
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЧАСТОТ АКУСТИЧЕСКИХ
СТОЯЧИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ РЕАКТОРАМИ ВВЭР**

© 2019 К.Н. Проскуряков, С.К. Белова, А.В. Аникеев, И. Афшар

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Проведено сопоставление результатов расчета частот акустических стоячих волн с автоспектральными плотностями мощности сигналов датчиков пульсаций давления для сложных комбинаций акустических элементов 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета частот акустических стоячих волн с данными измерений. Приведен новый подход к методу расчёта частот акустических стоячих волн комбинационных акустических контуров в системе теплоносителя в ВВЭР-440. Впервые исследован реактор с трубопроводами холодной и горячей ниток как сложный резонатор Гельмгольца. Установлено, что частоты акустических стоячих волн зависят от числа учитываемых в расчете акустических элементов, содержащихся в подводящих и отводящих трубопроводах.

Ключевые слова: стоячие волны, АСПМ, акустическая масса, акустическая податливость, верификация.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 05.07.2019

Принята к публикации 10.07.2019

Первый контур водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) представляет собой разветвленную гидравлическую систему трубопроводов, содержащую элементы со сложной гидродинамической системой потока. Имеется целый ряд элементов, которые могут вызвать неустойчивость и колебания потока теплоносителя, например, зона входных патрубков реактора и опускающего кольцевого канала между корпусом реактора и оболочкой шахты. При входе в реактор поток изменяет свое направление на 90° , одновременно уменьшается скорость теплоносителя. Сочетание диффузионного эффекта с резким поворотом способствует турбулизации и образованию отрывов потока. Гидродинамические возмущения на входе в активную зону вызывает резкий поворот потока на 180° внизу реактора в совокупности со значительным увеличением пульсаций скорости и давления. Пульсации и колебания давления теплоносителя в трубопроводах, вызывая вибрации последних, оказывают непосредственное влияние на прочность трубопроводов, их опор и связанного с ними технологического оборудования [1, 2]. Гидравлические системы АЭС представляют собой цепь сочлененных между собой элементов различной сложности, которые в целом образуют звукопровод [3]. Наиболее простыми в таких системах являются трубные устройства. Поскольку они выполняются с различными элементами – расширениями, камерами, отводными каналами, дросселями, арматурой и т.д., общая теория распространения звука в этих устройствах сложна [4, 5]. Однако, если неоднородности звукопровода меньше длины волны, их можно рассматривать как акустические элементы с сосредоточенными параметрами, а весь звукопровод, как состоящий из отрезков волноводов, имеющих участки с сосредоточенными параметрами [3-6].

Как любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, теплоноситель в первом контуре имеет собственные частоты колебаний, которые могут резонировать с источниками гидродинамических возмущений при совпадении частот или проявляться, как менее выраженные линии в спектре, если резонансная (собственная) частота теплоносителя отличается от частот источников гидродинамических возмущений. Таким образом, уменьшение пульсаций давления и скорости теплоносителя является одним из необходимых критериев предотвращения или уменьшения вибраций.

Теплоноситель в основном оборудовании первого контура АЭС представляет собой колебательные акустические системы. В этих системах распределены акустическая масса m_{ac} и акустическая податливость C_a . На рисунке 1 представлена упрощенная электрическая система замещения акустических элементов первого контура двухконтурной АЭС [3].

