

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ

А.И. Федоров, К.Н. Проскуряков, М.В. Запорожец, С.В. Иванов

В статье рассматривается проблема обеспечения сейсмостойчивости АЭС. Показано, что при резонансном воздействии вибраций оборудования АЭС и пульсаций давления теплоносителя происходит аномальный рост вибраций и динамических напряжений в конструкционных материалах, что увеличивает вероятность внезапных отказов оборудования. В результате анализа сделан вывод о необходимости проведения виброакустической паспортизации энергоблоков с целью прогнозирования и предотвращения условий возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС на различных этапах эксплуатации

Ключевые слова: вибрация, колебания, срок эксплуатации, виброакустическая паспортизация

Практика эксплуатации АЭС показывает, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов. Эти процессы относятся к числу главных факторов, определяющих динамические нагрузки на оборудование, его срок службы и надежность. Наиболее опасно взаимодействие оборудования с потоком текучей среды в резонансной области колебаний механических элементов и потока. Для прогнозирования режимов работы, в которых возникает резонансное усиление колебаний, а также для разработки управляющих воздействий для их предотвращения необходима разработка виброакустических паспортов реакторной установки (РУ) АЭС. Для этого необходимо в различных эксплуатационных режимах РУ, при появлении аномалий и в аварийных ситуациях знать её виброакустические характеристики, и, в частности, частоты собственных колебаний оборудования, его элементов и их соединений, а также частоты собственных колебаний теплоносителя в этих объектах.

При наличии виброакустического паспорта РУ АЭС могут быть разработаны методы и средства предотвращения условий возникновения резонансного взаимодействия вибраций оборудования и пульсаций рабочего

тела в эксплуатационных и аварийных режимах. Для этого необходимо обеспечить рассогласование (несовпадение) пиков спектральных характеристик сигналов от датчиков пульсаций давления рабочей среды и сигналов от датчиков вибраций, перемещений, динамических напряжений.

В первом контуре АЭС с ВВЭР основными источниками возбуждения колебаний являются нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе (акустические волны, турбулентность, вихреобразование, кавитация и др.) и главные циркуляционные насосы (ГЦН). При этом колебательные свойства гидромеханической системы первого контура не сводятся к суперпозиции свойств образующих её элементов (реактор, парогенератор, компенсатор давления, трубопроводы и пр.), но приобретают новые, системные свойства [1]. Одним из важных системных свойств, влияющих на возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов, является преобразования частот, с которыми внешние гидравлические возмущения действуют на контур теплоотвода от РУ в целом и на его отдельные элементы.

В результате преобразования частот гидравлических возмущений, вызванных вращением ГЦН в контуре теплоносителя появляются комбинационные низкие (доли Гц) и высокие (десятки Гц) частоты, а также частоты, кратные частотам колебаний, подводимых от внешних источников возмущений. Новые качественные эффекты [1], обусловленные системными свойствами колебательных процессов в первом контуре, определяются, следующими факторами:

- нелинейной зависимостью перепада давления в элементах контура от массового расхода теплоносителя;

Федоров Анатолий Иванович - ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», e-mail: FedorovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru
Проскуряков Константин Николаевич - НИУ «МЭИ», д-р техн. наук, профессор, e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru
Запорожец Максим Владимирович – НИУ «МЭИ», аспирант, e-mail: ZaporozhetsMV@gmail.com
Иванов Сергей Васильевич – НИУ «МЭИ», канд. техн. наук, доцент, e-mail: IvanovSV@list.ru

- геометрической асимметрией и различием термодинамических и гидравлических параметров теплоносителя в параллельных контурах (петлях) РУ;

- существованием критического сочетания параметров различной физической природы (теплофизических, гидродинамических, конструктивных), при котором происходит смена режимов течения (стационарного и пульсационного).

