

СЕЙСМИЧЕСКИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПЛОЩАДКИ В РАСЧЕТАХ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ФУНДАМЕНТ – СООРУЖЕНИЕ» ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Бауск Е.А., Довбнич М.М., Переяславец С.А., Загильский В.А.

Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры
г. Днепропетровск, Украина

АНОТАЦІЯ: Проведена оцінка сейсмічності майданчика та отримання спектрів відгуку на вільній поверхні, проведений аналіз сейсмостійкості будівлі підвищеної категорії відповідальності з урахуванням ефектів взаємодії основи і споруди.

АННОТАЦИЯ: Произведена оценка сейсмичности площадки и получение спектров ответа на свободной поверхности, произведен анализ сейсмостойкости здания повышенной категории ответственности с учетом эффектов взаимодействия основания и сооружения.

ABSTRACT: The estimation of seismic site and received a response spectra on the free surface is provided. The seismic stability of the critical facilities, taking into account the effects of soil structure interaction is analyzed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмичность площадки, взаимодействие системы «основания – фундамент – сооружение», кинематические параметры здания.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ и проектирование объектов АЭС требует решения ряда специфических задач, т. к. поведение сооружения при землетрясении обусловлено взаимодействием между тремя связанными системами: сооружением, фундаментом и грунтом, подстилающим и окружающим фундамент.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9 [13] для каждой АЭС должен быть проанализирован риск колебаний грунта, связанный с землетрясениями, данные исследования включают в себя работы по детальному и микросейсмическому районированию, которые являются исходными данными для дальнейшего анализа зданий и сооружений АЭС.

Изучением проблемы взаимодействия системы «основание – фундамент - сооружение» занимались такие ученые как В.А. Сахаров [5, 6], Ю. И. Немчинов [3, 4], Т. К. Датта [10], А. М. Уздин [8], А. Г. Тяпкин [7]

Анализ работы динамического взаимодействия системы «основание – фундамент - сооружение» для конструкций АЭС представлены в работах А. П. Кирилова [2] Дж. Вольфа [11], А. Н. Бирбраера [1].

При проектировании и строительстве массивных сооружений в районах с повышенной сейсмичностью, а также при анализе работоспособности элементов зданий повышенной категории ответственности, к которым относятся атомные электростанции, большое внимание уделяется сейсмостойкости сооружений. Наиболее существенным фактором, влияющим на сейсмостойкость сооружения, является интенсивность сейсмических воздействий в районе строительства. Не менее важным фактором является расчет зданий в системе "основание – сооружение", поскольку учет грунтового основания способствует получению более корректных результатов, что крайне важно для зданий и сооружений АЭС. Применение адекватных расчетных воздействий в численных моделях является первоочередным фактором, влияющим на адекватность полученных результатов.

В рамках данной работы производился анализ сейсмостойкости на примере реакторного отделения атомной электростанции.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9 [13] для каждой АЭС должен быть проанализирован риск колебаний грунта, связанный с землетрясениями. В рамках выполнения программы продления сроков эксплуатации энергоблоков ЗАЭС в 2011-2014 гг. был выполнен комплекс мероприятий по оценке сейсмической безопасности станции. Исследования включали в себя: работы по общему, детальному и микросейсмическому районированию; получение спектра ответа и расчетных акселерограмм на поверхности промплощадки, моделирующих сейсмическое событие уровня проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ); расчет сейсмостойкости и поэтажных спектров ответа с учетом эффектов взаимодействия с грунтовым основанием.

