ВЕРИФИКАЦИЯ НА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ВВЭР

Авторы : К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, С.К. Белова, И. Афшар

ФГБОУ ВО НИУ “Московский Энергетический Институт”,Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение эффективности эксплуатации и сроков службы основного оборудования, а также работа энергоблоков в маневренных режимах входят в число приоритетных требований, предъявляемых к новому поколению атомных электрических станций (АЭС). Одной из актуальных и наукоемких задач, является совершенствование программ нейтронно-физического и теплофизического расчёта полномасштабных активных зон водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). В качестве примера учёта обратных связей можно привести широко использующиеся для нейтронно-физического расчёта полномасштабных активных зон ВВЭР программы БИПР-8 [1] и MOBY-DICK [2].

Однако, в этих и в других современных подходах не учтены обратные связи по плотности и температуре теплоносителя, вызванные: работой насосов, акустическими стоячими волнами (АСВ) и теплогидравлической неустойчивостью, приводящими к периодическому изменению замедляющих и поглощающих свойств теплоносителя. Известно, что амплитуды колебаний резко возрастают: при увеличении мощности реактора, при двухфазном состоянии теплоносителя и при возникновении вибро - акустических резонансов. В работе [3] показано, что условия возникновения ВАР определяются комплексом конструктивных характеристик и эксплуатационных режимов конкретной ядерной энергетической установки (ЯЭУ). В связи с необходимостью учета обратных связей в программах нейтронно-физического, теплофизического и акустического расчёта, актуальна задача создания акустической модели реактора.

Создание К.Н, Проскуряковым, акустической модели ядерного реактора, стало возможным благодаря использованию трех фундаментальных научных результатов, полученных с интервалом более 100 лет. Этими базовыми результатами являются: формула Томсона-Кельвина для расчета собственной частоты разряда конденсатора, предложенная им в 1853г., свойства акустического резонатора, сформулированные Гельмгольцем в 1869г., доказательство К.Н. Проскуряковым в 1984 г. правомерности использования метода электроакустических аналогий, для исследования пульсирующего потока однофазной и двухфазной среды при наличии отрицательного дифференциального сопротивления.

ОБОСНОВАНИЕ ПРАВОМЕРНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ, ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА ОДНОФАЗНОГО И ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Анализ акустических систем с однофазными текучими средами базируется на теории распространения упругих волн в жидкостях и газах. В основу анализа положены уравнения состояния жидкости, уравнения движения, уравнение неразрывности и уравнение, выражающее закон сохранения энергии. Разработаны и успешно используются методы электроакустических аналогий для исследования пульсирующего потока однофазных сред[4,5] .

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС явилось обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока однофазных и двухфазных сред, как с однозначной, так и с многозначной гидродинамическими характеристиками [6]. С учетом принятого допущения, что звуковое давление ΔP во всех точках по длине канала является только функцией времени, уравнения неразрывности и сохранения количества движения одномерного пульсирующего потока двухфазной среды получены в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} + C_a \frac{\partial \Delta \mathrm{p}}{\partial t} + G_a \Delta \mathrm{p} = 0 \\ \frac{\partial \Delta \mathrm{p}}{\partial x} + m \frac{\partial W}{\partial t} + R_a W = 0 \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь Δp — звуковое давление - это давление, дополнительно возникающее при прохождении звуковой волны в жидкости, в паре или в пароводяной среде. Звуковая волна, при распространении в текучей среде, образует сгущения и разрежения, которые создают
добавочные изменения давления по отношению к среднему статическому давлению *P*.
W – объемный расход среды в трубе; *L*-длина трубы; *S* - поперечное сечение трубы; $C_a = \frac{L.S}{k.\text{p}} \approx \frac{L.S}{\rho a^2}$, – акустическая податливость среды; R_a – активное акустическое сопротивление; $G_a = \frac{1}{k}\frac{W.L}{\text{p}}$, –волновая проводимость среды; $m = \frac{\rho L}{S}$ – акустическая масса; ρ – плотность двухфазной среды.

