

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 550.34:621.311.25

**УСИЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
В ОБОРУДОВАНИИ АЭС С ВВЭР -1000**

© 2014 г. К.Н. Проскуряков, Е.Е. Ефименко

«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Показано, что частоты вибраций основного оборудования АЭС с ВВЭР-1000 попадают в область частот в спектре отклика, соответствующую максимальным значениям амплитуды сейсмического воздействия. Представлены результаты анализа экспериментальных данных, из которых следует, что логарифмические декременты затухания колебаний в теплоносителе могут быть меньше нормируемых для обеспечения сейсмостойкости значений декрементов для оборудования и сооружений.

Обоснована целесообразность проведения натурных экспериментов, в условиях воздействия на энергоблок АЭС с ВВЭР, предназначенных для вывода из эксплуатации, искусственно создаваемых колебаний, имитирующих сейсмические и ударные воздействия.

Ключевые слова: логарифмический декремент, сейсмостойкость, частота, колебания, добротность, резонанс.

Поступила в редакцию 28.05.2014 г.

Максимальная интенсивность вибраций оборудования АЭС и элементов конструкций, а также пульсаций давления теплоносителя возникает при совпадении значений их собственных частот с частотой колебаний внешних воздействий вызванных землетрясением, взрывом или падением самолета.

При выполнении расчетов по оценке интенсивности вибраций в оборудовании и акустических колебаний в теплоносителе внешнее воздействие задается в виде графиков спектров отклика неконсервативной системы с одной степенью свободы в зависимости от частоты собственных колебаний и значения коэффициента рассеяния энергии [1]. При этом используются спектры отклика перемещений, скоростей и ускорений системы с одной степенью свободы. Наиболее часто применяются спектры ускорений.

На рисунке 1 представлен расчетный спектр отклика, соответствующий относительному демпфированию 2% [2]. В качестве расчетных принимались огибающие спектров отклика, построенных на основе 5 заданных Генпроектировщиком АЭС поэтажных акселерограмм на отметках + 22,36 м, + 28,5 м, + 30,4 м для горизонтального направления (кривая 1) и + 22,36 м, + 25,77 м для вертикального направления (кривая 2).

Результаты расчета частот собственных колебаний показали, что низшая собственная частота системы, для которой был получен этот спектр отклика, составляет 9,66 Гц, а в частотном диапазоне до 30 Гц находятся 13 собственных частот. Значения собственных частот отмечены на рисунке 1 штрихами на оси абсцисс. Эти результаты свидетельствуют о возможности усиления сейсмических воздействий на здание АЭС при их резонансе с собственными колебаниями давления и вибрациями в оборудовании АЭС с ВВЭР-1000. В первых экспериментах на Калининской АЭС [3] по совокупности амплитудных, фазовых, гармонических и многомерных авторегрессионных признаков,

полученных по сигналам ионизационных камер (ИК), датчиков пульсаций давления (ДПД) установлено следующее: для блока I КЛнАЭС в номинальных условиях, частоты приблизительно 0,6; 6,1; 8,6; 12,8; 14,5; 17,5 Гц являются низшими частотами акустических стоячих волн (АСВ) давления и на них происходят вынужденные вибрации внутрикорпусных устройств (ВКУ). Для серийных блоков ВВЭР-1000 частоты АСВ несколько отличаются и составляют ряд 0,6; 6,5; 9,2; 13,2; 15,5; 20,0 Гц.

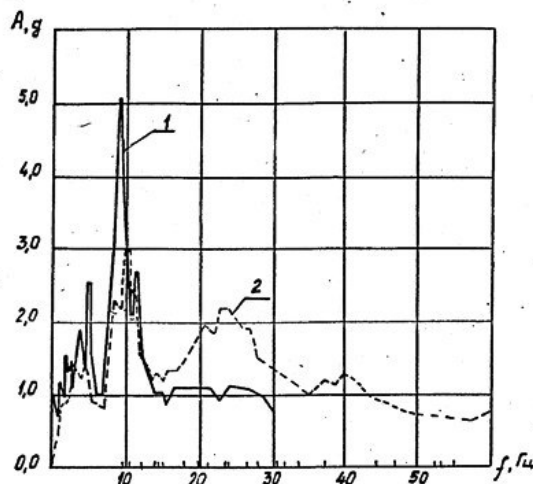


Рис. 1. Расчетные спектры отклика

Подтверждением того, что все основные резонансы в спектральных характеристиках сигналов ИК порождены акустическими эффектами, является функция когерентности сигналов ДПД и ИК (рис. 2).

