

УДК 624.15, 624.042.7

## УЧЕТ ОСНОВАНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЛОЩАДКИ ПРИ АНАЛИЗЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

СЕДИН В. Л.<sup>1\*</sup>, *д. т. н, проф.*,  
БАУСК Е. А.<sup>2\*</sup>, *с. н. с, зав. лаб. ЛИАТЕ,*  
ДОВБНИЧ М. М.<sup>3\*</sup>, *д. геол. н, проф.*,  
ЗАГИЛЬСКИЙ В. А.<sup>4\*</sup>, *м. н. с., асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: yabausk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0504-1891

<sup>3\*</sup> Кафедра геофизических методов разведки, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Карла Маркса, 19, 49005, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-90-11, e-mail: dovbnichm@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9634-7444

<sup>4\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: zagilsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

**Аннотация.** *Постановка проблемы.* Обеспечение безопасной эксплуатации атомных электростанций, а также безопасности персонала и окружающей среды - чрезвычайно важная задача. Отличительной особенностью этой проблемы является необходимость обеспечения не только прочности конструкций, но и надежного функционирования всех систем, которые осуществляют контроль ядерного процесса. В частности, необходимо учитывать влияние землетрясения на конструкции зданий и сооружений АЭС с учетом их взаимодействия с грунтовым основанием. Согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9, для каждой АЭС должен быть проанализирован риск колебаний грунта, связанный с землетрясениями, что означает исследования, включающие в себя работы по общему, детальному и микросейсмическому районированию площадки. Одной из отличительных особенностей рассматриваемой проблемы является оценка сейсмичности площадки и получение спектров ответа на свободной поверхности. **Цель работы.** Определение сейсмостойкости зданий повышенной категории ответственности на примере реакторного отделения Запорожской АЭС с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. **Вывод.** В ходе исследования произведена оценка сейсмичности площадки и получены спектры ответа на свободной поверхности, выполнен анализ сейсмостойкости здания повышенной категории ответственности с учетом эффектов взаимодействия основания и сооружения. В процессе исследования рассмотрена и реализована методика моделирования эквивалентных динамических характеристик основания при сейсмических воздействиях.

**Ключевые слова:** *оценка сейсмичности площадки, спектры ответа, взаимодействие основания и сооружения, сейсмостойкость, сейсмическое воздействие, динамическая модель, RSA Pro 2013*

## УРАХУВАННЯ ОСНОВИ І СЕЙСМІЧНИХ УМОВ МАЙДАНЧИКА ДЛЯ АНАЛІЗУ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ РЕАКТОРНОГО ВІДДІЛЕННЯ

СЕДИН В. Л.<sup>1\*</sup>, *д. т. н, проф.*,  
БАУСК Є. А.<sup>2\*</sup>, *с. н. с, зав. лаб. ЛДАТЕ,*  
ДОВБНИЧ М. М.<sup>3\*</sup>, *д. геол. н, проф.*,  
ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.<sup>4\*</sup>, *м. н. с., асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: yabausk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0504-1891

<sup>3\*</sup> Кафедра геофізичних методів розвідки, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Карла Маркса, 19, 49005, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-90-11, e-mail: dovbnichm@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9634-7444

<sup>4\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: zagilsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

**Анотація. Постановка проблеми.** Гарантування безпечної експлуатації атомних електростанцій, а також безпеки персоналу і навколишнього середовища - надзвичайно важливе завдання. Відмінною особливістю цієї проблеми є необхідність забезпечення не тільки міцності конструкцій, а й надійного функціонування всіх систем, які здійснюють контроль ядерного процесу. Зокрема, необхідно брати до уваги вплив землетрусу на конструкції будівель і споруд АЕС з урахуванням їх взаємодії з ґрунтовою основою. Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ SSG-9, для кожної АЕС має бути проаналізований ризик коливань ґрунту, пов'язаний із землетрусами, що означає дослідження, які включають у себе роботи із загального, детального і мікросейсмічного районування майданчика. Одна з відмінних особливостей розглянутої проблеми - оцінювання сейсмічності майданчика і отримання спектрів відгуку на вільній поверхні. **Мета роботи.** Визначення сейсмостійкості будівель підвищеної категорії відповідальності на прикладі реакторного відділення Запорізької АЕС з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою. **Висновок.** У ході дослідження проведено оцінювання сейсмічності майданчика та отримано спектри відгуку на вільній поверхні, виконано аналіз сейсмостійкості будівлі підвищеної категорії відповідальності з урахуванням ефектів взаємодії основи і споруди. У процесі дослідження розглянуто і реалізовано методику моделювання еквівалентних динамічних характеристик основи за сейсмічних впливів.

