

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Выполнен анализ особенностей развития резонансных колебательных процессов в первом контуре реакторов ВВЭР-1000. Рассмотрена расчетная акустическая схема для определения собственных частот колебаний давления двухфазного потока. Представлены типичные спектры пульсаций давления, а также данные о характере разрушений элементов первого контура.

Ключевые слова: реактор ВВЭР-1000, первый контур, двухфазный поток, пульсации давления, собственная частота.

Проблематика виброакустической надежности элементов первого контура реакторов ВВЭР-1000 приобрела в последние годы особую актуальность [1, 2]. Анализу явлений возникновения резонансных акустических колебательных эффектов в первом контуре ядерных энергоустановок посвящена предыдущая статья [3].

В настоящее время фактор интенсивного накопления динамической усталости в материале крышки в качестве основной причины разрушения конструктивных элементов ядерного реактора (ЯР) при анализе аварий обычно не рассматривается. В качестве возможных причин разрушения этих элементов обычно отмечают только коррозионные процессы, обусловленные воздействием борной кислоты. В некоторых случаях (Нововоронежская АЭС, энергоблок № 5) возникновение трещин в металле крышки корпуса ЯР ВВЭР-1000 было обусловлено микродефектами, которые не были обнаружены в процессе изготовления этого элемента конструкции реакторной установки (РУ).

Тем не менее известно, что определяющее влияние на уровень вибраций оказывают именно пульсации давления теплоносителя. Это подтверждается, в частности, результатами измерений этого параметра в корпусе реактора ВВЭР-1000 при увеличении тепловой мощности РУ. Соответствующие автоспектральные плотности (АСП) пульсаций давления на входе и выходе из циркуляционных петель представлены на рис. 1 и 2.

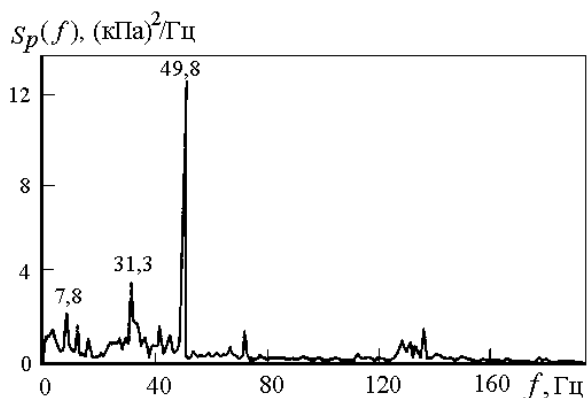


Рис. 1. АСП пульсаций давления на выходе из петли № 4 в шахте ЯР ($p = 15,9$ МПа, $T = 270$ °С).

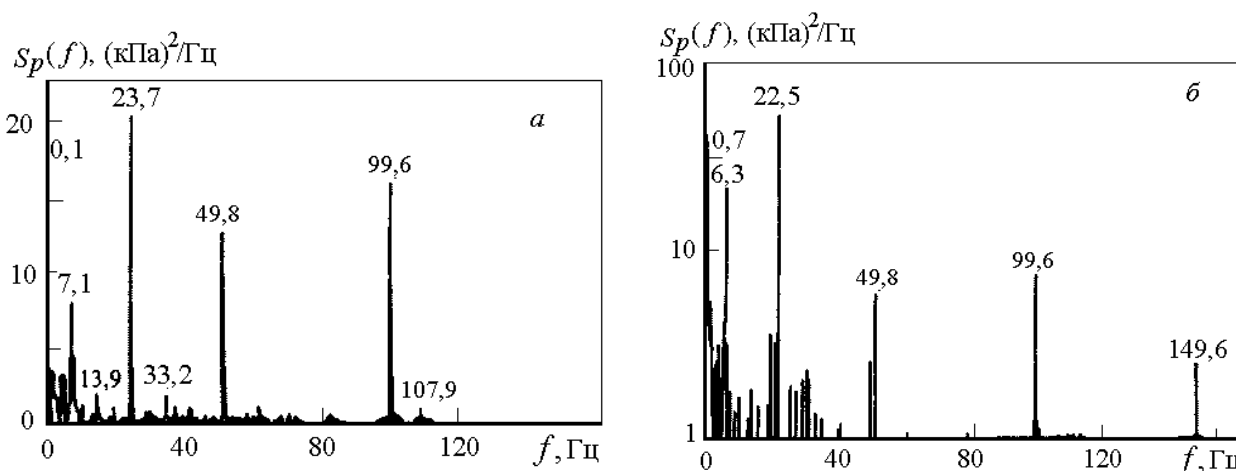
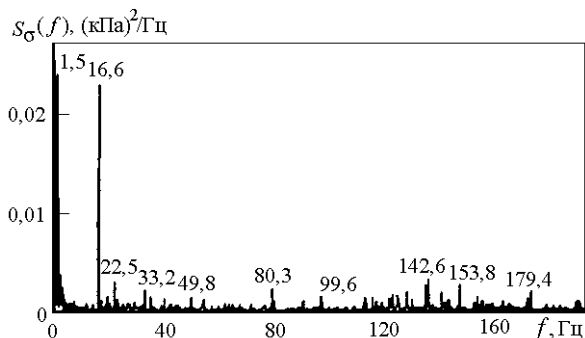


