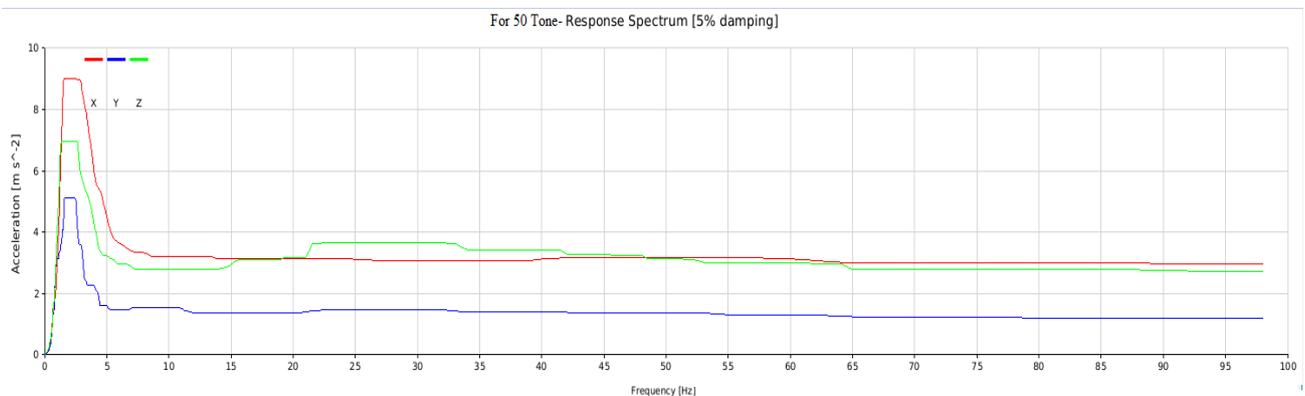


Рис. 7. График спектра отклика для 50 тонов
Fig. 7. Response Spectrum graph for 50 Tones

Максимальное ускорение для эффекта масс 50 тонн составило $8,71 \text{ м/с}^2$ в направлении X, $5,05 \text{ м/с}^2$ в направлении Y и $6,97 \text{ м/с}^2$ в направлении Z. По мере увеличения массового эффекта ускорения уменьшались.

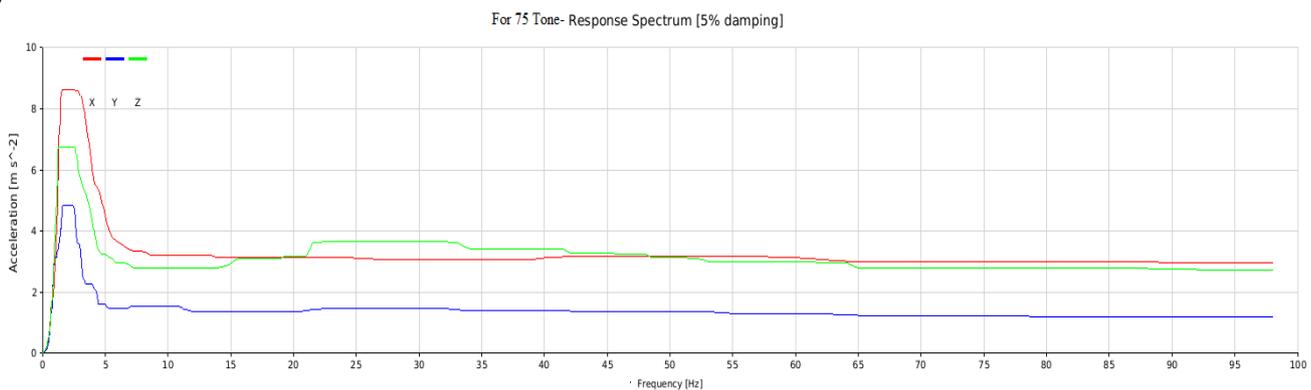


Рис. 8. График спектра отклика для 75 тонов
Fig. 8. Response Spectrum graph for 75 Tones

Максимальное ускорение для эффекта масс 75 тонн составило $8,35 \text{ м/с}^2$ в направлении X, $4,8 \text{ м/с}^2$ в направлении Y и $6,82 \text{ м/с}^2$ в направлении Z. Можно сказать, что с увеличением масс-эффекта максимальные ускорения уменьшаются. Но при разных значениях частот разница между ускорениями увеличивается еще больше.