**Ключові слова:** оцінювання сейсмічності майданчика, спектр відповіді, взаємодія основи і споруди, сейсмостійкість, сейсмічний вплив, динамічна модель, RSA Pro 2013

## CONSIDERATION OF FOUNDATION AND SEISMIC CONDITIONS OF AREA IN ANALYSIS OF SEISMIC RESISTANCE OF REACTOR COMPARTMENT

SEDIN V. L.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech), Prof.*,

BAUSK E. A.<sup>2\*</sup>, *senior reseach., head of lab. Laboratory of research of nuclear and thermal power plant,*

DOVBNICH M. M.<sup>3\*</sup>, *Dr. Sc. (Geol), Prof.*,

ZAGIL'SKIY V. A.<sup>4\*</sup>, *junior reseach., postgraduate.*

<sup>1</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Education Establishment «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Education Establishment «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: yabausk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0504-1891

<sup>3\*</sup> Department of Geophysics, State Higher Education Establishment «National Mining University», 19, Karl Marks av., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine tel. +38 (0562) 46-90-11, e-mail: dovbnichm@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9634-7444

<sup>4\*</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Education Establishment «Pridneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: zagilsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

**Summary. Problem statement.** Providing of safe exploitation of nuclear power plants, as well as a safety of staff and environment is a very important problem. A distinct feature of this problem is a necessity to provide not only a strength of structures, but also a safe functioning of all systems that control nuclear process. In particular, the influence of earthquake should be considered on constructions of buildings and structures of nuclear and thermal power plant, taking into account soil-structure interaction. According to IAEA's SSD-9 recommendations, a risk of vibration of soil should be analyzed for each NPP connected with earthquakes soil that means researches, including general, detailed and microseismic zoning of the area works. One of the distinctive features of the considered problem is an evaluation of the seismicity of area and getting the response spectrum on the free surface. **Purpose.** Determination of seismic resistance of buildings of high category of safety with the example of the reactor compartment of Zaporoghskaya NPP including the soil structure interaction. **Conclusion** The seismicity assessment of the area and obtaining of response specters on free surface was made during research and analysis of seismic resistance of buildings of high category of safety including the effects of foundation and structures. The method of modeling of the equivalent dynamic characteristics of the base was considered during the research in seismic impacts.

**Key words:** Evaluation of seismicity areas, response spectrum, interaction of foundation and structures, seismicity, seismic impact, dynamic model, RSA Pro 2013

**Постановка проблеми.** Обеспечение безопасной эксплуатации атомных электростанций, а также безопасности персонала и окружающей среды – чрезвычайно важная

задача. Отличительной особенностью этой проблемы является необходимость обеспечения не только прочности конструкций, но и надежного функционирования всех сис-

тем, которые осуществляют контроль ядерного процесса. В частности, необходимо учитывать влияние землетрясения на конструкции зданий и сооружений АЭС с учетом их взаимодействия с грунтовым основанием.

**Анализ публикаций.** Многие исследователи, как в нашей стране, так и за рубежом, занимаются проблемой сейсмического анализа сооружений повышенной категории ответственности. Проблеме учета грунтового основания при анализе сейсмостойкости уделяется значительное внимание, в частности, исследования влияния грунтового основания рассмотрены в работах Т. К. Датта, А. М. Уздина [7], А. Г. Тяпкина [5].

Анализ взаимодействия системы «грунтовое основание – фундамент – сооружение» при сейсмических воздействиях для зданий атомных электростанций представлен в работах Дж. Вольфа [9], А. Н. Бирбраера [1].

**Цель статьи.** Определение сейсмостойкости зданий повышенной категории ответственности на примере реакторного отделения Запорожской АЭС с учетом взаимодействия с грунтовым основанием.

**Изложение материала.** Жесткие требования по безопасности атомных электростанций должны выполняться во всех предусмотренных нормативными документами условиях, в том числе в условиях сейсмического воздействия, что определяется надежностью работы систем и элементов. При проектировании и строительстве таких объектов необходимо обеспечить сейсмостойкость не только всех сооружений, но и прилегающих к строительству коммуникаций и оборудования, что требует решения ряда специфических задач. Одной из таких задач является решение проблемы взаимодействия фундамента с грунтовым основанием, которая занимает одно из центральных мест в общей теории сейсмостойкости. 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 сейсмостойко-

сти сооружений. Наиболее существенным фактором, влияющим на сейсмостойкость сооружения, является интенсивность сейсмических воздействий в районе строительства. Не менее важен расчет зданий в системе «основание – сооружение», поскольку учет грунтового основания способствует получению более корректных результатов, что крайне важно для зданий и сооружений АЭС. Создание наиболее точной расчетной модели, в частности с учетом основания, является первоочередным фактором, влияющим на адекватность полученных результатов. В соответствии с [1], расчетные модели зданий и сооружений должны наиболее точно отражать характер их взаимодействия с грунтовым основанием.