Рис. 2. АСП пульсаций давления на входе в петлю № 1 ($a - p = 16$ МПа; $T_{\text{гор}} = 281$ °С; $T_{\text{хол}} = 278$ °С; $b - p = 16$ МПа; $T_{\text{гор}} = 318$ °С; $T_{\text{хол}} = 287$ °С).

© Е. И. Шараевская, 2016

Так, в режиме, соответствующем рис. 2, а, исключением является пик на частоте 49,8 Гц, значение которого уменьшилось по сравнению с режимом нулевой мощности (АСП вибраций этого режима представлена на рис. 1). Тенденция роста АСП мощности пульсаций давления теплоносителя при увеличении мощности реактора сохраняется и на рис. 2, б. Однако высота пика на частоте 49,8 Гц имеет стойкую тенденцию к уменьшению. Анализ результатов расчета собственных частот колебаний элементов контура циркуляции свидетельствует о том, что колебания давления теплоносителя с частотой 49,8 Гц, вызванные работой главного циркуляционного насоса ГЦН-195М, усиливаются в первом контуре только в режиме нулевой мощности.

Возникновение экстремального уровня вибрации и соответствующего уровня динамических напряжений зафиксировано в области сварного шва на горячем коллекторе парогенератора ПГВ-1000

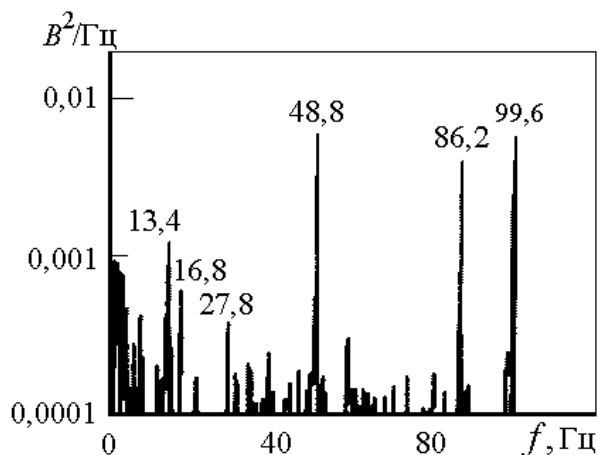


в номинальном режиме работы энергоблока. На рис. 3 представлен спектр динамических напряжений, полученный при обработке сигналов от датчика, установленного на горячем коллекторе парогенератора ПГВ-1000.

Рис. 3. АСП динамических напряжений, измеренных на горячем коллекторе парогенератора ПГВ-1000 (датчик УТА9-1, ПГ-4, $p = 16$ МПа; $T_{гор} = 318$ °С; $T_{хол} = 287$ °С).

Как следует из анализа спектральной структуры сигнала динамических напряжений на этом рисунке, один из пиков напряжений в горячем коллекторе обусловлен работой ГЦН и соответствует его оборотной частоте вращения. Возникновение второго пика напряжений значительной интенсивности на частоте 1,5 Гц обусловлено режимом эксплуатации и связано, по-видимому, с резонансными явлениями. В этой связи следует отметить, что возникновение интенсивного спектрального пика в напряженном состоянии металла в непосредственной близости от сварного шва в области инфранизких частот представляет собой потенциальную угрозу целостности узла горячего коллектора ПГВ-1000, особенно в сочетании с развитием в элементах этой конструкции отмеченных выше трудноконтролируемых процессов межкристаллитной коррозии.