Таблица 4. Ускорения, обусловленные массами на определенных частотах
 Table 4. Accelerations due to masses at certain frequencies

Частота (Гц)	25 тонн			50 тонн			75 тонн		
	X (м/с ²)	Y (м/с ²)	Z (м/с ²)	X (м/с ²)	Y (м/с ²)	Z (м/с ²)	X (м/с ²)	Y (м/с ²)	Z (м/с ²)
1	2,695	3,231	3,743	2,773	3,143	3,806	3,013	3,051	3,839
3	9,3	3,662	6,15	8,645	3,47	5,802	8,205	2,998	5,453
5	4,788	1,59	3,48	4,544	1,62	3,236	4,307	1,563	3,007
10	3,341	1,544	2,908	3,226	1,549	2,812	3,091	1,475	2,723
15	3,206	1,418	3,077	3,142	1,383	2,962	3,065	1,335	2,805
25	3,182	1,453	3,759	3,114	1,461	3,653	3,012	1,466	3,543
50	3,25	1,406	3,193	3,162	1,367	3,127	3,052	1,309	3,004
75	3,115	1,261	2,905	3,019	1,226	2,778	2,927	1,211	2,656
100	3,035	1,218	2,863	2,956	1,183	2,719	2,858	1,151	2,574

Как видно из табл.4, более высокие ускорения обычно наблюдались при эффектах малой массы. Однако при большой массе в 1 Гц, которую мы можем принять за первую реакцию, большее ускорение произошло в направлениях X и Z. Направления могут варьироваться в зависимости от составляющих действующей сейсмической силы. Однако, как только началось демпфирование, нестабильность исчезла, и ускорение под действием массы 75 тонн было ниже, чем при других эффектах массы. Чем выше значение масс-эффекта, тем выше исходные данные ускорения. Причина этого в том, что первая реакция на сейсмическую нагрузку прямо пропорциональна значению массы. Однако обычно это наблюдается только в начале спектра отклика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмические нагрузки, действующие на конструкции, создают спектры реакции в конструкциях. В этих спектрах реакции обычно возникают более высокие значения ускорения, чем ускорения сейсмических нагрузок, действующих на конструкцию. Причина этого в том, что спектры реакции ускорения дают сигнал землетрясения от земли до конструкции. Максимальное значение ускорения в спектре реакции можно назвать абсолютным значением ускорения, воздействующим на конструкцию.

Помимо спектров реакции на ускорение, есть также спектры реакции на скорость и смещение.

В этом исследовании были получены спектры ускорения сейсмической нагрузки, действующей на конструкцию, вместе с различными массовыми эффектами. Согласно полученным данным, максимальное значение ускорения в спектре отклика уменьшается по мере увеличения воздействия массы на конструкцию. Согласно полученным данным, в начале сейсмической нагрузки конструкция под воздействием большой массы вначале реагирует сильнее. Спектры отклика рассчитывались с пятипроцентным коэффициентом сброса.

В результате увеличение массового эффекта вызывает уменьшение максимального ускорения реакции, которое будет иметь место в конструкции, и гарантирует, что конструкция остается более жесткой против сейсмических нагрузок. Было определено, что массовый эффект и ускорение реакции обратно пропорциональны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salimi Firoozabad E., Jeon B.G., Choi H.S., Kim N.S. Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plants piping system // Nuclear Engineering and Design. 2015. Т. 284. С.264–279.
2. Varpasuo P. Seismic Design and Analysis of Nuclear Power Plant Structures. 2012.
3. Kubo T., Yamamoto T., Sato K., Jimbo M., Imaoka T., Umeki Y. Seismic design of nuclear reactor building structures applying seismic isolation system in a high seismicity region –a feasibility case study in Japan // Nuclear Engineering and Technology. 2014. Т. 46. № 5. С.581–594.
4. Nakamura N., Akita S., Suzuki T., Koba M., Nakamura S., Nakano T. Study of ultimate seismic response and fragility evaluation of nuclear power building using nonlinear three-dimensional finite element model // Nuclear Engineering and Design. 2010. Т. 240. № 1. С.166–180.
5. Whittaker A.S., Kumar M., Kumar M. Seismic isolation of nuclear power plants // Nuclear Engineering and Technology. 2014. Т. 46. № 5. С.569–580.
6. Çağlar N., Garip Z.Ş., Yaman Z.D. Deprem etkisindeki betonarme yapılarda yapı-zemin etkileşimi // Deprem Sempozyumu. 2005.
7. Черенков И.А. Прочность внутренних преднапряженных оболочек зданий реакторов атомных станций [электронный ресурс]: выпускная квалификационная работа магистра: 08.04.01 - Строительство; 08.04.01_20 -

Проектирование и расчет строительных конструкций и оснований / Санкт-Петербург. 2019. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/3/2019/vr/vr19-2108.pdf>

8. Wilson E.L., Kiureghian A. Der, Bayo E.P. A replacement for the SRSS method in seismic analysis // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1981. Т. 9. № 2. С.187–192.

9. Maison B.F., Neuss C.F., Kasai K. The comparative performance of seismic response spectrum combination rules in building analysis // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1983. Т. 11. № 5. С.623–647.

10. Sinha R., Igusa T. CQC and SRSS methods for non-classically damped structures // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1995. Т. 24. № 4. С.615–619.

ОБ АВТОРАХ

Омер Бугра Ташчи – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tascibugra@gmail.com

Талат Джан Талай – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: talaytalat@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Omer Bugra Tasci – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tascibugra@gmail.com

Talat Can Talay – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: talaytalat@gmail.com