Приведенное ниже расчетное и экспериментальное обоснование методов прогнозирования и предотвращения условий возникновения виброакустических резонансов в первых контурах АЭС с ВВЭР при внешних периодических воздействиях выполнено с целью:

- продления срока эксплуатации, модернизации и усовершенствования проектно-конструкторских разработок, средств технической диагностики и систем управления технологическими процессами АЭС, уменьшения вероятности внезапных отказов оборудования;

- оптимизации проектно-конструкторских решений для обеспечения сейсмостойкости АЭС в целом, с учетом взаимовлияния динамическом процессов в строительных сооружениях и технологических системах АЭС и резонансного усиления динамических напряжений при воздействии внешних периодических нагрузок.

Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками проведено для двух видов внешних по отношению к контуру теплоносителя динамических нагрузок-вызванные вращением ГЦН и землетрясением.

При продлении срока службы РУ для блоков №№ 3, 4 и 5 НВАЭС расчеты по проверке сейсмостойкости оборудования и трубопроводов не проводились. На современном этапе Ростехнадзор требует обоснования сейсмостойкости независимо от бальности площадки.

Для проведения расчетов сейсмостойкости оборудования и трубопроводов РУ Генпроектанту АЭС потребуется выполнить расчет поэтажных спектров отклика для сейсмологических условий площадки.

Следует отметить, что лимитировать сейсмостойкость АЭС в целом могут не только строительные конструкции, но и технологические системы реакторной

установки.

Причина этого заключается в том, что максимальные интенсивности вибраций оборудования АЭС, элементов строительных конструкций, а также пульсаций давления теплоносителя возникают при совпадении значений их собственных частот с частотами колебаний, вызванных землетрясением.

Поэтому, на наш взгляд, для обоснования возможности продления сроков эксплуатации необходимо провести идентификацию причин превышения проектного уровня вибраций оборудования ГЦК энергоблоков №№ 3, 4, 5 Нововоронежской АЭС и разработку рекомендаций по их устранению. Для выполнения этих задач необходимо:

- разработать виброакустические паспорта 3, 4 и 5 блоков;

- иметь возможность проведения на 3, 4 и 5 энергоблоках виброшумовых измерений по программе ПНР на вновь вводимых блоках по методикам и силами ОАО ОКБ ГИДРОПРЕСС и/или ОАО «Атомтехэнерго».

Для выполнения этой задачи потребуется провести на 3, 4 и 5 блоках виброшумовые измерения в режимах, предусмотренных «Технологическими регламентами эксплуатации». В таком объеме контроль вибродинамического состояния оборудования ВВЭР-440 и ВВЭР- 1000 ранее не проводился.

Следует также получить от ОАО АЭП поэтажные спектры отклика при проектном землетрясении и заключение о принципиальной возможности обеспечения сейсмостойкости существующих строительных конструкций.

На основе виброакустических паспортов энергоблоков и поэтажных спектров отклика на проектное землетрясение ОКБ «Гидропресс» получит возможность проведения прочностных расчетов для режимов, в которых в условиях землетрясения возникают максимальные интенсивности вибраций оборудования АЭС, элементов строительных конструкций, а также пульсаций давления теплоносителя.

Следует отметить, что даже с учетом того, что для НВАЭС рассматриваются разрывы трубопроводов не более Ду100, будут проблемы с обоснованием опорно-подвесной системы трубопроводов небольшого диаметра, попадающих в данный диапазон, в частности трубопровода впрыска 108х9.

В экспериментах на Калининской АЭС [2] по совокупности амплитудных, фазовых, гармонических и многомерных авторегрессионных признаков, полученных по сигналам ионизационных камер (ИК), датчиков пульсаций давления (ДПД) установлено следующее:

- для блока I Калининской АЭС 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. Подтверждением того, что все основные резонансы в спектральных характеристиках сигналов ИК порождены акустическими эффектами, является функция когерентности сигналов ДПД и ИК [2].

Как известно, динамическое воздействие пульсаций давления теплоносителя на конструкции и оборудование зависит не только от амплитуды колебаний, но и от их логарифмических декрементов затухания.

Декременты затухания периодических колебаний, действующих на контур теплоносителя извне (в результате вращения ГЦН), и, возникающих непосредственно в самом теплоносителе (АСВ), определены нами по результатам обработки АСПМ, представленным в [2].