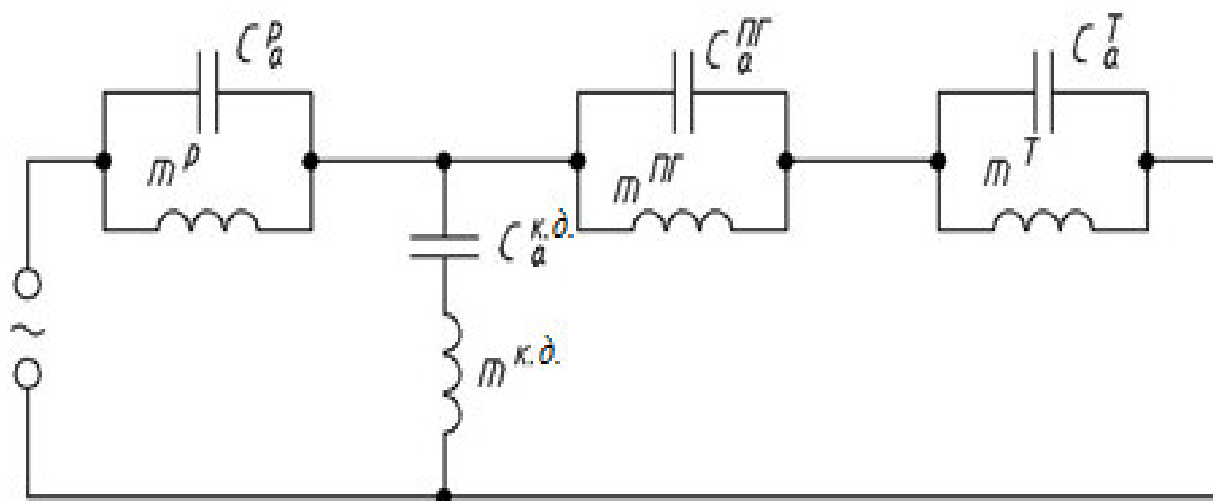


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема замещения акустических элементов первого контура АЭС с реактором ВВЭР (p – реактор; $к.д.$ – компенсатор давления; T – трубопровод; $ПГ$ – парогенератор)
[Simplified electrical circuit diagram of replacement of acoustic elements of the primary circuit of nuclear power plants with WWER reactors. Codes: p – reactor; $к.д.$ – pressurizer; T – pipe; $ПГ$ – steam generator]

Эта эквивалентная схема замещения необходима для расчета собственных частот колебаний теплоносителя в одной петле первого контура АЭС с реактором типа ВВЭР.

В работе [7] показано, что система акустических элементов обладает свойствами, которые не могут быть получены простой суперпозицией акустических свойств составляющих ее элементов. Созданная К.Н. Проскуряковым акустическая модель ядерного реактора показывает, что таким новым системным свойством как способность усиления и гашения определенных частот колебаний в оборудовании первого контура, обладает комбинация ядерного реактора с присоединенными к нему трубопроводами, образующими горячую и холодную нитки. Согласно этой модели система образованная реактором и подключенными к нему петлями теплоносителя представляет собой резонатор Гельмгольца, генерирующий одновременно несколько акустических стоячих волн (АСВ).

В литературе имеются сведения о создании таких резонаторов, выполняющих роль глушителя автомобиля, усилителя колебаний органного типа, усилителя колебаний в радиотехнических устройствах. Однако, сведений о возможности представлении ядерного реактора в качестве сложного многоструйного с неравномерно подогреваемой, перекачиваемой насосом текучей средой в виде резонатора Гельмгольца в литературе не имеется.

Количество возбужденных волн в такой модели соответствует количеству неоднородностей в контуре. Определение собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) проведено по формуле Томсона [8] согласно методу электроакустических аналогий [3, 4, 5, 6]. Акустическая масса m_{ac} присоединенных к реактору трубопроводов и акустическая податливость C_p объема реактора, позволяют определить собственные частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) генерируемых этой акустической системой по формуле Томсона (1):

$$f_{ac} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{m_{ac} \cdot C_p}} \quad (1)$$

где f_{ac} – расчетная частота собственных колебаний системы, Гц;

m_{ac} – акустическая масса акустической системы, зависит от количества учитываемых в расчете акустических элементов присоединенных трубопроводов, формулы (2)-(3):

$$\frac{1}{m_{ac}} = 6 \left(\frac{1}{m_{комб_х}} + \frac{1}{m_{комб_г}} \right), \quad (2)$$

$$C_p = \frac{V_p}{\rho_{ср} \cdot a_{ср}^2}, \left(\frac{м^4 \cdot с^2}{кг} \right) \quad (3)$$