Эти уравнения известны в литературе под названием телеграфных уравнений [7]. Решение системы (1) линейных дифференциальных уравнений дает функциональные зависимости звукового давления и объемного расхода сжимаемой среды в трубопроводе с распределенными постоянными акустической податливостью среды, акустической массы, волновой проводимостью среды, активным сопротивлением потока среды, от переменных *x* (расстояние по оси трубопровода) и *t* (время).

Решение системы (2) линейных дифференциальных уравнений дает функциональные зависимости распространения электрического тока в линии с распределенными постоянными ёмкостью, индуктивностью, проводимостью и омическим сопротивлением.

$$\begin{cases} \frac{\partial i}{\partial x} + C\frac{\partial u}{\partial t} + Gu = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + L\frac{\partial i}{\partial t} + Ri = 0 \end{cases} \qquad (2)$$

Благодаря единству дифференциальных уравнений акустической (1) и электрической (2) систем, исследование распространения объемного расхода сжимаемой однофазной или двухфазной жидкости в акустической системе может быть заменено исследованием распространения электрического тока в кабеле [7].
Подобные аналогии справедливы и в отношении других, на первый взгляд, не имеющих ничего общего физических систем [3,8-12]. Формула для расчета собственной частоты разряда конденсатора Томсона-Кельвина [8] послужила основой для разработок: Гельмгольцем акустического резонатора [9]; динамических аналогий [10-12]; акустических моделей парогенерирующего канала, компенсатора давления и ядерного реактора [3].

Первый контур ВВЭР представляет собой разветвленную гидравлическую систему трубопроводов, содержащую элементы со сложной геометрией. Имеется целый ряд элементов, в которых могут возникать колебания потока теплоносителя, вызванные образованием вихрей и акустических волн, которые, наряду с циклическими нагрузками, приводят к вибрациям оборудования и уменьшению его срока службы. [13,14].

Гидравлические системы АЭС представляют собой цепь сочлененных между собой элементов различной сложности, которые в целом образуют звукопровод [6]. Наиболее простыми в таких системах являются трубные устройства. Поскольку они выполняются с различными элементами – расширениями, камерами, отводными каналами, дросселями, разветвлениями, арматурой и т.д., общая теория распространения звука в этих устройствах сложна [5,11,12]. Однако, если размеры неоднородности звукопровода меньше длины волны, их можно рассматривать как акустические элементы с сосредоточенными параметрами, а весь звукопровод, как состоящий из отрезков волноводов с сосредоточенными параметрами [5,11,12].

Подобно любому конструктивному элементу, обладающему 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 перового контура АЭС представляет собой систему колебательных контуров со своими акустическими массами $m_а$ и акустическими податливостями C_a. На Рис.1 представлена упрощенная электрическая система замещения акустических элементов первого контура двухконтурной АЭС [6]

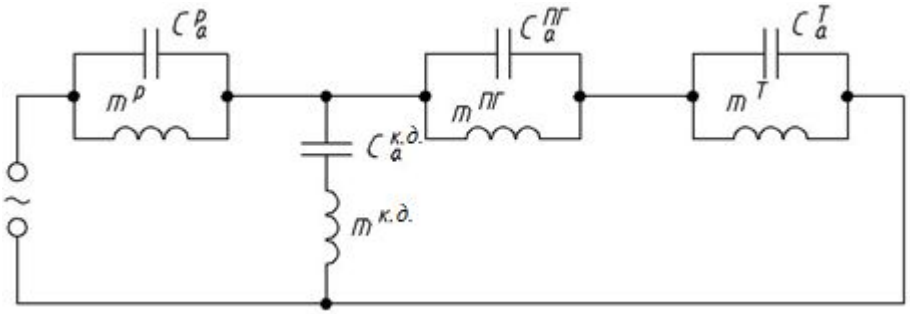

Рис.1 Упрощенная электрическая схема замещения акустических элементов первого контура АЭС с реактором ВВЭР. Индексы: *р* — реактор; *к.д.*–компенсатор давления; *Т*–трубопровод;
Эта эквивалентная схема замещения необходима для расчета собственных частот колебаний теплоносителя в одной петле первого контура АЭС с реактором типа ВВЭР.