В рамках данной работы производился анализ сейсмостойкости на примере реакторного отделения № 1 Запорожской атомной электростанции.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9 [11], 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 (МПЗ); 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 зданий, сооружений и оборудования АЭС.

**Оценка сейсмичности площадки и получение спектров ответа на свободной**

**поверхности.** В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ SSG-9 [11] 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.

Геолого-геофизические работы по оценке сейсмичности площадки размещения ЗАЭС включали: сейсмологические, геофизические, инженерно-геологические, тектонические, неотектонические и геоморфологические исследования различных масштабов с целью оценки сейсмичности района размещения ЗАЭС уровня ПЗ (период повторяемости один раз в 1000 лет) и МРЗ (период повторяемости один раз в 10 000 лет) с учетом локальных условий.

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 –  $80\text{--}80\text{ см/с}^2$ , МРЗ –  $110\text{--}115\text{ см/с}^2$ ).

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.

Остановимся на получении спектров ответа более подробно, так как именно эта процедура представляет наибольший интерес для инженеров-проектировщиков, вы-

полняющих дальнейшие расчеты на динамические воздействие зданий, сооружений и оборудования АЭС.

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  $\beta$ .

Наряду со спектрами из нормативов, в последнее десятилетие широкое применение получили подходы расчета спектров ответа, разработанные в рамках проекта NGA [8], [13]. Данные расчеты позволяют смоделировать спектры ответа для сейсмического события в некоторой заданной точке с учетом конкретной сеймотектонической 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.

Результаты сопоставления спектров коэффициентов динамичности  $\beta$  согласно моделям NGA и стандартных спектров коэффициентов динамичности  $\beta$  по различным строительным нормам представлены на рисунке 1.

На основании выполненного сопоставления было принято решение использовать для дальнейших расчетов четыре спектра (рис. 2), 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 спектров ответа, показанных на рисунке 2, были сгенерированы наборы акселерограмм. В случае заданного спектра ответа акселерограмма может быть сгенерирована с учетом известных алгоритмов, например [3]. При этом получают синтетическую ак-

селерограмму со случайной фазой (фазовые углы представляют собой равномерно распределенные в интервале от 0 до  $2\pi$  случайные величины).

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 основу работы алгоритма положен метод решения Канаи волнового уравнения и алгоритмы быстрого Фурье-преобразования. В ходе вычислений определяется передаточная функция среды (частотная характеристика среды) для случая нормального падения плоской поперечной волны на горизонтально-слоистую толщ. В условиях многометровой осадочной толщи в районе промплощадки ЗАЭС расчеты выполнялись в рамках нелинейной неупругой среды. Передаточная функция среды для территории промплощадки ЗАЭС, рассчитанная с учетом реальных геологических условий и скоростной модели по данным скважинной сейсморазведки, показана на рисунке 3. Вид передаточной функции среды определяет особенности спектра колебаний на поверхности грунтовой толщи. Так, резонансным максимумам соответствуют области усиления в спектре ответа.

Примеры сопоставления спектров коэффициентов динамичности до и после учета локальных резонансных условий под промплощадкой ЗАЭС представлены на рисунке 4. Как видно из графика передаточной функции среды, основной резонансный максимум соответствует частоте 1 Гц, на этой же частоте имеется максимум в спектре ответа после пересчета акселерограммы со «скалы» на поверхность грунтовой толщи.

Обобщенный спектр строился как огибающая всех спектров с учетом локальных резонансных условий. На рисунке 5 представлен обобщенный спектр коэффициентов динамичности  $\beta$ , построенный по спектрам ответа после учета локальных резонансных условий промплощадки ЗАЭС.

Сопоставление со спектрами коэффициентов динамичности различной вероятности

непревышения показывает, что обобщенный спектр для всего диапазона частот более консервативен, чем спектр с 84 % вероятностью непревышения, что удовлетворяет требованиям норматива НП-031-01 [2].

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 нормативам 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  $115 \text{ см/с}^2$ , вертикальные на  $77 \text{ см/с}^2$ .