Анализ спектральной структуры взаимного спектра сигналов диагностических датчиков динамических напряжений в конструкции горячего коллектора парогенератора типа ПГВ-213 и вибро-



акселерометра, установленного на этом же конструктивном элементе (вышеуказанная взаимная АСП представлена на рис. 4), свидетельствует об отсутствии интенсивных пиков спектральной плотности при переходе ЯР к минимальному уровню мощности.

Рис. 4. Взаимная АСП сигналов датчиков динамических напряжений и виброперемещений (датчики УТА9-1 и В1W1, ПГ-4 и напор ГЦН-4, $p = 16$ МПа; $T_{гор} = 281$ °С; $T_{хол} = 287$ °С).

Реакция конструкции горячего коллектора на пульсации давления теплоносителя, обусловленная работой ГЦН, отчетливо выражена на оборотной и кратных ей частотах вращения насосного агрегата, в то время как источник возникновения напряжений на частоте 1,5 Гц отсутствует или, по крайней мере, существенно ослаблен. Присутствие в спектральных характеристиках пульсаций давления на частотах колебаний, кратных оборотной частоте вращения ГЦН, соответствует гармоническим составляющим следующего ряда: 16,6; 33,2; 49,8 и 99,6 Гц. Изложенное позволяет заключить, что абсолютные и относительные значения амплитуд колебаний на этих частотах зависят от режимных параметров энергоблока.

Таким образом, представленные выше результаты натурных экспериментов по исследованию термоакустических колебаний в активной зоне (АкЗ) ЯР и свидетельствуют о следующем:

в главном циркуляционном контуре (ГЦК) водо-водяных энергетических ЯР существуют практически неконтролируемые современными средствами автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) АЭС скрытые теплогидродинамические процессы (ТГДП), возникновение которых не предусмотрено проектами РУ;

указанные нерегламентные ТГДП проявляются в виде автоколебаний, параметрических резонансов, резонансных взаимодействий колебаний теплоносителя с колебаниями оборудования и в прочих системных эффектах;

возникновение указанных резонансных эффектов не может прогнозироваться современными теплогидравлическими расчетными кодами (ТГРК) улучшенной оценки, однако способно инициировать тяжелые повреждения элементов конструкции ГЦК.

С учетом потенциальной опасности, которую представляют собой вышеуказанные ТГДП, далее целесообразно рассмотреть обусловленные их влиянием факторы, способствующие росту динамических напряжений и развитию повреждений в крышках корпусов реакторов водо-водяного типа.

Расположение трещин в металле крышки реактора при известной аварии на АЭС Дейвис-Бессе-1 представлено на рис. 5 и 6 по данным работ [4 - 6].

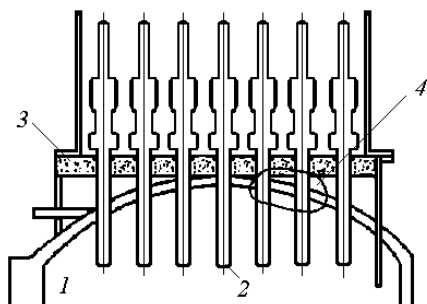


Рис. 5. Крышка корпуса реактора и блок защитных труб: 1 - верхняя часть реактора; 2 - орган системы управления и защиты (СУЗ); 3 – тепловая изоляция; 4 - область расположения трещин.

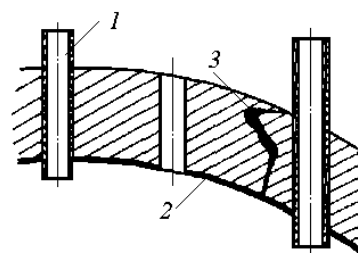


Рис. 6. Фрагмент крышки корпуса реактора: 1 - патрубков ввода органа СУЗ; 2 - наплавка из нержавеющей стали; 3 – обнаруженная трещина.