где скорость звука с учётом деформации металла и сжимаемости воды рассчитывается по формуле (4)[9]:

$$a_{ср} = \frac{1}{\sqrt{\rho_{ср} \left(\frac{D_p}{E_m \cdot \delta} + \frac{1}{\rho_{ср} \cdot c_{ср}^2} \right)}} \quad (4)$$

где $D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$ – диаметр реактора;

V_p – объём реактора, м³;

$\rho_{ср}$ – значение средней по объёму реактора плотности воды, кг/м³;

$c_{ср}$ – значение средней по объёму реактора скорости звука в воде, м/с;

δ – толщина стенки корпуса реактора, м;

E_m – объемный модуль упругости материала;

$E_{ж} = \rho_{ж} \cdot c^2$ – объемный модуль упругости жидкости;

$m_{комб}$ – акустическая масса комбинированной системы трубопроводов;

C_p – акустическая податливость теплоносителя в объёме реактора при средних значениях давления и температуры в реакторе.

Путем применения акустической модели реактора (с подключенными трубопроводами холодной и горячей ниток, как сложного резонатора Гельмгольца), по приведенной выше методике, получены результаты вариантных расчетов частот АСВ для комбинаций числа участков (и соответственно длин подсоединенных трубопроводов горячей и холодной ниток), в различных режимах пуска энергоблока.

В таблице 1 приведены результаты расчёта частот (Гц) АСВ в номинальном режиме работы энергоблока ВВЭР-440, для трех моделей акустической массы, соответствующих пяти вариантам количества учитываемых в расчетной модели акустических элементов труб. Разработанная акустическая схема первого контура показана на рисунке 2. Приведенная схема включает основные элементы 1-го контура АЭС с ВВЭР-440.

Таблица 1 – Результаты расчета частот (Гц) АСВ в участках акустической схемы первого контура [Results of ASW frequency (Hz) calculation in sections of the first circuit acoustic diagram]

Участки	Для пяти вариантов длин труб				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Параметры номинального режима: $T = 280,5^{\circ}\text{C}$, $P = 12,27\text{ МПа}$					
P+6вх+6вых	19,51	10,38	9,58	7,66	23,11
P+6вх	13,90	8,25	8,25	6,56	13,90
P+6вых	14,17	6,30	5,25	3,93	19,54