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

На основании предыдущего этапа, а именно полученного спектра ответа и акселерограмм на поверхности грунта промплощадки ЗАЭС, произведен анализ сейсмостойкости здания реакторного отделения № 1 с учетом взаимодействия с грунтовым основанием.

Анализ сейсмостойкости здания реакторного отделения № 1 с учетом взаимодействия с грунтовым основанием был разделен на четыре этапа:

1) построение конечноэлементной модели реакторного отделения типа ВВЭР-1000;

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) расчет сейсмостойкости конечноэлементной модели реакторного отделения на сейсмическое воздействие, полученное на основании предыдущих этапов.

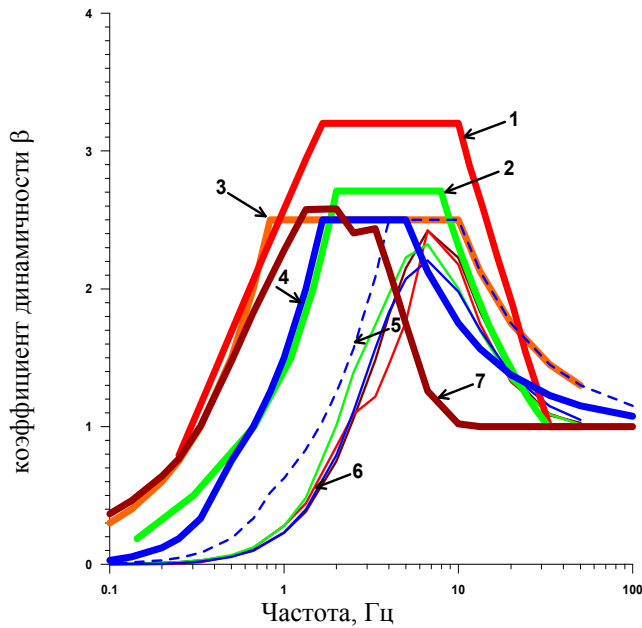


Рис. 1. Сопоставление стандартных спектров коэффициентов динамичности  $\beta$  ( $\delta = 5\%$ ) и спектров коэффициентов динамичности  $\beta$  ( $\delta = 5\%$ ) согласно моделям NGA: 1 - НП-031-01; 2 - NUREG/CR-0098; 3 - ДБН В.1.1-12:2006; 4 - Eurocode 8 (для  $M \geq 5,5$ ); 5 - Eurocode 8 (для  $M < 5,5$ ); 6 - модели NGA, рассчитанные для местной «Конкской» зоны ВОЗ; 7 - модель NGA, рассчитанная для удаленной зоны ВОЗ «Вранча»

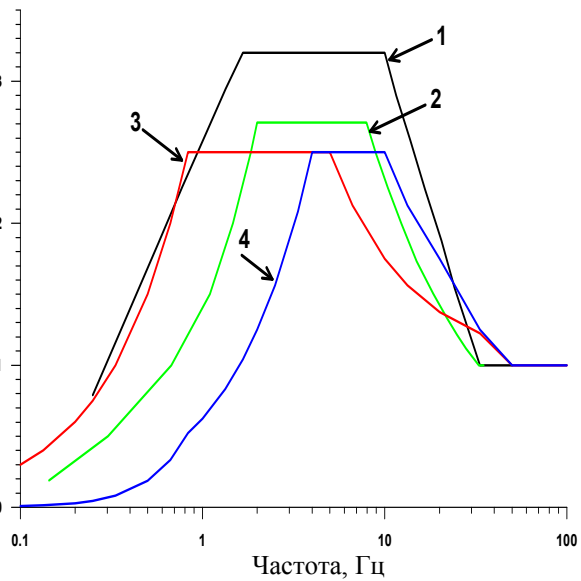


Рис. 2. Спектры коэффициентов динамичности  $\beta$  ( $\delta = 5\%$ ), использованные для генерации акселерограмм: 1 - НП-031-01; 2 - NUREG/CR-0098; 3 - удаленная зона ВОЗ; 4 - местная зона ВОЗ