Указанные работы можно разделить на два этапа:

1) геолого-геофизические исследования по оценке сейсмичности площадки размещения АЭС;

2) инженерные расчеты на динамическое воздействие, сооружений АЭС.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛОЩАДКИ И ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТВЕТА НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9 [13] для каждой АЭС должен быть проанализирован риск колебаний грунта и сбросообразования, связанный с землетрясениями и геологическими явлениями. Следует проводить анализ и оценку геологических, геофизических и сейсмологических характеристик региона вокруг площадки, а также геотехнических характеристик территории площадки. Следует создать всеобъемлющую и интегрированную базу данных, содержащую геологическую, геофизическую, инженерно-геологическую и сейсмологическую информацию, необходимую для оценки и выработки решений по проблемам, касающимся всех видов риска, связанных с землетрясениями.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ SSG-9 [13] геолого-геофизические исследования проводились на четырех уровнях: региональном, субрегиональном, районе ближней зоны размещения площадки и территории самой промплощадки ЗАЭС, что обеспечило постепенное, более подробное исследование объекта.

Региональные работы включали: региональные сейсмологические, геофизические, тектонические, неотектонические и геоморфологические исследования с целью получения информации об общей сейсмологической и сеймотектонической обстановке в регионе, а также выявление и определение характеристик таких геологических особенностей, которые могут оказать влияние или быть связаны с сейсмической опасностью на площадке; построение региональной сеймотектонической модели региона, базирующейся на последовательной консолидации региональных баз данных, как основы для оценки сейсмичности района размещения ЗАЭС уровня ПЗ (период повторяемости 1 раз в 1000 лет) и МРЗ (период повторяемости 1 раз в 10 000 лет) для «средних» грунтовых условий.

Субрегиональные работы включали: геолого-геофизические, тектонические, неотектонические и геоморфологические исследования; закладка реперов и инструментальные геодезические наблюдения; субрегиональные полевые геофизические работы; оценка наведенной сейсмичности; оценка сейсмичности района размещения ЗАЭС уровня ПЗ (период повторяемости 1 раз в 1000 лет) и МРЗ (период повторяемости 1 раз в 10 000 лет) для «средних» грунтовых условий.

Исследования в районе ближней зоны размещения площадки и территории самой промплощадки ЗАЭС включали: геолого-геофизические, тектонические, неотектонические, геоморфологические и инженерно-

геологические исследования; полевые и скважинные геофизические работы; результаты заверочного бурения; сейсмическое микрорайонирование (СМР) комплексом методов; оценка сейсмичности района размещения ЗАЭС уровня ПЗ (период повторяемости 1 раз в 1000 лет) и МРЗ (период повторяемости 1 раз в 10 000 лет) с учетом локальных условий (по результатам СМР).

В ходе проведенных мероприятий была выполнена комплексная оценка сейсмической опасности площадки ЗАЭС для ПЗ и МРЗ в баллах шкалы EMS-98 и пиковых ускорений (непосредственно для промплощадки ЗАЭС для уровня ПЗ – 80...80 см/с², МРЗ – 110-115 см/с²).

Конечным результатом работ по оценке сейсмичности является синтетическая акселерограмма или набор реальных акселерограмм, максимально близких к ожидаемой.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ SSG-9 расчетные акселерограммы должны в удовлетворительной степени отражать все установленные параметры колебаний грунта. Количество временных диаграмм для подробного анализа и процедуры, используемой при составлении этих временных диаграмм, зависит от типа проводимого анализа.

В соответствии с нормативом РБ-06-98 существуют различные методы, которые могут использоваться, для разработки проектных акселерограмм, в зависимости от доступных данных. Во всех случаях эти акселерограммы должны быть совместимы с особенностями ожидаемого землетрясения, амплитудами и спектральными формами спектров реакции и продолжительности предполагаемого колебания грунта.

Сейсмические воздействия в зависимости от степени изученности сейсмотектонических и грунтовых условий площадки могут быть определены любым из методов или несколькими методами одновременно.

Близкие по сути методы регламентируются рекомендациями МАГАТЭ SSG-9.

Процедура получения спектра ответа и акселерограмм на поверхности грунта промплощадки является финалом первого этапа исследований, и в условиях ЗАЭС сводилась к следующим пунктам:

- 1) анализ и сравнение стандартных спектров ответа, приведенных в нормативных документах, и спектров ответа, рассчитанных на основании NGA моделей для события уровня МРЗ из удаленной зоны (зона Вранча) и местной зоны (Конкский разлом);

- 2) учет локальных резонансных условий, обусловленных особенностями геологического строения и физическими свойствами разреза промплощадки ЗАЭС, для различных спектров ответа;

- 3) построение обобщенного спектра ответа;

- 4) генерация трехкомпонентных синтетических акселерограмм.