Во всех случаях подобных отказов, связанных с повреждениями крышек горячих коллекторов парогенераторов, а также корпусов ЯР, анализ этих аварий ограничивался констатацией наличия коррозии и установлением влияния на этот процесс борной кислоты. Возможное возникновение динамической усталости металла не рассматривалось, в силу чего потеря несущей способности крышек воспринималась как внезапный отказ и обычно обнаруживалась случайно ввиду того, что в настоящее время возможность надежной оценки ресурса указанных элементов конструкции РУ отсутствует. По этой причине прогнозирование развития подобных повреждений практически не может быть выполнено. В значительной мере указанное обстоятельство обусловлено тем, что механизм коррозионного воздействия на металл в условиях вибраций, особенно широкополосного спектра, изменяющего свои характеристики в зависимости от режима эксплуатации, практически не исследован. Вместе с тем вынужденный простой ядерного энергоблока, вызванный, например, необходимостью замены крышки корпуса реактора приводит к экономическому ущербу, измеряемому сотнями миллионов долларов. Так, общие потери вследствие останова АЭС Дейвис-Бессе-1 составили 375 млн долл. [4, 5].

В этой связи целесообразно рассмотреть по данным работы [6] результаты измерений сигналов датчиков пульсаций давления, вибраций, перемещений и динамических напряжений в некоторых элементах РУ ВВЭР-1000, полученных на энергоблоке № 1 Волгодонской АЭС при всех работающих в номинальном режиме ГЦН. АСП мощности динамических напряжений, измеренных на напорном патрубке ГЦН-195М, а также взаимный спектр сигналов датчиков давления теплоносителя в крышке корпуса ЯР и виброакселерометра, установленного на блоке защитных труб, соответственно приведены на рис. 7 и 8.

Анализ частотной структуры этих спектральных плотностей позволяет выявить ряд важных особенностей стохастических ТГДП в первом контуре РУ типа В-320 [7]. Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что в АСП сигнала динамических напряжений, представленной на рис. 7, присутствуют спектральные составляющие, обусловленные пульсациями теплоносителя на оборотной частоте вращения ГЦН, равной 16,6 Гц, а также кратных ей частотах (33,2; 49,8; 66,4; 99,6 Гц и т.д.). Показательно, что составляющие этого сигнала, возникающие на кратных частотах, выше динамиче-

ских напряжений, соответствующих оборотной частоте насосного агрегата, которая составляет 16,6 Гц. Представляется возможным утверждать, что указанное усиление колебания давления теплоносителя на частоте 49,8 Гц обусловлено резонансным взаимодействием теплоносителя и поверхности крышки ЯР на той же частоте. При этом источник резонансного колебания, возникшего в структуре конструктивных элементов внутрикорпусных устройств, является доминирующим и его вклад в структуру АСП сигнала динамического напряжения существенно превышает вклад от других источников вынужденных и самовозбуждающихся колебаний. Кроме того, реализация АСП на рис. 10 иллюстрирует также и тот факт, что по мере удаления от вышеуказанного доминирующего источника колебаний в крышке корпуса ЯР его влияние на вибрационные процессы, пульсации давления теплоносителя, перемещения и динамические напряжения в металле уменьшается при одновременном увеличении воздействия других источников колебаний. Изменение теплофизических параметров теплоносителя при работе реактора на низком уровне мощности (см. рис. 7, б) приводит к уменьшению значения спектрального максимума на частоте 49,8 Гц по сравнению с АСП, представленной на рис. 7, а (при нулевой мощности реактора).

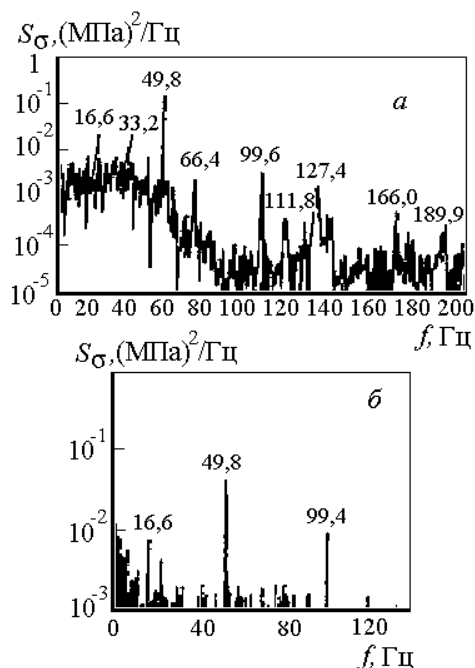


Рис. 7. Реализация АСП динамических напряжений, измеренных тензодатчиком, установленным на напорном патрубке ГЦН-195М: а - $p = 15,9$ МПа, $t = 270$ °С; б - $p = 16$ МПа, $t_{\text{вых}} = 281$ °С, $t_{\text{вх}} = 278$ °С.