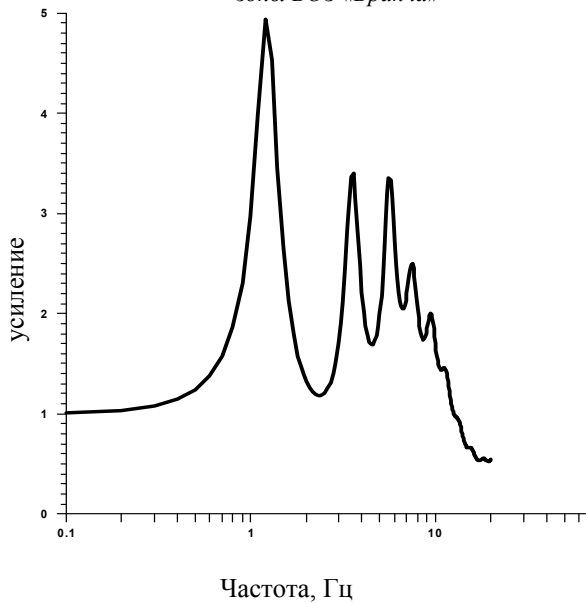


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика среды в пределах промплощадки ЗАЭС (неупругая нелинейная модель среды)

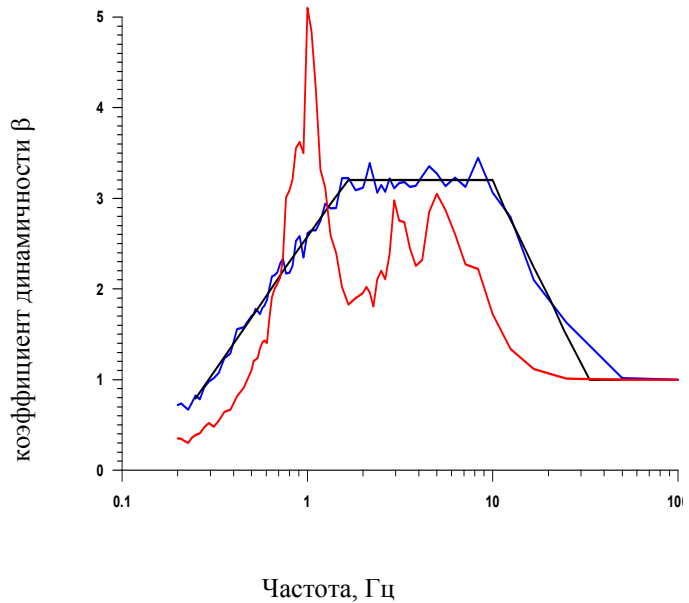


Рис. 4. Пример трансформации спектра коэффициентов динамичности  $\beta$  (по НП-031-01,  $\delta = 5\%$ ) после учета локальных условий в пределах промплощадки ЗАЭС

**Построение конечноэлементной модели реакторного отделения № 1 Запорожской АЭС.** В качестве основных источников информации, необходимых для построения расчетной конечноэлементной модели реакторного отделения № 1 Запорожской АЭС (в частности, сведения о кон-

структивной схеме и характеристиках материалов конструктивных элементов), использовалась техдокументация на строительные конструкции энергоблока № 1. Построение конечноэлементной модели производилось в среде расчетного комплекса Robot Structural Analysis Professional 2013 (RSA Pro 2013).

При моделировании использовался принцип построения более общей т. н. геометрической модели сооружения, состоящей из элементов более высокого порядка. Нагрузки, связи и свойства материалов и элементов накладывались на геометрическую модель, на основании которой препроцессором генерировалась КЭ модель. Конечноэлементная модель реакторного отделения № 1 Запорожской АЭС представлена на рисунке .б.

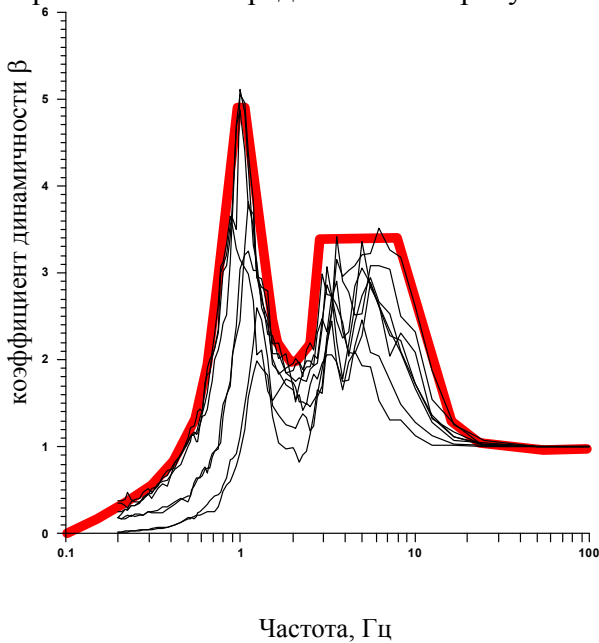


Рис. 5. Обобщенный спектр коэффициентов динамичности  $\beta$  ( $\delta = 5\%$ ) на свободной поверхности промплощадки ЗАЭС