Система акустических элементов обладает свойствами, которые не могут быть получены простой суперпозицией акустических свойств составляющих ее элементов. Таким новым свойством – усиления и гашения определенных частот колебаний в оборудовании первого контура, обладает комбинация ядерного реактора с присоединенными к нему трубопроводами, образующими горячую и холодную нитки, т.е. как сложный резонатор Гельмгольца, способный генерировать одновременно несколько 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.

ВЕРИФИКАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ВВЭР -440

Определение собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) проведено по формуле Томсона [8] согласно методу электроакустических аналогий [6]]. Акустическая масса m_{ac} присоединенных к реактору трубопроводов и акустическая податливость C_p объёма реактора, позволяют определить собственные частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) генерируемых этой акустической системой по формуле Томсона (1):

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

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):

В соответствие с акустической схемой реактора с трубопроводами шести холодных и горячих ниток, по приведенной в [6] методике, рассмотрены комбинации различного числа участков и длин подсоединенных трубопроводов.

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

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

где $a_{ср}$ скорость звука с учётом деформации труб и сжимаемости воды рассчитывается по формуле (4)[15]:

$$a_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{D}{E_m \cdot \delta} + \frac{1}{E_{\text{ж}}}\right)}},$$

или

$$a_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{ср}} \left(\frac{D_p}{E_m * \delta} + \frac{1}{\rho_{\text{ср}} * c_{\text{ср}}{}^2}\right)}}, \qquad (4)$$

где $D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$ – диаметр реактора; V_p – объём реактора, м^3; $\rho_{\text{ср}}$ – значение средней по объёму реактора плотности воды , кг/м^3; $c_{\text{ср}}$ – значение средней по объёму реактора скорости звука в воде , м/с; δ – толщина стенки реактора, м; E_m – объемный модуль упругости материала трубы; $E_{\text{ж}} = \rho_{\text{ср}} * c^2$ – объемный модуль упругости жидкости; $m_{\text{комб}_x}$– акустическая масса системы, образованной холодными (входными) и горячими (выходными) участками петель; C_p – акустическая податливость теплоносителя в объёме реактора при средних значениях давления и температуры в реакторе.

Частоты акустических стоячих волн, генерируемых системой, включающей реактор и подключенные к нему петли первого контура рассчитывались по формуле Гельмгольца в предположении, что акустическая податливость сосредоточена в объеме реактора, а акустическая масса сосредоточена в акустических элементах (участках) петель соединенных с реактором.

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

Таблица. Результаты расчета частот АСВ в номинальном режиме в участках акустической схемы.

Участок	Длины труб				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Параметры **номинального** режима: T = 280,5 °C, P = 12,278 МПа					
РРеактор +6вх+6вых	19,51	10,38	9,58	7,66	23,11
Реактор+6вх	13,90	8,25	8,25	6,56	13,90
Реактор+6вых	14,17	6,30	5,25	3,93	19,54

