

УДК 624.131.5, 624.04

## НАТУРНАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГРУНТ

СЕДИН В. Л.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
 БАУСК Е. А.<sup>2\*</sup>, *с.н.с, зав. лаб. ЛИАиТЕ,*  
 ЗАГИЛЬСКИЙ В. А.<sup>3\*</sup>, *н.с., аспирант,*

<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 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.** Согласно регламентированным международным и отраслевым нормам, конструкции зданий и сооружений АЭС, необходимо рассчитывать на особые воздействия, в частности необходим расчет на сейсмические воздействия с целью установления граничной сейсмостойкости, а также нахождения кинематических параметров здания. Расчет зданий и сооружений на сейсмические воздействия необходимо проводить с учетом взаимодействия фундамента с грунтовым основанием. **Цель.** Проведение натурных исследований взаимодействия основания и сооружения при сейсмическом воздействии, регистрация имитационного динамического воздействия для проверки соответствия методик моделирования взаимодействия зданий повышенной категории ответственности с основанием в системе «грунт – фундамент – сооружение» результатам натурных испытаний. **Вывод.** В ходе проведенных натурных работ была произведена имитация и регистрация динамического воздействия осуществляемого вблизи здания ВКС-2. Получены сейсмограммы и акселерограммы на свободной поверхности, а также кинематические характеристики на отметках здания. Показана реализация методики быстрого размещения сейсмологического оборудования guralp CMG-40TD в полевых условиях.

**Ключевые слова:** Регистрация динамического воздействия, кинематические характеристики здания, взаимодействие основания и сооружения, сейсмометр.

## НАТУРНА ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ ОСНОВИ І СПОРУДИ ПРИ УДАРНОМУ ВПЛИВІ НА ҐРУНТ

СЕДІН В. Л.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
 БАУСК Є. А.<sup>2\*</sup>, *с.н.с, зав. лаб. ЛДАиТЕ,*  
 ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.<sup>3\*</sup>, *н.с., аспірант,*

<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 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.** Згідно регламентованим міжнародним та галузевим нормам, конструкції будівель і споруд АЕС, необхідно розраховувати на особливі впливи, зокрема необхідний розрахунок на сейсмічний вплив з метою встановлення граничної сейсмостійкості, а також знаходження кінематичних параметрів будівлі. Розрахунок будівель і споруд на сейсмічний вплив необхідно проводити з урахуванням взаємодії фундаменту з ґрунтовою основою. **Мета.** Проведення натурних досліджень взаємодії основи і споруди при сейсмічній дії, реєстрація імітаційного динамічного впливу для перевірки відповідності методик моделювання взаємодії будівель підвищеної категорії відповідальності з основою в системі «грунт - фундамент - споруда» результатам натурних випробувань. **Висновок.** У ході проведених натурних робіт була проведена імітація і реєстрація динамічного впливу здійснюваного поблизу будівлі ВКС-2. Отримано сейсмограми і акселерограми на вільній поверхні, а також кінематичні характеристики на позначках будівлі. Показана реалізація методики швидкого розміщення сейсмологічного обладнання guralp CMG-40TD в польових умовах.

**Ключові слова:** Реєстрація динамічного впливу, кінематичні характеристики будівлі, взаємодія основи і споруди, сейсмометр.

## FULL-SCALE ASSESSMENT OF THE SOIL STRUCTURE INTERACTION UNDER FORCE IMPACT ON SOIL

SEDIN V. L.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech), Prof.*,  
BAUSK E. A.<sup>2\*</sup>, *senior reseach., Head. Lab. LSNandTPP*  
ZAGILSKY V. A.<sup>3\*</sup>, *reseach., postgraduate*,

<sup>1\*</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo 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 "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: yabausk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0504-1891

<sup>3\*</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: zagilsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

**Summary. Raising of problem.** According regulated international and industry standards, constructions of buildings and structures of nuclear power plants, it is necessary to rely on special impact, in particular, needs to settle on seismic effects in order to establish the boundary of seismic stability, as well as finding the kinematic parameters of the building. Calculation of buildings and structures on seismic effects should be carried out taking into account the soil structure interaction. **Purpose.** Conduct field studies of the soil structure interaction under seismic impacts, simulation and registration of dynamic impact to verify compliance with modeling techniques of interaction of critical facilities with soil in the system "soil - foundation - structure" to the results of field tests. **Conclusion.** In the course of this work was carried out simulation and registration of dynamic impact carried out near the building VCS-2. Obtained seismograms and accelerograms at the free surface, and the marks on the building. Shows the implementation methodology rapid deployment of seismological equipment guralp CMG-40TD.