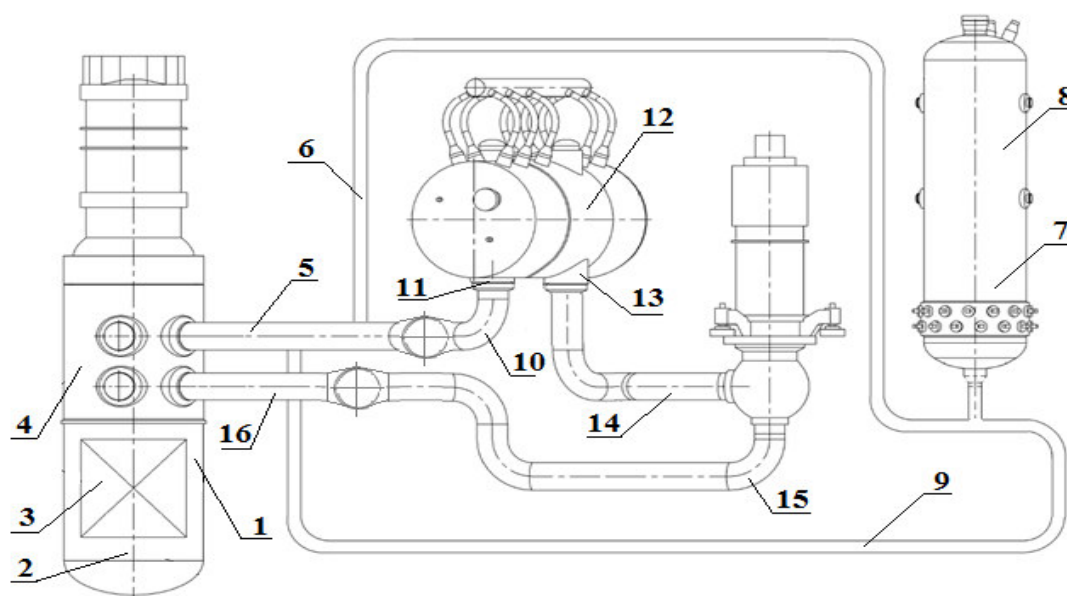


Рисунок 2 – Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440 3 блока НВАЭС: 1 – опускной участок реактора; 2 – пространство под активной зоной; 3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной; 5 – участок ГЦК от реактора до ГЗЗ; 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления; 7 – компенсатор давления (вода); 8 – компенсатор давления (пар); 9 – дыхательный трубопровод от компенсатора давления до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки главного циркуляционного контура (ГЦК) от главной запорной задвижки (ГЗЗ) до горячего коллектора; 11 – горячий коллектор ПГ; 12 – теплообменная поверхность ПГ; 13 – холодный коллектор ПГ; 14 – участок от холодного коллектора ПГ до ГЦН; 15 – участок холодной нитки ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 – участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускной участок реактора [Acoustic circuit of NPP with WWER – 440 of Novovoronezh NPP unit 3:1 - downcomer section of the reactor; 2 – the space below the reactor core; 3 - reactor core; 4 – the space above the reactor core; 5 – phase main circulation circuit reactor to main loop isolation valve; 6 – respiratory tubing from a hot thread pressurizer; 7 – pressurizer (volume of water); 8 – pressurizer (volume of steam); 9 – respiratory pipeline to pressurizer from a hot leg; 10 – a section hot thread main circulation circuit (MCC) from main loop isolation valve (MLIV) to hot manifold; 11 – hot manifold steam-generator; 12 – heat exchange surface of steam-generator; 13 – cold manifold steam-generator; 14 – the plot from the cold reservoir of steam-generator to main loop isolation valve; 15 – plot of the cold thread of main circulation circuit from main circulating pump to main loop isolation valve; 16 – land of the cold thread of main circulation circuit from main loop isolation valve to the entrance of the standpipe portion of the reactor]

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования SUS.1 Размещение датчиков системы SUS для ВВЭР-440 показано на рисунке 3.

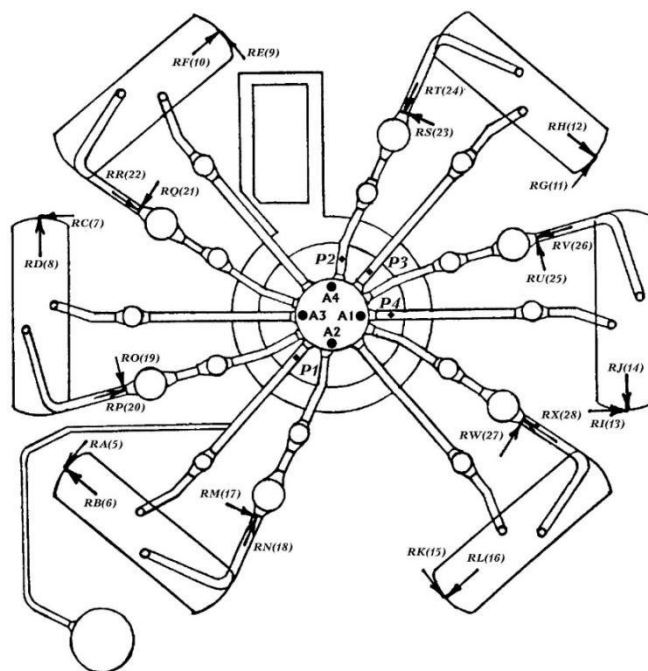


Рисунок 3 – Размещение датчиков системы SUS для ВВЭР-440 [Placement of SUS sensors for WVER-440]