На рисунке 2 б) показана автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ИК Калининской АЭС, на рисунке 2 в) АСПМ сигналов от ИК Балаковской АЭС, а на рисунке 2 д) и е) АСПМ ДПД Кольской АЭС для горячей и холодной нитки соответственно. Динамическое воздействие пульсаций давления теплоносителя на конструкции и оборудование зависит не только от амплитуды колебаний, но и от их логарифмических декрементов затухания. Ввиду этого необходимо определить декременты затухания колебаний сооружений и оборудования при воздействии возмущений извне, и декрементов затухания АСВ, возникающих в самом оборудовании, т.е. непосредственно в теплоносителе. Нормативные значения логарифмических декрементов затухания колебаний сооружений и оборудования приведены в [4].

Величину логарифмического декремента можно определить по АСПМ, т.е. зависимости амплитуды колебаний от частоты. Согласно [5] декремент для каждого пика на АСПМ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta = \frac{\pi \Delta f}{f_p \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - 1}}$$

где $\alpha = \frac{A}{A_p}$ и $\Delta f = f_2 - f_1$. Здесь A_p – амплитуда пика, A – произвольная величина ($A < A_p$), f_1 и f_2 – значения частоты при $\Delta p = A$ (см. рис. 3).

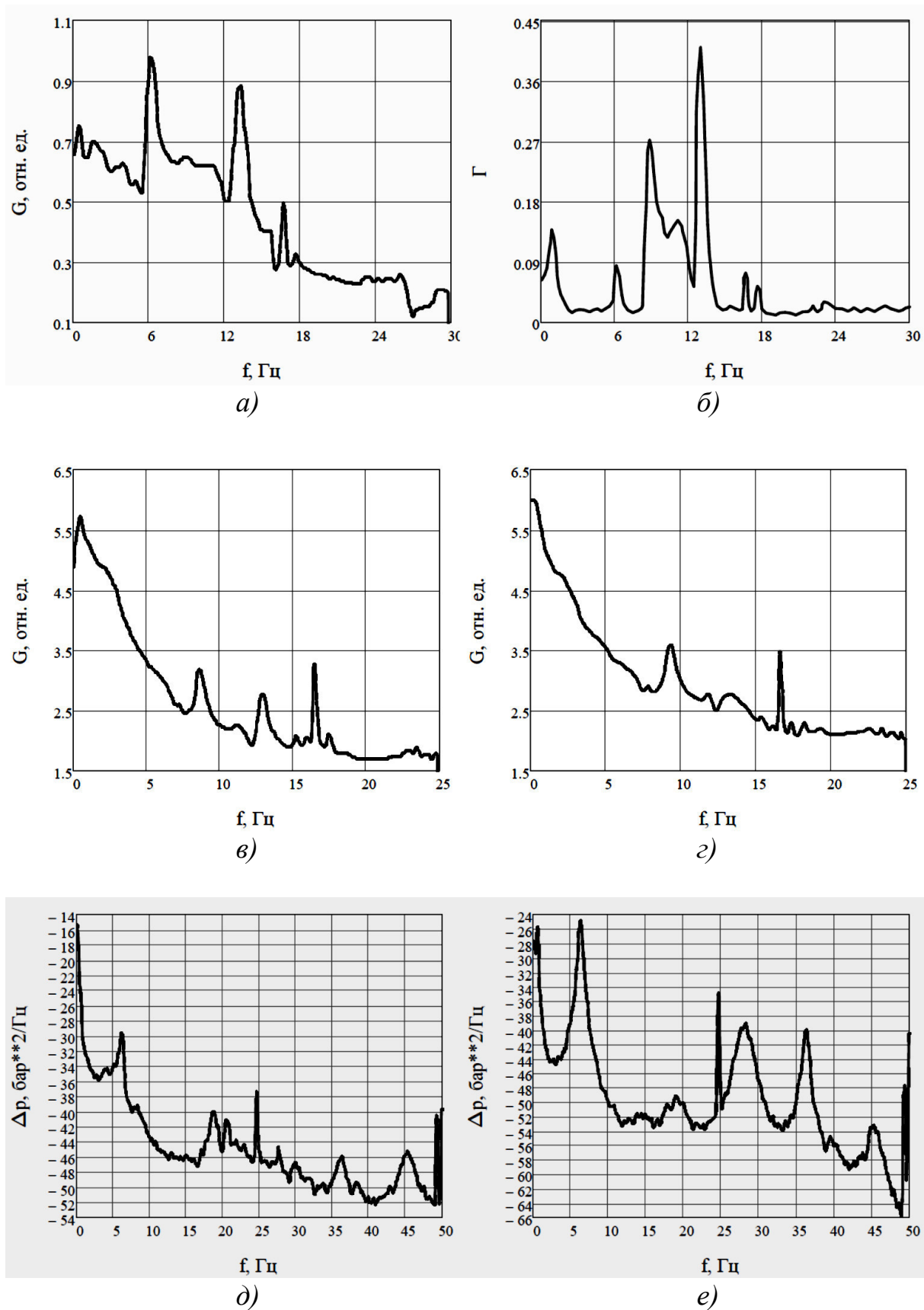


Рис. 2. Мгновенная АСПМ сигнала ДПД (а), мгновенная когерентность сигналов ИК-ДПД (б), АСПМ Калининской АЭС ИК (блок 1) (в), АСПМ Балаковской АЭС ИК (блок 3) (г), АСПМ Кольской АЭС ДПД (горячая нитка) (д), АСПМ Кольской АЭС ДПД (холодная нитка) (е)

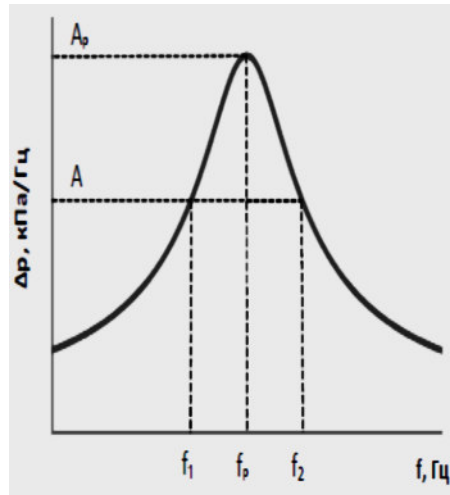


Рис. 3. Определение логарифмического декремента по резонансной кривой

В таблице 1 приведены результаты расчета логарифмических декрементов затухания колебаний сигнала от ИК для АЭС с ВВЭР-1000 (I блока Калининской и III блока Балаковской АЭС) и от ДПД ВВЭР-440 Кольской АЭС (горячая и холодная нитки).