**Key words:** Sign dynamic impact, kinematic characteristics of the building, soil-structure interaction, seismometer

**Постановка проблеми.** Согласно регламентированным международным и отраслевым нормам [3, 7, 13], конструкции зданий и сооружений АЭС, необходимо рассчитывать на особые воздействия, в частности необходим расчет на сейсмические воздействия с целью установления граничной сейсмостойкости, а также нахождения кинематических параметров здания. Расчет зданий и сооружений на сейсмические воздействия необходимо проводить с учетом взаимодействия фундамента с грунтовым основанием.

**Анализ публикаций.** Сегодня проблеме учета взаимодействия основания и сооружения при сейсмическом воздействии уделяется значительное внимание [4, 5, 6]. Этой теме посвящено большое количество публикаций, научных работ и литературных источников [2, 8, 9, 12]. В частности анализ работы взаимодействия системы «основание-фундамент-сооружение» при вычислении граничной сейсмостойкости, а также нахождения кинематических характеристик зданий АЭС представлен в работах А. Н. Бирбраера [1], Дж. Вольфа [11]. Однако при всем количестве исследований данной проблемы, изучению и сравнению натуральных результатов с результатами численных вычислений уделено не достаточное внимание.

**Цель статьи.** Проведение натуральных исследований взаимодействия основания и

сооружения при сейсмическом воздействии, регистрация имитационного динамического воздействия для проверки соответствия методик моделирования взаимодействия зданий повышенной категории ответственности с основанием в системе «грунт – фундамент – сооружение» результатам натуральных испытаний.

**Изложение основного материала.** В рамках данной работы осуществлялась регистрация динамического воздействия на различных отметках здания водородно-кислородной станции – 2 (ВКС-2) Запорожской атомной электростанции.

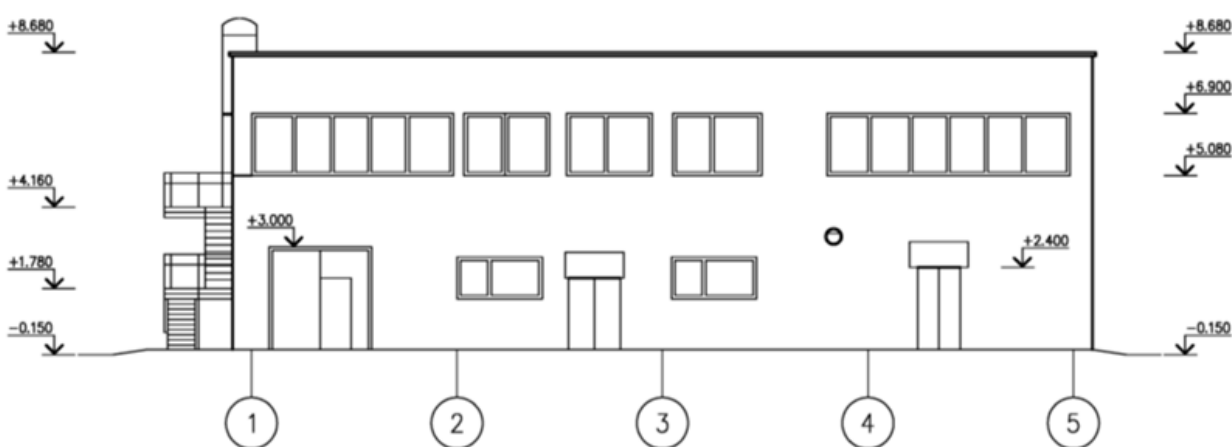
Натурная оценка взаимодействия основания и сооружения при динамическом воздействии осуществлялась в следующей последовательности:

- планирование натурального эксперимента;
- анализ технической документации;
- подготовительные работы по установке сейсмологического оборудования;
- установка и размещение сейсмологического оборудования;
- имитация динамического воздействия;
- регистрация данных и обработка информации.