Система SUS в режимах нормальной эксплуатации реакторной установки (РУ) обеспечивает вибродиагностику основного оборудования и трубопроводов РУ (реактор с ВКУ и ТВС, ГЦТ, ПГ) с целью раннего выявления аномальных вибрационных состояний этого оборудования, вызванных изменением условий закрепления жесткостных характеристик опор или возрастанием гидродинамических нагрузок со стороны теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-440. Эксплуатация системы во время переходных процессов, а также при пуске и останове энергоблока по инструкции не допускается.

Система является информационной (по результатам ее работы не происходит каких-либо оперативных переключений). Система предназначена для периодических измерений. Принцип действия системы заключается в том, что в начале каждой кампании производится контроль вибросостояния оборудования, в результате чего оператор получает спектры механических колебаний компонентов первого контура – такие спектры считаются базовыми. В течение работы энергоблока с периодичностью не менее 2 раз за кампанию производятся текущие измерения, и на основании сравнения их с базовыми значениями, делается вывод о возможности выхода из строя каких-либо элементов контролируемого оборудования.

Первичными преобразователями в системе SUS служат:

- датчики абсолютных перемещений (ДАП) – 4 шт.;
- датчики относительных перемещений (ДОП) – 24 шт.;
- датчики пульсаций давления (ДПД) – 4 шт.

Внедрены и используются в виде программных пакетов: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах [10]. Автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ДПД для номинального режима представлены на рисунке 4.

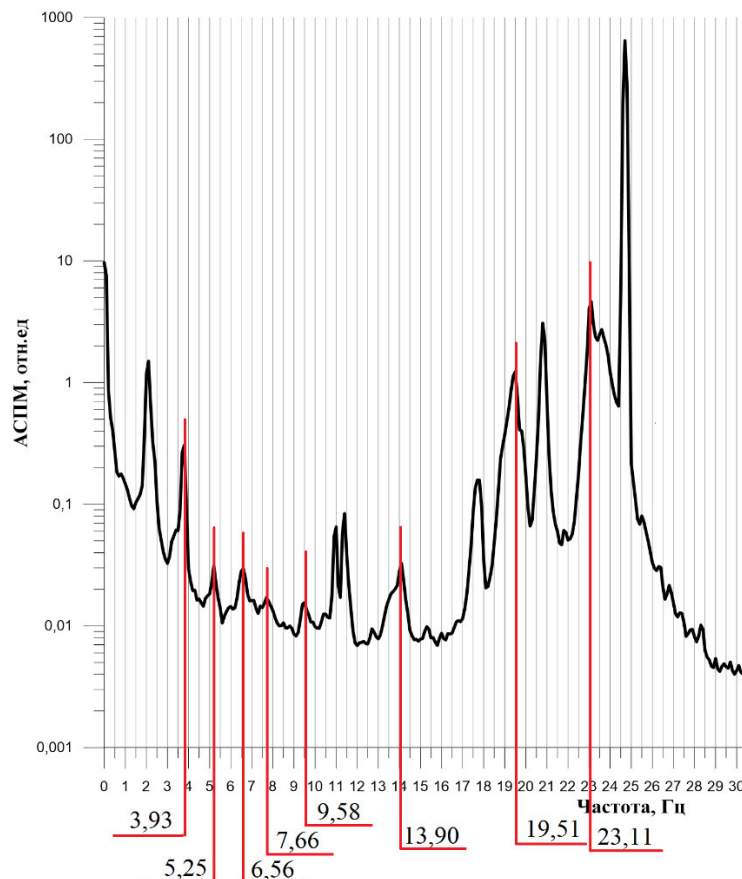


Рисунок 4 – АСПМ ВВЭР-440 режим номинальный [Auto spectral power density of WVER-440 at nominal conditions]