Как видно из таблицы 1 колебания, вызванные внешним воздействием (например, работой насоса – частота 16,6 Гц для ВВЭР-1000 и 25 Гц для ВВЭР-440) имеют логарифмический декремент затухания в несколько раз меньший, чем логарифмические декременты затухания колебаний АСВ, и, следовательно, имеют большую добротность. Логарифмические декременты указаны в долях от значения критического декремента, равного 2π , т. е. $\delta = \frac{\Delta}{2\pi}$.

Добротность системы Q показывает во сколько раз увеличивается амплитуда колебания при резонансе по сравнению с отклонением системы от положения равновесия под действием постоянной силы, т.е. в случае если частота вынуждающей силы $f=0$. В случае резонанса усиление таких колебаний будет значительным.

В работе [6] показано, что частота 9,277 Гц соответствуют вертикальной форме колебаний корпуса реактора и что эта частота зависит от температуры охлаждающей среды. Приведены также результаты расчета собственной частоты, равной 10,1 Гц, поперечных колебаний топливных сборок (третья форма), корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока и собственной частоты, равной 13,1 Гц вертикальных колебаний топливных сборок, корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока.

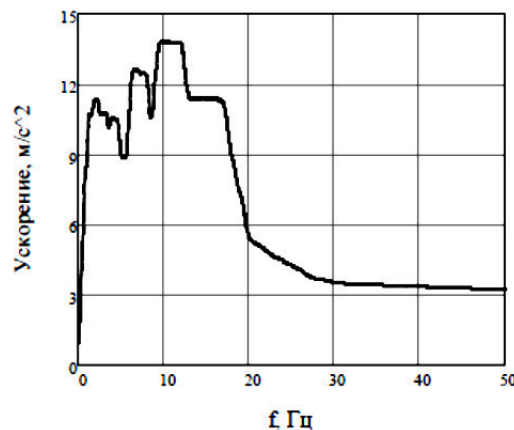


Рис. 4. Расчетный спектр отклика

Сейсмограммы, акселерограммы и спектры отклика соответствуют характерным для данной площадки воздействиям при проектном землетрясении (ПЗ) и максимальном расчетном землетрясении (МРЗ). Расчетные спектры отклика представленные на рисунке 1 [2] и рисунке 4 [1] получены для различных площадок, тем не менее, в обоих случаях максимальное воздействие колебания, вызванного землетрясением, оказывают на корпус реактора и активную зону. Из сопоставления спектров отклика оснований сооружений, полученных в ряде проектных организаций со спектрами вибраций оборудования первого контура АЭС с ВВЭР-1000, следует, что частоты вибраций основного оборудования реакторной установки попадают в область частот в спектре отклика, соответствующую максимальным значениям амплитуды сейсмического воздействия.