**Объемно-планировочное и конструктивное решения здания ВКС-2.** Здание ВКС-2 - двухэтажное каркасное сооружение. Габариты здания - 18000×24000×8700. Пространственная устойчивость здания обеспечивается системой вертикальных

устоев, колонн, объединенных горизонтальными дисками перекрытия и покрытия. Фундаменты здания – сборные и монолитные железобетонные стаканного типа под колонны каркаса и ленточные – под кирпичные стены. Отметка заложения

фундаментов -1,400. Фундаменты опираются на монолитную железобетонную плиту толщиной 500 мм. Фрагмент объемно-планировочных решений, а также натурные фотографии здания ВКС-2 приведены на рис. 1.



б)

Рис. 1. а) натурные фотографии исследуемого здания; б) фасад здания в осях 1-5 / Fig. 1. a) full-scale pictures of the investigated building; b) The front of the building in the axes 1-5

**Инженерно-геологические условия.** Инженерно-геологический разрез промплощадки на которой расположено здание водородно-кислородной станции изучен до глубины 16,5 м. и представлен насыпными мелкими песками (ИГЭ-1Б) мощностью до 2,2 м., четвертичными аллювиальными песками мелкими

(ИГЭ-4) различными по плотности сложения. Основанием под плиту служат насыпные грунты, уплотненные до  $\rho_d=1,65$  т/м<sup>3</sup>. Подробная литологическая колонка промплощадки где расположено здание водородно-кислородной станции представлена в таблице 1.

Таблица 1

Литологическая колонка / Lithological column

№№ слоя	Подшва слоя, м.		мощн. слоя, м.	Литологическая колонка	Описание грунта	Категория грунта
	глубина	абс. отм., м				
1Б2	1,8	20,53	1,8		Насыпной слой – песок мелкий, средней плотности, влажный	I
1Б1	2,3	20,03	0,5		Насыпной слой – песок мелкий, рыхлый, влажный	II
4Б	6,2	16,13	3,9		Песок мелкий желтовато-коричневый, средней плотности	III
4А	9,5	12,83	3,3		Песок мелкий желтовато-коричневый, рыхлый, насыщенный водой	III
4Б	10,6	11,43	1,1		Песок мелкий желтовато-коричневый, средней плотности, насыщенный водой	III
4В	20,0	2,33	9,4		Песок мелкий желтовато-коричневый, плотный, насыщенный водой	III

**Установка и размещение сейсмологического оборудования.** Регистрация динамического воздействия на свободной поверхности, а также на отметках здания ВКС-2 осуществлялась при помощи сертифицированного трехкомпонентного цифрового сейсмометра GURALP CMG-40TD с частотным

диапазоном по скорости от 30 с. До 50 Гц. (рис. 2). Данное сейсмологическое оборудование предназначено для региональных и локальных сетей, временных установок, мониторинга зданий и сооружений, вулканов, инженерной сейсмологии.



Рис. 2. Сейсмометр GURALP CMG-40TD / Fig. 2. Seismometer GURALP CMG-40TD

Для установки прибора в грунте, согласно технической документации [10] была выбрана методика быстрого размещения сейсмометра, которая предусматривает собой установку оборудования в предварительно подготовленное углубление диаметром 40 см и глубиной 60 – 90 см.

Дно углубления засыпается мелким рыхлым песком, на котором размещается ровная гранитная плита или плоский камень размером не менее 20×20 см.

Сейсмометр GURALP CMG-40TD устанавливался в подготовленное углубление на гранитную плиту в

плотной водонепроницаемой полиэтиленовой упаковке (рис. 3). Сейсмологический прибор засыпается мелким песком до вершины прибора. Песок изолирует инструмент и защищает его от тепловых флуктуаций, а также сводит к минимуму нежелательную вибрацию.

При регистрации динамического воздействия на отметках здания, сейсмологическое оборудование устанавливалось непосредственно на элементах несущих конструкций исследуемого сооружения.

При установке сейсмологического оборудования прибор ориентировался на север.



1. Гидроизоляционный материал (плотная водонепроницаемая полиэтиленовая упаковка);

2. Сейсмологический прибор (GURALP CMG-40TD).