В табл. 1 приведены результаты расчета логарифмических декрементов затухания (Δ) и в долях от критического декремента (δ) сигнала от ионизационных камер (ИК) для АЭС с ВВЭР-1000 и от датчиков пульсаций давления (ДПД) ВВЭР-440 Кольской АЭС (горячая и холодная нитки).

Как видно из таблицы 1, колебания, вызванные внешним воздействием (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 (Q).

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, когда частота вынуждающей

силы $f=0$.

Логарифмические декременты затухания колебаний указаны в долях от значения критического декремента, равного 2π , т.е.

$$\delta = \frac{\Delta}{2\pi}.$$

Нормы [3], определяющие допустимые значения декрементов затухания колебаний в конструкциях приведены в таблице 2.

Анализ значительного объема данных, проведенный в процессе выполнения данной работы, показал, что декременты затухания колебаний давления в теплоносителе могут быть меньше нормируемых декрементов затухания колебаний в конструкциях, т.е. собственные колебания давления затухают слабее, чем вибрации в конструкциях АЭС.

Декременты затухания колебаний давления в теплоносителе реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, приведенные на рис. 1, показывают, что декременты затухания акустических колебаний в теплоносителе существенно ниже нормируемых логарифмических декрементов затухания колебаний в конструкциях.

Расчетная частота собственных колебаний давления теплоносителя в акустическом контуре, образованном холодным коллектором парогенератора и участком главного циркуляционного трубопровода, соединяющего его с ГЦН, равна 8,3 Гц.

На рис. 2 и рис. 3 представлены спектры виброперемещений полученные при обработке сигналов от датчиков виброперемещения, установленных на всасе ГЦН (рис. 2) и на напоре (Рис. 3).

Из рис. 2 видно, что декременты затухания колебаний в долях от значения критического декремента ДПД у реакторов ВВЭР-440 несколько ниже, чем у реактора ВВЭР-1000.

На всасе ГЦН интенсивность вибраций на частоте 16,6 Гц является доминирующей, и её величина в разы выше других. В АСПМ виброперемещений, полученных от сигнала датчика, расположенного на напоре ГЦН, интенсивность виброперемещений на частоте 16,6 Гц, существенно меньше и не является доминирующей.

Информация, позволяющая выявить и исследовать процессы, не предусмотренные проектной документацией, но влияющие на работоспособность и надежность

Таблица 1

Результаты расчета декрементов затухания АСВ в первом контуре 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

Таблица 2

Нормативные значения логарифмических декрементов затухания колебаний в конструкциях [3]

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

оборудования главного циркуляционного контура (ГЦК) может быть получена в результате измерений динамических напряжений, вибраций и пульсаций давления в процессе холодно-горячей обкатки (ХГО) блока с ВВЭР-1000 [4]. В [4] показано, что в рассматриваемом контуре при квадратичной зависимости перепада давления от скорости теплоносителя происходит удвоение частоты $f = 8,3$ Гц, в результате чего вместо неё в спектре возникают колебания давления с частотой 16,6 Гц, которая равна оборотной частоте ГЦН.

Такое преобразование собственной частоты колебаний давления теплоносителя приводит к её полному совпадению с оборотной частотой ГЦН и возникновению в гидравлическом контуре, образованном холодным коллектором парогенератора и трубопроводом, соединяющим его с ГЦН, резонанса частоты акустических колебаний с частотой вынужденных колебаний обусловленных вращением ГЦН.

Совпадение частот акустических колебаний с частотой вынужденных колебаний является причиной максимального увеличения интенсивности колебаний давления в рассматриваемом контуре и непосредственно перед ГЦН. Как показано в [7] попадание частоты вынужденных колебаний в полосу пропускания частот акустических колебаний теплоносителя приводит к значительному увеличению интенсивности колебаний давления в рассматриваемом контуре.