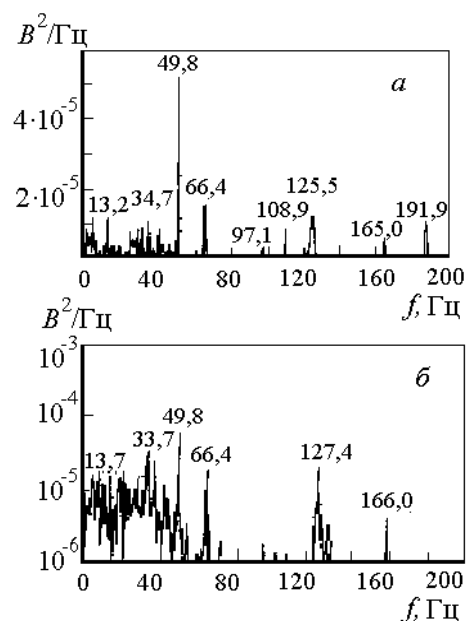


Рис. 8. Взаимная АСП сигналов датчика пульсации давления (установлен на холодном патрубке ЯР) и датчика виброускорений ($p = 15,9$ МПа, $t = 270$ °С), расположенного соответственно на блоке защитных труб (а) и крышке корпуса ЯР (б).

Результаты оценочного расчета собственной частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ), приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что значение СЧКДТ в АкЗ при параметрах теплоносителя $t = 270$ °С и $p = 15,9$ МПа равно 49,3 Гц и находится в области резонансного взаимодействия колебаний теплоносителя, вызванных вращением ротора ГЦН, с вибрациями крышки корпуса ЯР на частоте 49,8 Гц.

Таблица. Результаты расчета и измерения СЧКДТ, Гц

Элемент оборудования	Нулевая мощность ($t = 270$ °С, $p = 15,9$ МПа)		Номинальная мощность	
	Расчет	Измерения	Расчет	Измерения
АкЗ реактора	49,3	49,8	41,5	-
Компенсатор давления	7,2	7,8	6,9	7,1
Коллектор парогенератора:				
горячий	34,5	32,7	25,9	22,2; 22,9
холодный	34,5	31,3; 41,0	32,4	33,2

Как следует из данных таблицы, частоты пульсаций давления теплоносителя существенно зависят и от мощности реактора. Так, например, при работе реактора на номинальном уровне мощности значения СЧКДТ в АкЗ выходят из области резонансного взаимодействия с колебаниями крышки корпуса ЯР в месте прохода через нее блока защитных труб. Это уменьшает динамические напряжения на частоте 49,8 Гц в одной и той же точке измерений, что следует из сопоставления АСП, представленных на рис. 7.

Показательно, что по мере удаления места установки датчика виброускорений от крышки корпуса ЯР (от источника вибраций с частотой 49,8 Гц) усиливается влияние других близко расположенных источников колебаний, как это иллюстрируется взаимной спектральной плотностью двухмерного диагностического сигнала, представленной на рис. 8, б. В этих условиях близость частот пульсаций давления теплоносителя и колебаний крышки корпуса ЯР перестает оказывать доминирующее воздействие на динамические нагрузки конструкции в указанном месте измерения. Кроме того, динамические напряжения в напорном трубопроводе имеют выраженный максимум на частоте 49,8 Гц (см. рис. 7). На этой же частоте наблюдается и максимум взаимной спектральной плотности сигналов динамических напряжений и виброперемещений.