Из рисунков видно, что АСПМ имеет пилообразный характер, причем большинство из доминирующих пиков в публикациях, посвященных идентификации источников возбуждения АСВ, до настоящего времени не интерпретированы [2, 11]. Результаты расчета частоты АСВ по принятой методике сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [2] для ВВЭР-440. Результаты сопоставления:

- 0,6 Гц – соответствует АСВ компенсатора давления;
- 0,6-0,625 Гц – глобальное колебание давления в 1 контуре;
- 0,875-1,25 Гц – горизонтальные колебания всей петли;
- 3,6-5,3 Гц – совместные колебания корпуса и шахты по круговой траектории;
- 6,0 Гц – 1-я петлевая АСВ;
- 6,2 Гц – изгибные колебания пучка ТВЭЛ;
- 5,3-7,3 Гц – совместные колебания корпуса и шахты по круговой траектории (в противоположном направлении);
- 8,0-8,375 Гц – акустическая стоячая волна – 2 (с пучностью на вертикальной оси реактора);
- 8,2 Гц – изгибные колебания пучка ТВЭЛ;
- 10-12 Гц – маятниковые колебания корпуса реактора;
- 11,0-11,5 Гц – мультиплет (круговые колебания корпуса реактора и внутрикорпусных устройств);
- 11,9 Гц – вращательные колебания пучка ТВЭЛ;
- 13,5-14,0 Гц – маятниковые колебания корпуса реактора;
- 14-18 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;

- 18,75-19,125 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;
- 20,1 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ, колебания изгибные;;
- 2,4 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ, колебания изгибные;
- 23,125-23,375 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;
- 24,625-24,75 Гц – оборотная частота ГЦН;
- 24,8 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ + чехол, колебания изгибные.

Большинство заметных пиков обусловлено колебаниями давления теплоносителя в отдельных элементах акустической схемы и в комбинациях акустических элементов, принятых в расчёте. Совпадение полученной расчётной частоты АСВ с результатами измерения частоты вибраций ТВС [2] позволяет сделать вывод о том, что причиной возникновения колебаний ТВС являются самовозбуждающиеся АСВ.

Результаты расчета частот АСВ в первом контуре ВВЭР-440 являются характеристикой его индивидуального акустического поля, которое не может быть создано в лабораторных условиях. По этой причине в указанных ниже работах [12-16] исследовано не влияние АСВ на вибрации ТВС, а влияние вихрей, представляющих собой локальные, а не системные причины вибраций.

В работе [12] для моделирования сложных трехмерных процессов в активных зонах реакторов проведены теплогидравлические и гидродинамические расчеты с использованием CFD (computational fluid dynamics) – кодов.

Для исследования были использованы сетки с 7, 16 и 60 миллионами элементов. показано, что точный по времени расчет CFD может быть использован для определения нагрузок на ТВЭЛ для последующего динамического анализа. В работе [13] представлены результаты моделирования больших вихрей с использованием пучков топлива CANDU и вихревых явлений. В работе [14] использовались методы моделирования крупных вихрей (LES- Large Eddy Simulation) для определения зависящих от времени сил, действующих на пучок стержней. В работе [15] рассмотрено взаимодействие между потоком и конструкцией в упрощенных ТВС, показано, что потеря устойчивости стержня происходит при больших осевых скоростях потока. В работе [16] представлены данные об индуцированной потоком вибрации и связанного с ней фреттингового износа в пучке тепловыделяющих элементов. Для вычисления потоков с высоким числом Рейнольдса использован теплогидравлический код Hydra-TN, разработанный в Лос-Аламосской Национальной лаборатории. Запатентованный код VITRAN, разработанный компанией Вестингауз, применен для того чтобы выполнить нелинейные вычисления структурной динамики и скорости износа.