Результаты измерения вибраций, представленные на Рис. 4 указывают на отсутствие акустических колебаний с частотой примерно 8,3 Гц в оборудовании, расположенном на выходе ГЦН. Следует отметить, что при возникновении повреждений вала ГЦН и подшипников уровень вибрации ГЦН резко возрастает и результат наложение их на вибрации вызванные землетрясением могут существенно превысить проектный уровень.

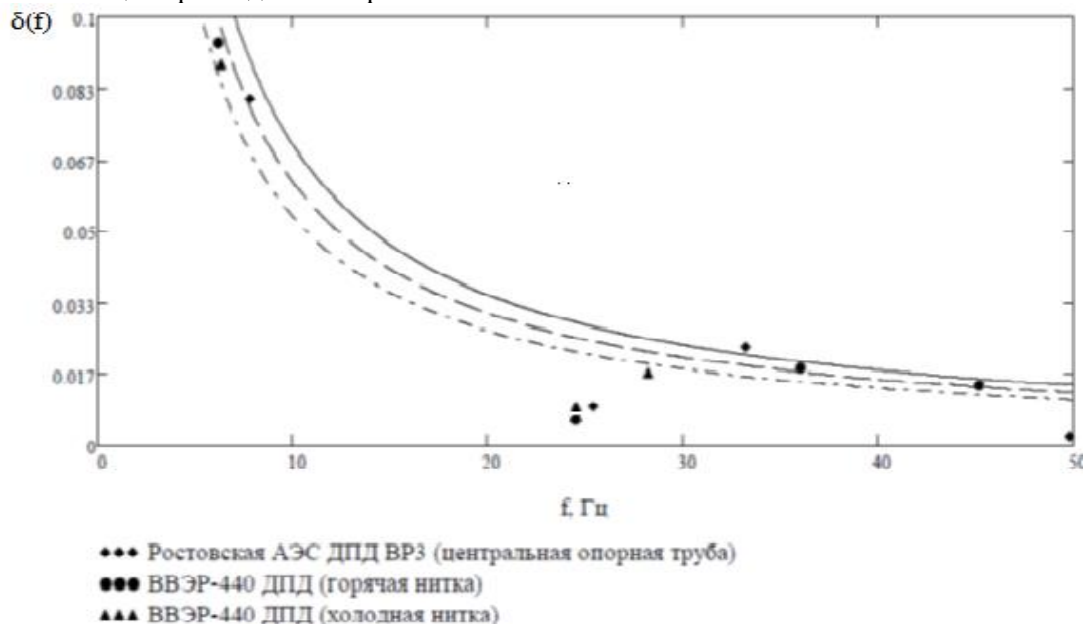


Рис. 1. Сравнение зависимостей $\delta(f)$ от датчиков пульсаций давления (ДПД) реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

предусматривается выполнение стресс-тестов на внешние воздействия, превышающие проектный уровень. Поэтому для оборудования и трубопроводов РУ АЭС кроме выполнения расчетов на проектный уровень воздействия необходимо будет выполнить расчетные анализы на внешние воздействия, превышающие проектный уровень. Следует отметить, что при возникновении повреждений вала ГЦН и подшипников уровень вибрации ГЦН резко возрастает и результат наложение их на вибрации вызванные землетрясением может существенно превысить допустимый уровень.

При выполнении расчетов по оценке интенсивности вибраций в оборудовании и акустических колебаний в теплоносителе внешнее воздействие при землетрясении задается в виде графиков спектров отклика неконсервативной системы с одной степенью свободы в зависимости от частоты собственных колебаний и значения коэффициента рассеяния энергии [6]. При этом используются спектры отклика перемещений, скоростей и ускорений системы с одной степенью свободы. Наиболее часто применяются спектры ускорений.

На Рис. 4 представлен расчетный спектр отклика, соответствующий относительному демпфированию 2 %.

В качестве расчетных сейсмических воздействий 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 (f) 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 собственные частоты, отмеченные на Рис. 4 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 РУ АЭС с ВВЭР -1000.

В работе [7] показано, что частота 9,277 Гц соответствуют вертикальной форме колебаний корпуса реактора ВВЭР-1000 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.