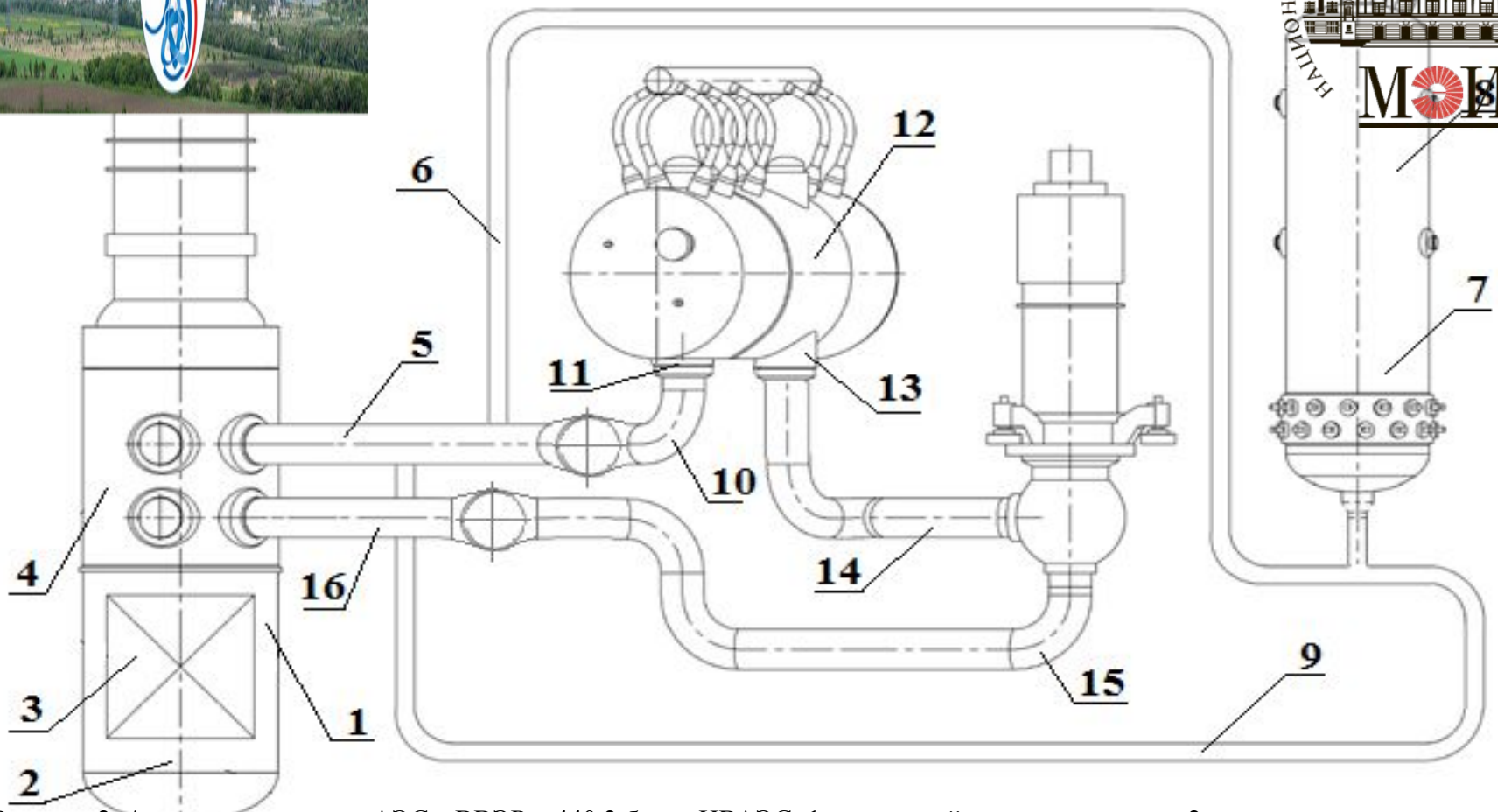

Рисунок 2. Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440 3 блока НВАЭС: 1 – опускной участок реактора; 2 - пространство под активной зоной; 3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной; 5 – участок ГЦК от реактора до ГЗЗ; 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления; 7 – компенсатор давления (вода); 8 – компенсатор давления (пар); 9 – дыхательный трубопровод от компенсатора давления до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки ГЦК от 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.

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.