Таблица 1. – Результаты расчета декрементов затухания АСВ в первом контуре АЭС с ВВЭР

f	Δ	δ	Q	f	Δ	δ	Q
Калининская АЭС (блок 1) сигналы ИК				Балаковская АЭС (блок 3) сигналы ИК			
8.6	0.451	0.072	7	9.3	0.507	0.081	6.2
16.6	0.066	0.011	47.6	16.6	0.046	0.007	68.3
Реактор ВВЭР-440 (горячая нитка)				Реактор ВВЭР-440 (холодная нитка)			
6.2	0.594	0.094	5.3	6.3	0.561	0.089	5.6
25	0.047	0.007	66.8	25	0.056	0.009	56.1

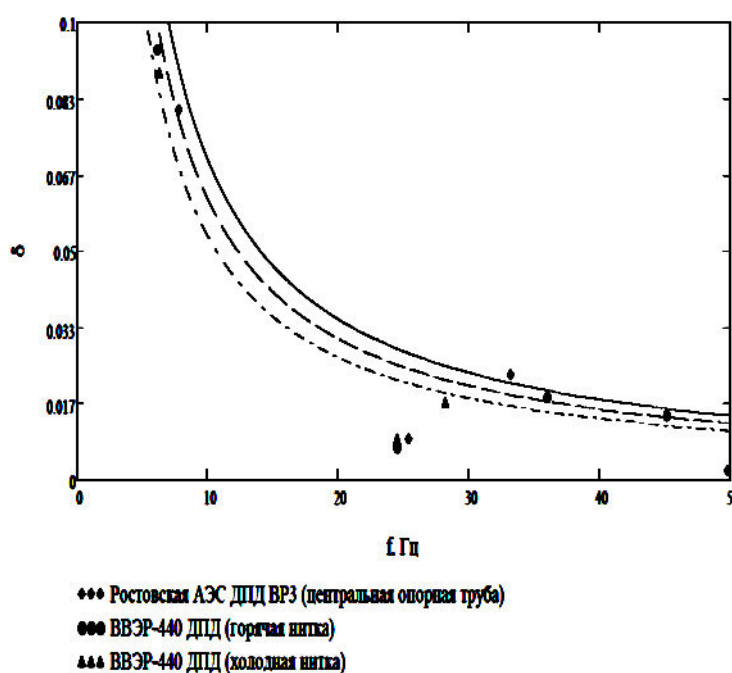


Рис. 5. Сравнение зависимостей $\delta(f)$ ДПД реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

Из рисунка 5 видно что $\delta(f)$ ДПД у реакторов ВВЭР-440 несколько ниже, чем у реактора ВВЭР-1000.

Анализ большого объема данных показал, что декременты затухания колебаний в теплоносителе могут быть меньше нормируемых декрементов для оборудования. В

таких случаях собственные колебания давления теплоносителя затухают слабее, чем вибрации в оборудовании. Нормы [4], определяющие допустимые значения декрементов приведены в таблице 2. При воздействии на АЭС нагрузок сейсмического типа, возникающих при землетрясениях, внешних ударных волнах и ударе самолета по защитной оболочке (их рассмотрение применительно к РУ проводится аналогично расчету на сейсмические воздействия) возникают вибрации строительных конструкций, передающиеся оборудованию и трубопроводам РУ ВВЭР.

Таблица 2. – Нормативные значения логарифмических декрементов [4]

Вид конструкции	Логарифмический декремент в долях от критического при расчетных напряжениях σ в зависимости от сопротивления материала R	
	$\sigma = 0.67R$	$\sigma \geq 0.9R$
Железобетонные конструкции обычные	0.04	0.07
Железобетонные конструкции преднапряженные	0.02	0.05
Стальные конструкции сварные	0.02	0.04
Стальные конструкции на болтах	0.04	0.07
Оборудование и трубопроводные системы большого диаметра (>300 мм)	0.02	0.03
Оборудование и трубопроводные системы малого диаметра (<300 мм)	0.01	0.02

Расчетные оценки интенсивности вибраций оборудования АЭС могут приводить в одних случаях к завышенным консервативным результатам, в других случаях к недооценке реально возникающих нагрузок.