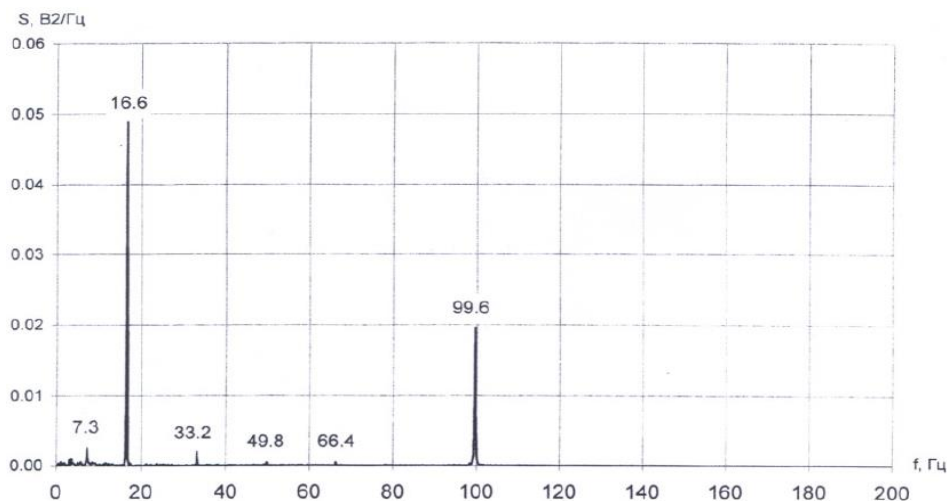


Рис. 2. АСПМ виброперемещений (всас ГЦН)

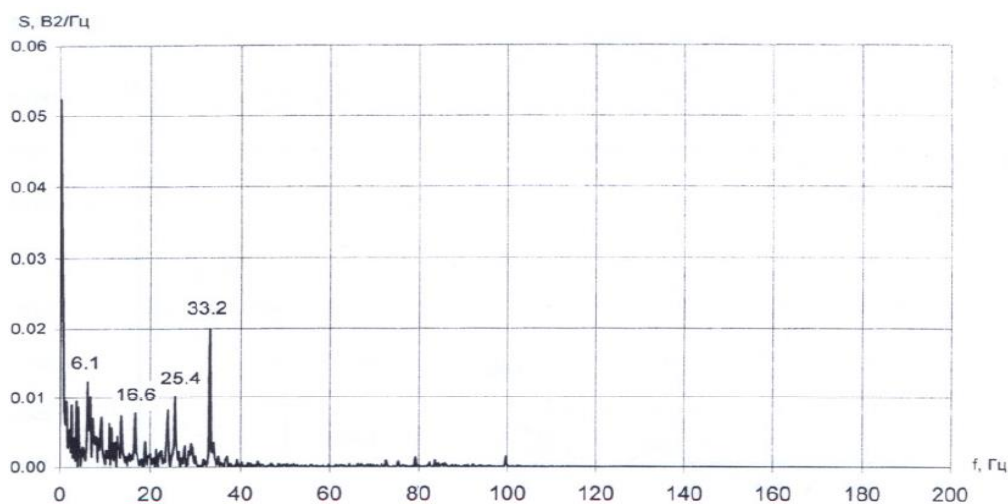


Рис. 3. АСПМ виброперемещений (напор ГЦН)

Из сопоставления спектра отклика оснований сооружения, представленного на Рис. 4 с частотами вибраций оборудования первого контура АЭС с ВВЭР-1000 [4], следует, что частоты вибраций основного оборудования реакторной установки попадают в полосу частот в спектре отклика, соответствующую максимальным значениям огибающих спектров отклика.

При возникновении в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов, вызванных вращением ГЦН и землетрясением в эксплуатационном режиме, при котором частота собственных колебаний давления теплоносителя окажется равной 8,3 Гц произойдет дополнительное многократное усиление вибраций ГЦН, в результате резонанса пульсаций давления на частоте 8,3 Гц с вибрациями строительных конструкций.

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.