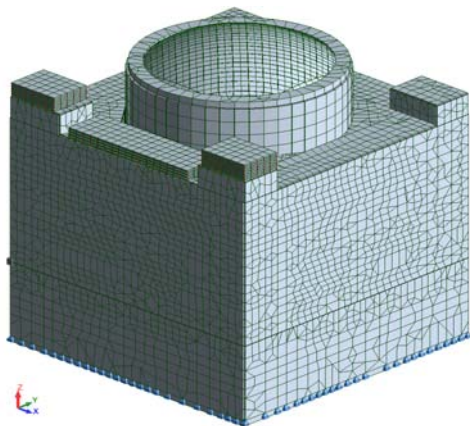


Рис. 6. Конечноэлементная модель реакторного отделения № 1 Запорожской АЭС. Общий вид

**Расчет обобщенных динамических характеристик основания.** В рамках данной работы в качестве рабочего метода моделирования взаимодействия основания и сооружения принят метод эквивалентных

динамических характеристик основания, определяемых по методике, предложенной проф. Дж. Газетасом [10].

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. Для определения эквивалентных динамических характеристик основания по методике Дж. Газетаса подход представлен в виде простых алгебраических формул и безразмерных графиков, охватывающих широкий диапазон возможных характеристик геометрии фундамента.

Расчет обобщенных характеристик основания производился с учетом особенностей массива грунта (глубина заложения фундамента и физико-механические свойства грунта под подошвой фундамента). Результаты расчета эквивалентных динамических характеристик основания сведены в таблицу.

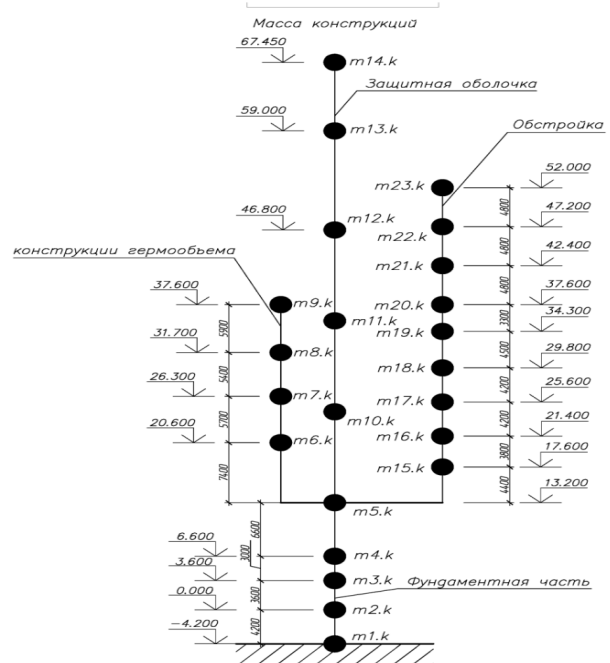


Рис. 7. Стержневая расчетная динамическая модель реакторного отделения

**Разработка динамической модели сооружения.** В соответствии с целями исследова-

дования (определение сейсмостойкости сооружения с учетом взаимодействия с основанием), для дальнейшего расчета трехмерной КЭ модели здания необходимо определить расчетное сейсмическое воздействие на уровне подошвы фундамента со-

оружения с учетом эффектов взаимодействия сооружения с основанием. Для этого, согласно требованиям [4] и рекомендациям [1; 7], была создана упрощенная расчетная конечноэлементная динамическая модель здания (рис.7).

Таблица

Эквивалентные динамические характеристики основания реакторного отделения № 1 Запорозькой АЭС

Направление колебаний	Эквивалентные жесткости	Эквивалентные затухания
Горизонтальные	$K_x = 29300000$ , кН/м $K_y = 29300000$ , кН/м	$C_x = 2759900$ , кНс/м $C_y = 2759900$ , кНс/м
Вертикальные	$K_z = 36200000$ , кН/м	$C_z = 4255400$ , кНс/м
Качание в вертикальной плоскости	$K_t = 47284000000$ , кНм	$C_t = 1030451000$ , кНсм
Поворот в горизонтальной плоскости	$K_{rx} = 28359500000$ , кНм $K_{ry} = 28359500000$ , кНм	$C_{rx} = 741907200$ , кНсм $C_{ry} = 741907200$ , кНсм

Динамическая модель представлена в виде четырех стержней с массами переменной жесткости, моделирующих основные составные части здания реакторного отделения: защитную оболочку, обстройку, конструкции гермообъема и фундаментную часть (рис.7).