Экспериментальные методы исследований, проводящихся как в лабораторных условиях, так и в условиях АЭС, не во всех случаях в полной мере воспроизводят особенности взаимодействия АЭС с сейсмическими нагрузками ввиду чего, прогнозируемые результаты могут существенно отличаться от действительных. Одной из главных причин такого несоответствия является отсутствие экспериментального исследования на натурном объекте. Такие исследования позволили бы обосновать сейсмостойкость АЭС с учетом их особенностей, главными из которых являются нейтронно-физические и тепло-гидравлические процессы в условиях наложения на них внешних динамических воздействий, одновременно воздействующих на все строительные и технологические системы. Для полномасштабного экспериментального исследования динамических процессов в энергоблоке АЭС при воздействии искусственно создаваемых колебаний, имитирующих сейсмические и ударные воздействия, мог бы быть использован энергоблок АЭС с ВВЭР, предназначенный для вывода из эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саргсян, А.Е.* Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций [Текст] / А.Е. Саргсян. – Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2013. – 550 с.
2. *Шарый, Н.В.* Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР [Текст] / Н.В. Шарый : автореф. дис. докт. техн. наук. – Подольск, 2008. – 48 с.

3. Аркадов, Г.В. и др. Виброшумовая диагностика ВВЭР [Текст] / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
4. МР 1.5.2.05.999.0027-2011. Нормы проектирования атомных станций на сейсмостойкость [Текст]. – М., 2011.
5. Ананьев, А.Н. и др. Сейсмическая безопасность атомных станций [Текст] / А.Н. Ананьев, П.С. Казновский, С.П. Казновский и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 229 с.
6. Влияние вибраций ВКУ реактора ВВЭР 1000/320 АЭС Темелин на устойчивость шахты реактора / Л. Печинка, П. Стулик, В. Земан // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 5-й междунар. конф. 29 мая – 1 июня 2007 г. – Подольск, 2007. – С. 36–48.

Seismic Loadings Amplification in Equipment of Nuclear Power Plant with VVER-1000

K.N. Proskuryakov, E.E. Efyomenko

*«National Research University «MPEI»
14 Krasnoznamennaya St., Moscow, Russia 111250
e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

Abstract – It is shown that the vibration frequency of the main equipment of NPP with VVER-1000 falls in the frequency spectrum of the response corresponding to extending the maximum amplitude of the seismic action. In this work the results of the analysis of experimental data are presented. According to these results it follows that the logarithmic decrement of oscillations in the coolant may be less standardized to ensure seismic resistance values decrements for equipment and facilities. Expediency of full-scale experiments, under the impact of NPPs with VVER intended for decommissioning, artificially produced vibrations that simulate seismic and shock.

Keywords: logarithmic decrement, seismic resistance, frequency fluctuations, quality factor, resonance.

REFERENCES

- [1] Sargsyan A.E. Dinamika i seysmostoykost sooruzheny atomnykh stantsy [Dynamics and seismic stability of nuclear power plants]. Sarov. Pub. Izd-vo RFYaTs–VNIIEF [Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute Of Experimental Physics Publishing House], 2013, ISBN 92-0101803-7, 550 p. (in Russian)
- [2] Shary N.V. Metody raschetnogo obosnovaniya prochnosti i dinamika konstruktsy reaktornykh ustanovok dlya AES s VVER [Methods of settlement justification of durability and reactor installation dynamics for the WWER NPP] : avtoref. dis. dokt. tekhn. Nauk [Doctor of Engineering abstract thesis.]. Podolsk , 2008. 48 p. (in Russian)
- [3] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaya diagnostika VVER [WWER vibronoise diagnostics]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 2004, ISBN 5-283-00787-1, 344 p. (in Russian)
- [4] МР 1.5.2.05.999.0027-2011. Normy proyektirovaniya atomnykh stantsy na seysmostoykost [MP 1.5.2.05.999.0027-2011. Construction standarts nuclear power plants for seismic stability]. M. 2011. (in Russian)
- [5] Ananyev A.N., Kaznovsky P.S., Kaznovsky S.P. etc. Seysmicheskaya bezopasnost atomnykh stantsy [Seismic safety of nuclear power plants]. M. Pub. Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana [Bauman Moscow State Technical University Publishing House], 2011, ISBN 978-5-7038-3517-3, 229 p. (in Russian)
- [6] Pechinka L., Stulik P., Zeman V. Vliyaniye vibratsy VKU reaktora VVER 1000/320 AES Temelin na ustoychivost shakhty reaktora [Influence of reactor internals vibrations of the VVER 1000/320 reactor of the Temelin NPP on mine reactor stability]. Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER [WWER NPP Safety]: materialy 5-y mezhdunar. Konf [5th international conference materials]. 29 maya – 1 iyunya [May 29 – June 1] 2007. Podolsk, 2007. pp. 36–48. (in Russian)