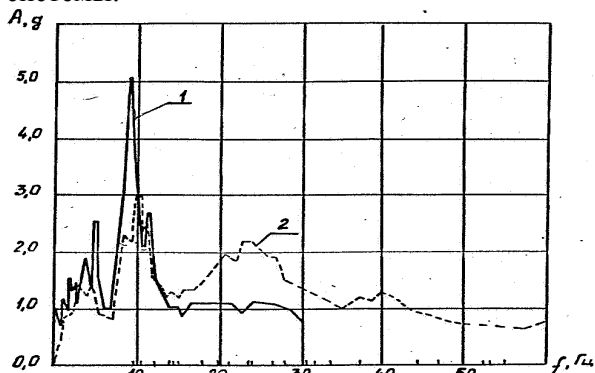


Рис. 4. Расчетные спектры отклика

Что же касается виброакустической паспортизации РУ АЭС в аварийных режимах, то так как планировать и осуществлять на энергоблоке аварийную ситуацию для измерения вибрации оборудования неприемлемо, в этих условиях может быть применен следующий подход. Виброакустическая паспортизация АЭС в аварийных режимах, с учетом двухфазного состояния теплоносителя, может быть осуществлена путем дальнейшего развития существующих верифицированных моделей и расчетных методов, используемых для виброакустической паспортизации АЭС в эксплуатационных режимах. Виброакустическую паспортизацию АЭС целесообразно проводить на стадиях их проектирования и обоснования возможности продления эксплуатации.

Предлагается с целью повышения безопасности и конкурентоспособности российских АЭС обеспечить прогнозирование и предотвращение условий возникновения

виброакустических резонансов в оборудовании АЭС на различных этапах эксплуатации и при тяжелой аварии. Необходимо подчеркнуть, что многолетний опыт эксплуатации энергоблоков на Нововоронежская АЭС и обладающие доказанным научным приоритетом результаты многолетних исследований, проводимых на кафедре АЭС НИУ МЭИ в области виброакустики, могут быть использованы для разработки, патентования и применения на практике инновационных методов обеспечивающих продление сроков эксплуатации АЭС и средств управления тяжелыми авариями.

Литература

1. Проскуряков К.Н. Виброакустическая паспортизация АЭС — средство повышения их надежности и безопасности// Теплоэнергетика. 2005. №12. С. 30 — 34.
2. Аркадов, Г.В., Павелко, В.И., Усанов, А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов — М.: Энергоатомиздат, 2004. - 344 с.
3. МР 1.5.2.05.999.0027-2011. Нормы проектирования атомных станций на сейсмостойкость. М., 2011.
4. Проскуряков К.Н., Беликов С.О., Новиков К.С. Непроектные нагрузки на конструкции парогенератора ПГВ – 1000. /Проскуряков К.Н., Беликов С.О., Новиков К.С.// Тяжелое машиностроение, ноябрь 11/2010, стр. 13-16.
5. Проскуряков К.Н., Новиков К.С. Определение области виброакустических резонансов теплоносителя и ТВС в перспективных реакторах повышенной мощности // Атомная энергия. 2010. В. 3. С. 151- 155.
6. Шарый, Н.В. Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР, автореф. дис. докт. техн. наук / Н.В. Шарый — Подольск, 2008. — 48 с.
7. 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. — Подольск, 5-я Международная научно-техническая конференция 29 мая-1 июня 2007г. — С. 36 – 48.

ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

IMPROVING THE RELIABILITY OF NPPS ON THE BASIS OF THE DATA VIBROACOUSTIC CERTIFICATION

A.I. Fedorov, K.N. Proskuryakov, M.V. Zaporozhets, C.V. Ivanov

The article considers the problem of providing seismic resistance of nuclear power plants. It is shown that at resonance the vibration of NPP equipment and pressure pulsations of the fluid is abnormal growth of vibrations and dynamic stresses in the materials of construction, which increases the likelihood of equipment failure. The analysis concluded the need for vibro-acoustic certification of units in order to predict and prevent conditions arising vibro-acoustic resonances in NPP equipment at various stages of operation

Key words: vibration, oscillation, operation period, vibroacoustic certification