Обобщенные спектры приводятся в большинстве строительных норм. Эти спектры в широком диапазоне частот имеют устойчивый уровень и позволяют избежать необоснованного занижения (или завышения) сейсмических воздействий в отдельных интервалах частотного диапазона. Обычно, спектры ответа представлены в нормативах в виде спектров коэффициентов динамичности β .

Наряду со спектрами из нормативов, в последнее десятилетие широкое применение получили подходы расчета спектров ответа, разработанные в рамках проекта NGA [9], [14], [15]. Данные расчеты позволяют смоделировать спектры ответа для сейсмического события в некоторой заданной точке с учетом конкретной сейсотектонической ситуации региона исследований.

Это особенно актуально в условиях слабой сейсмичности Восточно-Европейской платформы и Украинского Щита, в частности. Для площадки ЗАЭС получение записи события уровня МРЗ и даже ПЗ оказывается маловероятным в реальные временные сроки. Записи же слабых событий имеют существенно иные спектры ответа.

На основании выполненного сопоставления было принято решение использовать для дальнейших расчетов четыре спектра, которые, с одной стороны, удовлетворяют нормативным спектрам, а с другой – моделируют спектры ответа для события уровня МРЗ из удаленной зоны (зона Вранча) и местной зоны (Конкский разлом). Для этих спектров были сгенерированы наборы акселерограмм.

Оценка влияния толщи осадочных пород на трансформирование сейсмического сигнала осуществлялась пересчетом акселерограммы со «скалы» (кристаллического фундамента) на дневную поверхность. Расчеты выполнялись с использованием программы SHAKE. В ходе вычислений определяется передаточная функция среды (частотная характеристика среды) для случая нормального падения плоской поперечной волны на горизонтально-слоистую толщу. В условиях многометровой осадочной толщи в районе промплощадки ЗАЭС расчеты выполнялись в рамках нелинейной неупругой среды.

Обобщенный спектр строился как огибающая всех спектров с учетом локальных резонансных условий. На рисунке 1 представлен обобщенный спектр коэффициентов динамичности β , построенный по спектрам ответа после учета локальных резонансных условий промплощадки ЗАЭС.

Обобщенный спектр использовался для генерации синтетических трехкомпонентных акселерограмм.

Генерация осуществлялась с учетом требований норматива РБ-06-98. Амплитуды горизонтальных компонент акселерограмм принимались

равными, амплитуда вертикальной компоненты, согласно нормативу НП-031-01 и РБ-06-98 равна 2/3 от горизонтальной.

Согласно результатам оценки сейсмичности площадки ЗАЭС, горизонтальные компоненты акселерограмм, моделирующих событие уровня МРЗ, нормировались на 115 см/с^2 , вертикальные на 77 см/с^2 .

Для акселерограмм, моделирующих событие уровня ПЗ, горизонтальные компоненты нормировались на 85 см/с^2 , вертикальные на 57 см/с^2 .