3. Углубление (диаметр – 40 см, глубина – 60 см);

Рис. 3. Обустройство временного пункта сейсмологических наблюдений (сейсмометр GURALP CMG-40TD) / Fig. 3. Construction of a temporary seismological observation points (seismometer GURALP CMG-40TD)

**Имитация динамического воздействия.** Динамическое воздействие производилось путем нанесения ударов бетоноломом по закладной детали

плиты размером 1×1 м (рис. 4). Воздействие имитировалось на протяжении 15 с., при минимальной интенсивности работы бетонолома.



Рис. 4. Имитация сейсмического воздействия / Fig. 4. Imitation of the seismic action

**Размещение сейсмологического оборудования.**

Согласно целям работы, а именно получение сейсмограмм и акселерограмм на свободной поверхности, а также получение кинематических

характеристик на отметках здания, сейсмологическое оборудование размещалось по схеме, представленной на рисунке 5.

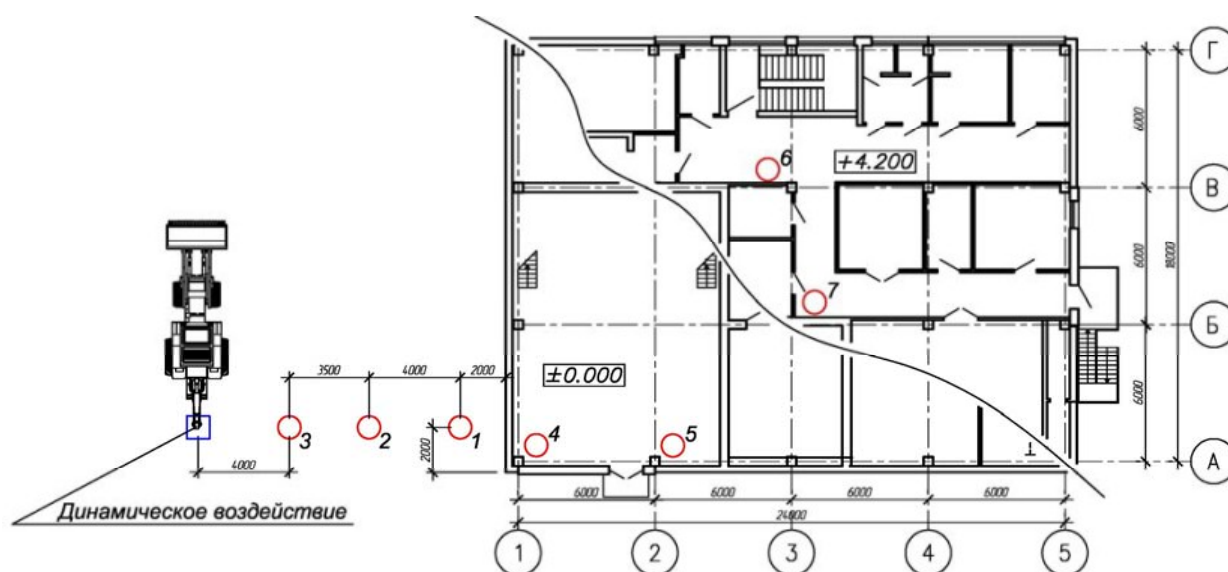


Рис. 5. Схема расположения сейсмометра GURALP CMG-40TD на грунте (1-3), на отм. ±0.000 (4, 5) и на отм. +4.200 (6, 7) / Fig. 5. Scheme of arrangement of the seismometer GURALP CMG-40TD on the ground (1-3), mark ± 0.000 (4, 5) and mark +4.200 (6, 7)

**Регистрация данных и обработка информации.**

Регистрация сейсмометром сейсмологических данных происходила при прохождении динамических волн через грунт в процессе имитации динамического воздействия.

Обработка информации производилась с помощью программы SCREAM. Универсальная программа от производителя для работы со всей линейкой сейсмологического оборудования Guralp.

Предназначена для контроля оборудования приема и сохранения данных с сейсмометров в реальном времени.

В результате проведенных работ были получены кинематические характеристики (сейсмограммы, акселерограммы) на отметках здания. Полученные результаты в последующих работах будут сравниваться с численным моделированием данной задачи.