В качестве сосредоточенных масс, приложенных в уровне перекрытий, принимались: масса самих перекрытий, масса оборудования, масса части здания между перекрытиями и вертикальные статические нагрузки (снег, технологические и т. п.).

Для получения расчетных акселерограмм был выполнен 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 (расчетной схеме конструкции), и получение откорректированного сейсмического воздействия для рассматриваемой системы на уровне подошвы фундамента конструкции (рис.8).

Данный расчет позволил учесть эффекты взаимодействия модели с основанием, причем прохождение сейсмического воздействия через сжимаемую среду с учетом геофизических условий площадки учитывалось путем использования в качестве исходных данных сейсмического воздействия на уровне свободной поверхности.

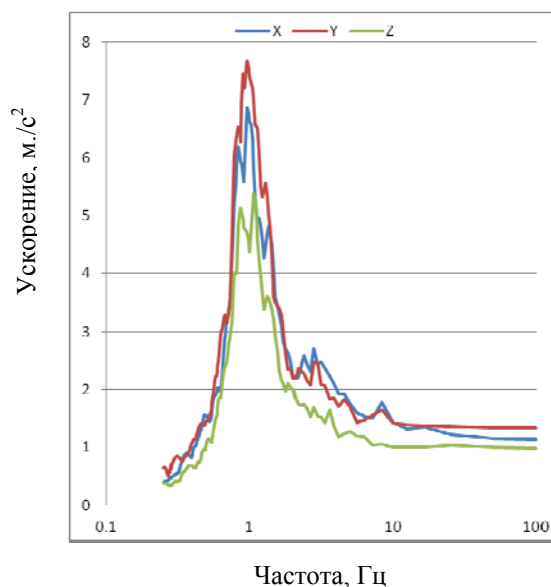


Рис. 8. Откорректированное сейсмическое воздействие на уровне подошвы фундамента

**Расчет сейсмостойкости реакторного отделения Запорозькой АЭС.** Расчет конечноэлементной модели проводился путем прямого динамического анализа в расчетном комплексе RSA Pro 2013. Для этого к модели прикладывались динамические нагрузки, моделирующие сейсмическое воздействие заданной интенсивности в трех направлениях (x, y, z). Исходными данными являлись акселерограммы в уровне подошвы фундамента с учетом взаимодействия сооружения и основания.

В результате расчета были получены деформации, компоненты внутренних усилий (осевые усилия, мембранные усилия, внутренние моменты в стержнях и оболоч-



ках), которые служат исходными данными для проверки работоспособности (сейсмостойкости) элементов конструкций рассматриваемого здания и последующей оценки технического состояния здания с учетом эффектов взаимодействия основания и сооружения.

**Выводы.** В ходе исследования была произведена оценка сейсмичности площадки и получены спектры ответа и соответствующие им акселерограммы на свободной поверхности, выполнен анализ сейсмостойкости здания повышенной категории ответственности на примере реакторного отделения №1 ЗАЭС с учетом эффектов взаимодействия основания и сооружения. В процессе работы была выполнена комплексная оценка сейсмической опасности пло-