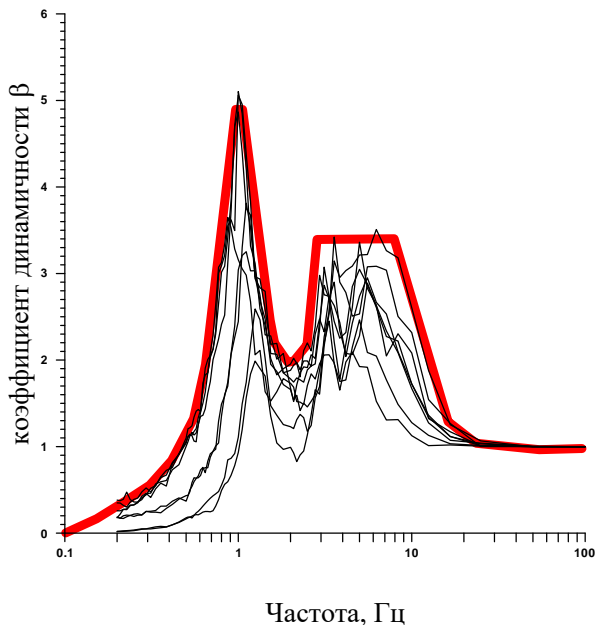


Рис. 1. Обобщенный спектр коэффициентов динамичности β ($\delta = 5\%$) на свободной поверхности промплощадки ЗАЭС

На основании предыдущего этапа, а именно полученного спектра ответа и акселерограмм на поверхности грунта промплощадки ЗАЭС, произведен анализ сейсмостойкости зданий и сооружений энергоблоков № 1, 2 ОП ЗАЭС

Анализ сейсмостойкости зданий и сооружений с учетом взаимодействия с грунтовым основанием был разделен на четыре этапа:

- 1) построение конечно-элементной модели;
- 2) расчет эквивалентных динамических характеристик основания, для учета взаимодействий в системе «сооружение-основание»;

- 3) разработка динамической модели здания с целью получения расчетных воздействий на уровне подошвы фундамента конструкции;
- 4) получение кинематических параметров здания и расчет сейсмостойкости конечно-элементной модели.

ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Методология получения поэтажных спектров ответа в точках внутри конструкции предусматривает решение задачи вычисления истории изменения ускорений в данных точках. Эта задача решается путем построения численной конечно-элементной модели сооружения и дальнейшего её анализа методом конечных элементов путем прямого интегрирования уравнений движения элементов численной модели (прямой динамический анализ).

Расчетная схема представляет собой идеализированную модель конструкции. Модель разбивается на конечные элементы. В результате такой разбивки формируются узлы конечно-элементной задачи. Элементы и узлы схемы нумеруются. В опорные узлы вводятся соответствующие связи (запрет перемещений по каким-либо степеням свободы, либо ограничение перемещений узла конечными элементами, моделирующими работу связи). Нумерация узлов и элементов определяет последовательность задания исходной информации на входном языке и чтение результатов счёта. Конечные элементы, имеющие одинаковые жёсткостные характеристики, объединены в типы жесткости.

В качестве основных источников информации, необходимых для построения расчетной конечно-элементной модели (в частности, сведения о конструктивной схеме и характеристиках материалов конструктивных элементов) использовалась техдокументация на строительные конструкции. Построение конечно – элементной модели производилось в среде расчетного комплекса Robot Structural Analysis Professional 2013 (RSA Pro 2013).

РАСЧЕТ ОБОБЩЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВАНИЯ

Суть разработанных на данный момент математических моделей грунтового основания заключается в его представлении в виде некоторой системы эквивалентных пружин и демпферов, жесткость и вязкость которых описывается в численном виде или экспериментально апробированные для различных грунтов коэффициентами.

При определении расчетных характеристик грунтовой среды необходимо учитывать такие важные свойства грунтов как инерционность, демп-

фирующие свойства и др., которые осуществляют существенное влияние на колебания фундаментов при сейсмическом воздействии.

Для наглядного представления процессов взаимодействия основания и сооружения используются два типа простейших одномерных деформированных элементов, таких как упругий элемент и вязкий элемент. Эти элементы можно соединять в различных сочетаниях, описывающих различные проявления упруго-вязких свойств грунта.

Так как работы Дж. Газетаса считаются эталонными в области динамического взаимодействия основания и сооружения, в данной работе принят метод эквивалентных динамических характеристик основания, определяемых по методике, предложенной проф. Дж. Газетасом [12].

Данный метод представляет собой совокупность пружин и демпферов, присоединенных к фундаментной плите и характеризующих жесткость и рассеивание энергии в основании. В данном случае их двенадцать: шесть пружин, задающих жесткости при поступательных и вращательных перемещениях фундамента по трем осям, и шесть соответствующих демпферов.