Однако, выяснилось, что ТВС и ТВЭЛ, разработанные для PWR, оказались непригодными для использования в ВВЭР, а ТВС и ТВЭЛ, разработанные для ВВЭР, не годятся для использования в реакторах PWR. Причины этого заключаются в том, что каждая модификация реакторов имеет свое индивидуальное акустическое поле, в котором вибрации ТВС удовлетворяют требованию не превышения допустимого уровня. Для обеспечения выполнения этого требования в ином акустическом поле необходимо соответствующее изменение конструкции ТВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод и алгоритм расчета АСВ обладает следующими преимуществами в сравнении с существующими:

- имеет ясный физический смысл и механическую интерпретацию;
- результаты расчета частот пятнадцати АСВ с удовлетворительной для практических целей точностью подтверждаются результатами измерения;
- не требует разработки сложного программного обеспечения и привлечения профессионалов в области информационных технологий;

- результаты расчетно-теоретического анализа АСВ, генерируемых реактором с присоединенными холодными и горячими участками петель первого контура АЭС с ВВЭР-440, верифицированы данными измерений на 3 энергоблоке Нововоронежской АЭС.
- полученные результаты подтверждают работоспособность акустической модели реактора с трубопроводами холодной и горячей ниток, согласно которой реактор представляет собой систему резонаторов Гельмгольца.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность руководству НВАЭС директору В.П. Поварову, главному инженеру А.И. Федорову, заместителю директора В.А. Шварову и начальнику отдела диагностики М.Т. Слепову за организацию и проведение специально разработанной расширенной программы экспериментов, необходимых для верификации разработанных НИУ «МЭИ» акустических моделей АЭС с реактором ВВЭР-440.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин, А. А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения / А. А. Самарин. – Москва : Энергия, 1979. – 288 с.
2. Аркадов, Г. В. Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г. В. Аркадов, В. И. Павелко, А. И. Усанов // Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
3. Проскуряков, К. Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ / К. Н. Проскуряков // Москва : МЭИ, 1984. – 67 с.
4. Горелик, Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г.С. Горелик. – Москва : Физматлит. 2008. – 656 с.
5. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – Том 1. – Москва : Мир, 1976. – 520 с.
6. Ольсон, Г. Динамические аналогии / Г. Ольсон. – Москва : Государственное издательство иностранной литературы, 1947. – 224 с.
7. Проскуряков, К. Н. Виброакустическая паспортизация АЭС – средство повышения их надежности и безопасности / К.Н. Проскуряков // Теплоэнергетика. – 2005. – № 12. – С. 30-34.
8. Храмов, Ю. А. Физики / Ю. А. Храмов. – Москва : Наука, 1983. – 248 с.
9. Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – Москва – Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 108 с.
10. Слепов, М. Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС: автореферат диссертации кандидата технических наук / М. Т. Слепов. – Обнинск, 1999. – 20 с.
11. Павелко, В. И. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В. И. Павелко, М. Т. Слепов, В. У. Хайретдинов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 44-52.
12. Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z., A new method to predict grid-to-rod in a PWR fuel assembly inlet region, Nuclear Engineering and Design, 2011, p. 2974-2982.
13. Bhattachary A., Yu S. D., Kawall G., Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle, Annals of Nuclear Energy, 2012, p. 87-105.
14. Delafontaine S., Ricciardi G., Fluctuating pressure calculation induced by axial flow through mixing grid, Nuclear Engineering and Design, 2012, p. 233-246.
15. Lui Z. G., Liu Y., Lu J., Numerical simulation of the fluid-structure interaction for two simple fuel assemblies, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 1-12.
16. Mohany A., Hassan M., Modeling of fuel bundle vibration and the associated wear in a CANDU fuel channel, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 214-222.

REFERENCES

- [1] Samarina A.A. Vibrations of Power Plant Pipelines and Methods of their Elimination. Moscow : Energia, 1979. 288 p. (in Russian).
- [2] Arkadev, G.V. Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibrating Diagnostics of WVER. Moscow : Energoatomizdat, 2004. 344 p. (in Russian).