Характерной особенностью режима при $t = 270$ °С и $p = 15,9$ МПа является то, что СЧКДТ в АкЗ реактора находится в резонансной области с вибрациями и пульсациями давления на частоте 49,8 Гц. Измерения показывают, что при увеличении мощности реактора СЧКДТ теплоносителя в АкЗ все более удаляется от резонансной области, и пик на частоте 49,8 Гц перестает быть доминирующим при увеличении амплитуд пульсаций давления на других частотах. В работе [6] отмечается тот факт, что кратковременный режим интенсивных высокоцикловых нагружений крышки корпуса ЯР всегда наблюдается при пусках-остановах реактора ВВЭР-1000, что приводит к накоплению усталости и последующему образованию трещин в металле. Произведенный анализ позволяет прогнозировать режим наступления резонансного взаимодействия теплоносителя и элементов конструкции ЯР на основе рассмотренного механизма взаимодействия внешних возмущений, генерируемых потоком и вызванных работой ГЦН, с вибрациями крышки корпуса ЯР, которые обусловлены автоколебательными процессами в АкЗ ЯР. Вполне очевидно, что нет принципиальных различий в условиях возникновения резонансных колебаний теплоносителя и вибраций крышки для корпусных реакторов некипящего PWR и кипящего BWR типов. Вместе с тем аномальный эксплуатационный режим, при котором значение СЧКДТ АкЗ соответствует области резонансных эффектов в крышке корпуса ЯР, естественно, существенно зависит не только от конструктивных особенностей оборудования РУ и компоновки ГЦК, но и от режимных параметров эксплуатации соответствующих типов ЯЭУ. Представленные результаты свидетельствуют о том, что на современных АЭС существуют значительные неиспользованные возможности для повышения надежности и увеличения срока службы оборудования, а также для уменьшения вероятности его внезапных отказов и риска возникновения аварий, вызванных аномальными ТГДП. Наряду с указанными процессами важным, но далеко не всегда оцениваемым по достоинству фактором, способным инициировать опасные повреждения АкЗ, являются вибрации внутрикорпусных устройств и других элементов конструкции РУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. - 484 с.
2. *Теплофизика аварий ядерных реакторов: монография* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. - 528 с.
3. *Шараевская Е. И.* Актуальные задачи виброакустической диагностики первого контура реакторов ВВЭР // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2015. - Вип. 25. - С. 25 - 29.
4. *Millimeters From Disaster* // WISE/NIRS Nuclear Monitor. - March 22. 2002.
5. *Alarm Over Faulty Design in European PWRs* // WISE News Communiqui 385. 3770, 2002.
6. *Проскураков К. Н.* Теплогидравлические причины роста динамических напряжений трещин в крышках корпусных реакторов // Теплоэнергетика. - 2006. - № 9. - С. 22 - 25.
7. *Реакторная установка В-320.* Техническое описание и информация по безопасности 320.00.00.00.000. Д61. - ОКБ «Гидропресс», 1986. - 756 с.

О. І. ШАРАЄВСЬКА

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІБРОАКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ У ПЕРШОМУ КОНТУРІ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Виконано аналіз особливостей розвитку резонансних коливальних процесів у першому контурі реакторів ВВЕР-1000. Розглянуто розрахункову акустичну схему для визначення власних частот коливань тиску двофазного потоку. Наведено типові спектри пульсацій тиску, а також данні щодо характеру руйнувань елементів першого контура.

Ключові слова: реактор ВВЕР-1000, перший контур, двофазний потік, пульсації тиску, власна частота.

E. I. Sharayevska

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106,
Kyiv, 03028, Ukraine*

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF VIBROACOUSTICAL VIBRATIONS IN THE PRIMARY CIRCUIT OF VVER-1000

An analysis of the features of resonant vibratory processes in the primary circuit of VVER-1000. We consider the acoustic design scheme for determining the natural vibration frequencies of pressure two-phase flow. Shows typical spectra of pressure fluctuations, as well as data on the mode of the destruction of the first circuit elements.

Keywords: reactor VVER-1000, the first circuit, two-phase flow, pressure pulsation, the natural frequency.

REFERENCES

1. *Thermophysics of nuclear power plants safety: monografija / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevskij, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2010. - 484 p. (Rus)*
2. *Thermophysics of nuclear reactors breakdowns: monografija / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevskij, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2012. - 528 p. (Rus)*
3. *Sharaevskaja O. I. Priority tasks vibroacoustic diagnostics of primary circuit VVER reactor // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2015. - Vol. 25. - P. 25 - 29. (Rus)*
4. *Millimeters From Disaster // WISE/NIRS Nuclear Monitor. - March 22. 2002.*
5. *Alarm Over Faulty Design in European PWRs // WISE News Communiqui 385. 3770, 2002.*
6. *Proskouriakov K. N. Heat-gydraulic reasons for the growth of dynamic stress cracks in the lids of tank-type reactors // Teploenergetika. - 2006. - № 9. - P. 22 - 25. (Rus)*
7. *Reactor installation V-320. Technical details and information security 320.00.00.00.000. D61. - ОКВ «Gydropress», 1986. - 756 p. (Rus)*

Надійшла 26.10.2015
Received 26.10.2015