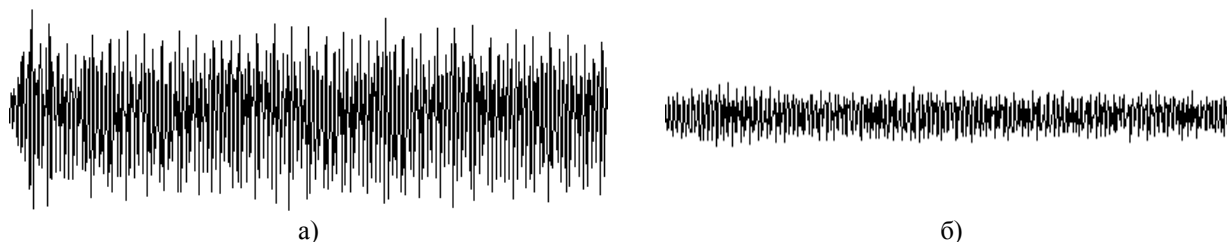


Рис. 6. Пример полученной информации при имитации динамического воздействия: а) участок 2 б) участок 4 (см. рис. 5) / Fig. 6. An example of the information obtained during the simulation of dynamic impact: а) location 2 б) location 4 (see. fig. 5)

**Выводы.** В ходе проведенных работ была произведена имитация и регистрация динамического воздействия осуществляемого вблизи здания ВКС-2. Получены сейсмограммы и акселерограммы на свободной поверхности, а также кинематические

характеристики на отметках здания. Показана реализация методики быстрого размещения сейсмологического оборудования guralp SMG-40TD в полевых условиях.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Бирбраер А. Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – Санкт-Петербург : Наука, 1998. – 255 с.
2. **Баркан Д. Д.** Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан – Москва : Стройвоенмориздат, 1948.. – 409 с.
3. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций : ПНАЭ Г-05-006-87 : утв. Госатомэнергонадзором СССР 30.12.87 : введ. в действие с 01.07.88. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 28 с.
4. **Ньюмарк Н.** Основы сейсмоактивного строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблют ; под ред. Я. М. Айзенберга. – Москва: Стройиздат, 1980 – С. 61-99.
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 ; КНУБА. – Киев, 2015. – 41с.
7. Строительство в сейсмических районах Украины : ДБН В.1.1-12:2014. – [Введ. 01-10-2014]. – Киев, 2014. – 110 с.
8. **Тяпкин А. Г.** Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием / А. Г. Тяпкин – Москва: АСВ, 2013. – 392 с.
9. **Datta T. K.** Seismic analysis of structures / T. K. Datta. – Singapore : Print Media Pte Ltd, 2010 – 473 p.
10. Designed and manufactured by Guralp Systems Limited – England, 2006.
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 с.
13. Safety Guides NS-G-1.6 / Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. – Vienna, 2003.

### REFERENCES

1. **Birbraer, A. N.** Structural analysis of seismic stability / A.N. Birbraer – Saint-Petersburg : Nauka, 1998. – 255 p.
2. **Barkan D.D.** Dynamics of basis and foundations / D. D. Barkan – Moscow : Strojvoenmorizdat, 1948. – 409 s.
3. Design standards for earthquake resistance of nuclear power plants : PNAEG-05-006-87. – approved. Gosatomenergonadzor USSR 12.30.87: input. with effect from 07.01.88. – Moscow: Energoatomizdat, 1989 – 28 p.
4. **Newmark N.** Fundamentals seismically construction. / N. Newmark. E. Rosenbluth, ed. J.M. Eisenberg. – Moscow ; Stroyizdat. - 1980. - p. 61-99.
5. **Sakharov, V. A.** Interaction of the zimnensky monastery cathedral with the soil base under seismic loads -. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, (6 (7)), 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. – 41с.
7. Construction in seismic regions of Ukraine. DBN V.1.1-12: 2014. – [Enter. 01.10.2014] – Kyiv, 2014 - 110 p.
8. **Тяпкин А. Г.** Calculation of seismic effects on structures, taking into account the interaction with the soil foundation / A.G. Tyapkin – Moscow: АСВ, pp. 2013. - 392.
9. **Datta T. K.** Seismic analysis of structures / T. K. Datta. – Singapore : Print Media Pte Ltd, 2010 – 473 p.
10. Designed and manufactured by Guralp Systems Limited – England, 2006.
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 с.
13. Safety Guides NS-G-1.6 / Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. – Vienna, 2003.

Статья поступила в редакцию 11.10.2015