Расчет обобщенных характеристик основания производился с учетом особенностей массива грунта.

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЯ

В рамках данного этапа работ была произведена разработка динамической модели конструкции с целью получения расчетных воздействий на фундаменте конструкции. Динамическая модель служит для учета взаимодействия в системе «основание - сооружение» и получения результирующих записей расчетных воздействий с учетом данных взаимодействий.

Для получения расчетных акселерограмм был произведен анализ взаимодействия в системе "грунт – конструкция". Данный анализ производился путем наложения полученных обобщенных параметров основания на разработанную динамическую модель здания, эквивалентную по массе и частоте реальной рассматриваемой системе.

Результатом выполнения данного этапа работ является получение расчетных акселерограмм на уровне подошвы фундамента с учетом эффектов взаимодействия сооружения с основанием (0).

ПОЛУЧЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗДАНИЯ И РАСЧЕТ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Расчет конечно-элементной модели проводился путем прямого динамического анализа в расчетном комплексе RSA. Для этого к модели прикладывались нагрузки, моделирующие сейсмическое воздействие

заданной интенсивности в трех направления (x, y, z). Исходными данными являлись акселерограммы в уровне подошвы фундамента полученные на этапе анализа взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение».

В результате расчета были получены кинематические параметры здания, деформации, внутренние усилия элементов конструкций рассматриваемого здания.

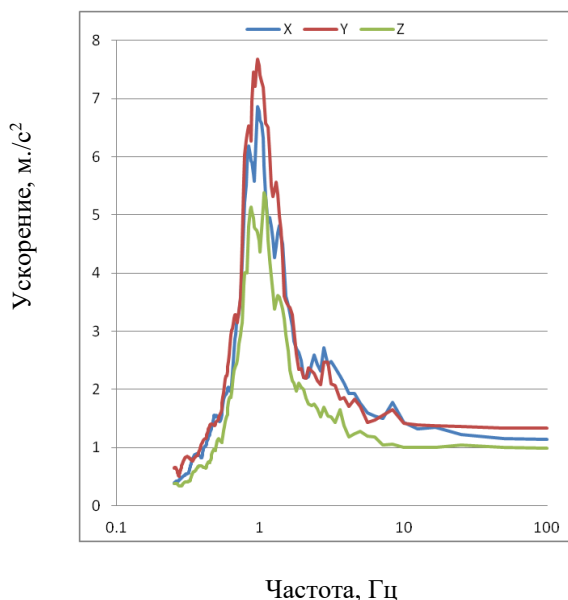


Рис. 2. Откорректированное сейсмическое воздействие на уровне подошвы фундамента

ВЫВОДЫ

В ходе исследования была произведена оценка сейсмичности площадки и получение спектров ответа и соответствующих им акселерограмм на свободной поверхности, вычислены кинематические параметры здания, деформации и усилия рассматриваемого здания с учетом эффектов взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение». В данных исследованиях реализована методика моделирования эквивалентных динамических характеристик основания. Показано, что для корректной оценки сейсмостойкости сооружений необходим учет их взаимодействия с основанием в процессе сейсмических колебаний, т. к.