щадки ЗАЭС для ПЗ и МРЗ, а также рассмотрена и реализована методика моделирования эквивалентных динамических характеристик основания при сейсмических воздействиях. Данная методика позволяет с достаточной точностью учесть эффекты взаимодействия основания и сооружения. 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. Выполнен анализ внутренних усилий и напряжений, возникающих в элементах конструкций реакторного отделения в системе «грунтовое основание – сооружение» при сейсмическом воздействии.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – Санкт-Петербург : Наука, 1998. – 255 с.
2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14:2009 / Мінрегіонбуд України. – [Чинні від 2009-12-01]. – Київ, 2009. – 45 с.
3. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций : ПНАЭ Г-05-006-87 / Государственный комитет СССР по надзору за безопасным ведением работ в атомной энергетике (Госатомэнергонадзор СССР). – Введ. 1988-07-01. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 28 с.
4. Ньюмарк Н. М. Основы сейсмоактивного строительства / Н. М. Ньюмарк, Э. Розенблот ; сокращ. пер. с англ. Г. Ш. Подольского ; под ред. Я. М. Айзенберга. – Москва : Стройиздат, 1980 – С. 61-99.
5. Строительство в сейсмических районах Украины : ДБН В.1.1-12:2014 / Минрегион Украины. – [Взамен ДБН В.1.1-12:2006 ; введ. 01-10-2014]. – Киев, 2014. – 110 с.
6. Тяпкин А. Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием / А. Г. Тяпкин. – Москва : АСВ, 2013. – 392 с.
7. 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.
8. 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.
9. Datta T. K. Seismic analysis of structures / T. K. Datta. – Singapore : John Wiley & Sons (Asia), 2010. – 464 p.
10. Wolf J. P. Dynamic soil structure interaction / John P. Wolf. – New Jersey, 1985. – 466 p.
11. Foundation engineering handbook (Hardcover) / ed. by Hsai-Yang Fang. – 2d edition. – New York : Chapman and Hall, 1991. – 923 p.
12. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : safety guides No. SSG-9 / International atomic energy agency. – Vienna, 2010. – 60 p.
13. Stafford P. J. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region / P. J. Stafford, F. O. Strasser, J. J. Bommer // Bulletin of earthquake engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 149-177.
14. Nonlinear Horizontal Site Response for the NGA-West2 Project : PEER Report 2013/12 Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley / Ronnie Kamai, Norman A. Abrahamson, Walter J. Silva. – 2013. – May. – 97 p.
15. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : Specific safety guide No SSG-9 / International atomic energy agency. – Vienna, 2010. – 80 p.

## REFERENCES

1. Birbraer A.N. Raschet konstruktsey na seymstojkost' [Calculation of structures for seismic resistance]. Sankt-Peterburg: Nauka, 1998, 255 p. (in Russian).
2. Minregionbud Ukrainy. Zagal'ni pryntsypy zabezpechennia nadiynosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsey ta osnov: DBN V.1.2-14:2009 [General principles of reliability and constructive safety of buildings, structures and foundations: SCN V.1.2-14:2009]. Kyiv, 2009, 45 p. (in Ukrainian).
3. Gosatomenergondzor SSSR. Normy proektirovaniya seymstoykikh atomnykh stantsiy: PNAE G-05-006-87 [The norms of designing of seismic resistant nuclear power plants: PNAE G-05-006-87]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 28 p. (in Russian).
4. N'yumark N. and Rozenblyut E. Osnovy seymoaktivnogo stroitel'stva [Fundamentals of seismic active construction]. Moscow: Stroyizdat, 1980, pp. 61-99. (in Russian).
5. Minregionbud Ukrainy. Stroitel'stvo v seymicheskikh rayonakh Ukrainy: DBN V.1.1-12:2014 [Construction in seismic regions of Ukraine: SCN V.1.1-12:2014]. Kiev, 2014, 110 p. (in Russian).
6. Tyapkin A.G. Raschet sooruzheniy na seymicheskie vozdeystviya s uchetom vzaimodeystviya s gruntovym osnovaniem [Calculation of structures on seismic impacts, taking into account the interaction with the soil foundation]. Moscow: ASV, 2013, 392 p. (in Russian).
7. Uzdin A.M., Sandovich T.A. and Al'-Naser-Mokhomad S.A. Osnovy teorii seymstoykosti i seymstoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy [Fundamentals of the theory of seismic resistance and seismic resistance construction of buildings and structures]. Sankt-Peterburg: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1993, 176 p. (in Russian).
8. Abrahamson N., Atkinson G., Boore D., Bozognia Y., Campbell K., Chiou B., Idriss I., Silva W. and Youngs R. Comparisons of the NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*. 2008, vol. 24, no. 1, pp. 45-66.
9. Datta T.K. *Seismic analysis of structures*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia), 2010, 464 pp.
10. Wolf J.P. *Dynamic soil structure interaction*. New Jersey: Prentice-Hall, 1985, 466 p.
11. Fang H.Y., ed. *Foundation engineering : handbook*. 2nd edition. London: Springer, 1990, 923 p.
12. International atomic energy agency. *Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations: Specific safety guide No SSG-9*. Vienna, 2010, 60 p.
13. Stafford P.J., Strasser F.O. and 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, pp. 149-177.
14. Kamai R., Norman A.A. and Walter J.S. *Nonlinear Horizontal Site Response for the NGA-West2 Project : PEER Report 2013/12 Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*. 2013, may, 97 p.
15. International atomic energy agency. *Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : Specific safety guide No SSG-9*. Vienna, 2010, 80 p.

Рецензент: д-р т. н., проф. М. В. Савицький

Надійшла до редколегії: 18.08.2015 р. Прийнята до друку: 29.08.2015 р.