- [3] Proskuryakov, K. N. Thermal-Hydraulic Excitation of Vibrations of the Coolant In-Vessel Devices, Nuclear Power Systems. Moscow : Moscow Power Engineering Institute, 1984. 67 p. (in Russian).
- [4] Gorelik G.S. Oscillations and Waves. Introduction to Acoustics, Radiophysics and Optics. Fizmatlit. 2008. 656 p. (in Russian).
- [5] Skuchic E. The Basics of Acoustics. Volume 1. Moscow : Mir. 1976-520 p. (in Russian).
- [6] Olson G. Dynamic Analogies. Moscow : State. Publishing House of Foreign Literature, 1947. 224 p. (in Russian).
- [7] Proskuryakov K.N. Vibroacoustic Certification of Nuclear Power Plants – a Means of Improving their Reliability and Safety. Heat Power Engineering. 2005. № 12. P. 30-34 (in Russian).
- [8] Khramov Yu.A. Physics. Moscow: Science, 1983. 248 p. (in Russian).
- [9] Zhukovsky N.E. Hydraulic Shock in Water Pipes. Moscow-Leningrad : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1949. 108 p. (in Russian).
- [10] Slepov M.T. Development of Methods and Interpretation of Data in Relation to Noise Diagnostics Systems of Novovoronezh NPP Reactor Plants: Thesis Abstract of PhD in Engineering. Obninsk, 1999. 20 p. (in Russian).
- [11] Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Experience of Carrying Out Complex Measurements with the Use of Different Systems at Different Stages of the Start-Up of the WWER -1200. News of Universities. Nuclear Power. 2016. № 4. P. 44-52. (in Russian).
- [12] Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z., A New Method to Predict Grid-to-Rod in a PWR Fuel Assembly Inlet Region, Nuclear Engineering and Design, 2011, p. 2974-2982.
- [13] Bhattachary A., Yu S. D., Kawall G., Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle, Annals of Nuclear Energy, 2012, p. 87-105.
- [14] Delafontain S., Ricciardi G., Fluctuating Pressure Calculation Induced by Axial Flow through Mixing Grid, Nuclear Engineering and Design, 2012, p. 233-246.
- [15] Lui Z. G., Liu Y., Lu J., Numerical Simulation of the Fluid-Structure Interaction for Two Simple Fuel Assemblies, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 1-12.
- [16] Mohany A., Hassan M., Modeling of Fuel Bundle Vibration and the Associated Wear in a CANDU Fuel Channel, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 214-222.

Development of Methods for Calculating the Frequency of Acoustic Standing Waves Generated by WWER Reactors

K.N. Proskuryakov¹, S.K. Belova², A.V. Anikeev³, E. Afshar⁴

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennaya st. 14, Moscow, Россия 111250

¹*ORCID iD: 0000-0002-1884-5576*

Wos Researcher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-4105-6110*

e-mail: twitti.gus@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-6463-2328X*

e-mail: Anikeev@mpei.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0002-1884-5576*

e-mail: afshari@mpei.ru

Abstract – A comparison of results of calculation of acoustic standing waves frequency with auto spectral power densities of the sensor signals of pressure fluctuations for complex combinations of acoustic elements of the 1st contour of nuclear power plants with WWER-440 is provided. The results of calculation of acoustic standing waves frequencies are found to be in satisfactory agreement with the measurement data. The new approach to calculate the acoustic characteristics of combination of number acoustical elements in the coolant system of the WWER-440 is worked out. The reactor with cold and hot pipelines as a complex Helmholtz resonator was studied for the first time. It is established that the frequencies of acoustic standing waves depend on the number of acoustic elements contained in the supply and discharge pipelines taken into account in the calculation.

Keywords: standing waves, AFM, acoustic mass, acoustic compliance, verification.