при прохождении воздействия через грунтовую толщу существенно изменяется характер сейсмического воздействия. Произведен анализ внутренних усилий и напряжений, возникающих в элементах конструкций реакторного отделения в системе «грунтовое основание – сооружение» при сейсмическом воздействии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – Санкт-Петербург : Наука, 1998. – 255 с.
2. Кириллов А. П. Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках [Текст] / А. П. Кириллов, В. В. Крылов, А. Е. Саргсян. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 214 с.
3. Немчинов Ю.И. Особенности строительства в сейсмических районах Украины и совершенствование норм проектирования зданий и сооружений Ю.И. Немчинов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – К., 2000. - №1. - С.8 - 15.
4. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик / под. ред. Ю.И. Немчинова. ГП НИИСК. – К., 2012. - 384 с.
5. Сахаров В.А. Взаимодействие конструкций Зимненского монастыря с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В.А. Сахаров. – Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - № 6 (7), 2014. – С.18-23.
6. Сахаров В.А. Взаимодействие инженерных конструкций с нелинейным основанием при сейсмических нагрузках : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.02 «Основание и фундаменты» / В.А. Сахаров ; КНУСА. – Киев, 2015. – 41с.
7. Тяпкин А. Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием / А. Г. Тяпкин – Москва: АСВ, 2013. – 392 с.
8. Уздин А. М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А. М. Уздин, Т. А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. – Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1993. – 176 с.
9. Comparisons of the NGA ground-motion relations / N. Abrahamson, G. Atkinson, D. Boore, Y. Bozognia, K. Campbell, B. Chiou, I. Idriss, W. Silva, R. Youngs // Earthquake Spectra. – 2008. – Vol. 24, №1. – P. 45-66.
10. Datta T. K. Seismic analysis of structures. – Singapore : Print Media Pte Ltd, 2010 – 473 p.
11. Dynamic soil structure interaction / ed. John P. Wolf –New Jersey, 1985. – 466 p.

12. Hsai-Yang Fang. Foundation engineering handbook / ad. by Hsai-Yang Fang. – London: Chapman and Hall, 1990. – 923 p.
13. Safety Guides SSG-9 / International atomic energy agency, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. – Vienna, 2010.
14. Silva W. J. Site response simulations for the NGA project. Report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center. – 2008.
15. Stafford P.J., Strasser F.O., Bommer J.J. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 149-177.

REFERENCES

1. Birbraer, A. N. Structural analysis of seismic stability. – Saint-Petersburg : Nauka, 1998. – 255 p.
2. Kirillov A. P., Krylov V. V. Soil structure interaction of NPP under dynamic impact. – M.: Energoatomizdat, 1984. - 214 p.
3. Nemchinov Y. I. Features of the construction in seismic regions of Ukraine and improvement of standards for design buildings and structures. Seismic construction. Security facilities. – K., 2000. - №1. - P.8-15.
4. Designing buildings with a predetermined level to ensure seismic resistance / Y. I. Nemchinov, N. G. Marenkov, A. K. Khavkin, K. N. Babik / ed. Y. I. Nemchinov. Institute of building Constructions. – K., 2012. - 384 p.
5. Sakharov V. A. Interaction of the zimnensky monastery cathedral with the soil base under seismic loads. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 6 (7). (2014). – P.18-23.
6. Sakharov V. A. Interaction of engineering structures with non-linear basis under seismic loads : abst. dissert. Dr. Sc. (Tech) : 05.23.02 «Bases and foundations» / V. A. Sakharov ; KNUCA. – Kyiv, 2015. – 41c.
7. Tyapkin A. G. Calculation of seismic effects on structures, taking into account the interaction with the soil foundation. – Moscow: ACB, 2013. - p. 392.
8. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Nasser Amin Samih Mohomad. Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-proof construction of buildings and structures. - St. Petersburg: Izd VNIIG. Vedeneev, 1993. - 176 p.
9. Comparisons of the NGA ground-motion relations / N. Abrahamson, G. Atkinson, D. Boore, Y. Bozognia, K. Campbell, B. Chiou, I. Idriss, W. Silva, R. Youngs // Earthquake Spectra. – 2008. – Vol. 24, №1. – P. 45-66.
10. Datta T. K. Seismic analysis of structures. – Singapore : Print Media Pte Ltd, 2010 – 473 p.
11. Dynamic soil structure interaction / ed. John P. Wolf –New Jersey, 1985. – 466 p.
12. Hsai-Yang Fang. Foundation engineering handbook / ad. by Hsai-Yang Fang. – London: Chapman and Hall, 1990. – 923 p.

13. Safety Guides SSG-9 / International atomic energy agency, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. – Vienna, 2010.
14. Silva W. J. Site response simulations for the NGA project. Report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2008.
15. Stafford P.J., Strasser F.O., Bommer J.J. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 149-177.

Статья поступила в редакцию 10.08.2016 г.