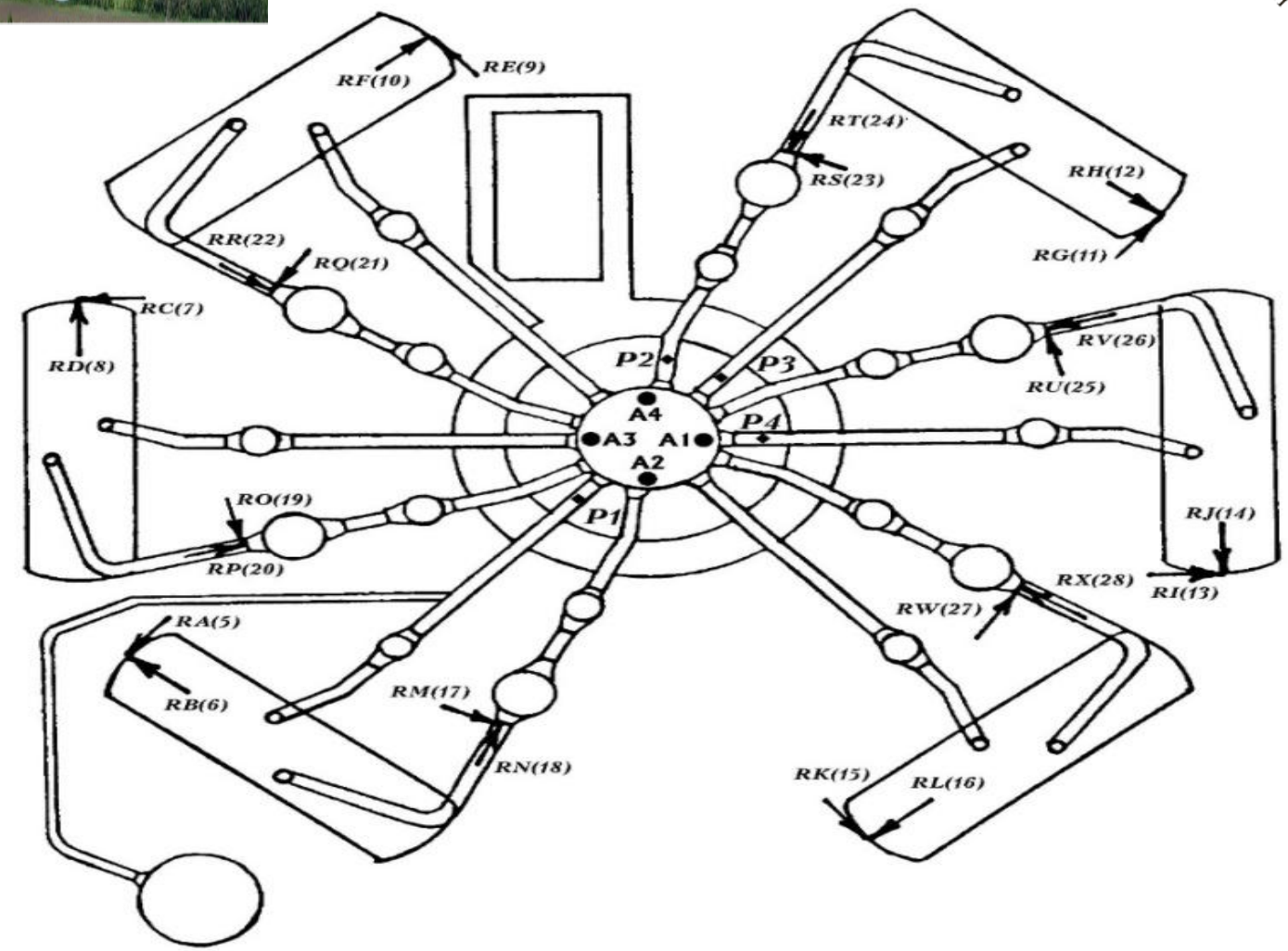

Рисунок 3 – Размещение датчиков системы SUS для ВВЭР-440

Система SUS в режимах нормальной эксплуатации 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 [16]: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах.

В работе [17] показано, что в спектральных характеристиках сигналов ДАП, ИК, ДПЗ доминируют пики вблизи частот трех, пяти и шести Герц.

Они присутствуют также во взаимных характеристиках всевозможных пар сигналов ДАП, ИК, ДПЗ, что свидетельствует:

о вибрационном характере их происхождения, поскольку они наблюдаются в сигналах ДАП

и о значительной мощности этих колебаний способных раскачивать, как корпус реактора (сигналы ДАП), так и шахту активной зоны (сигналы ИК) совместно с РК (сигналы ДПЗ).

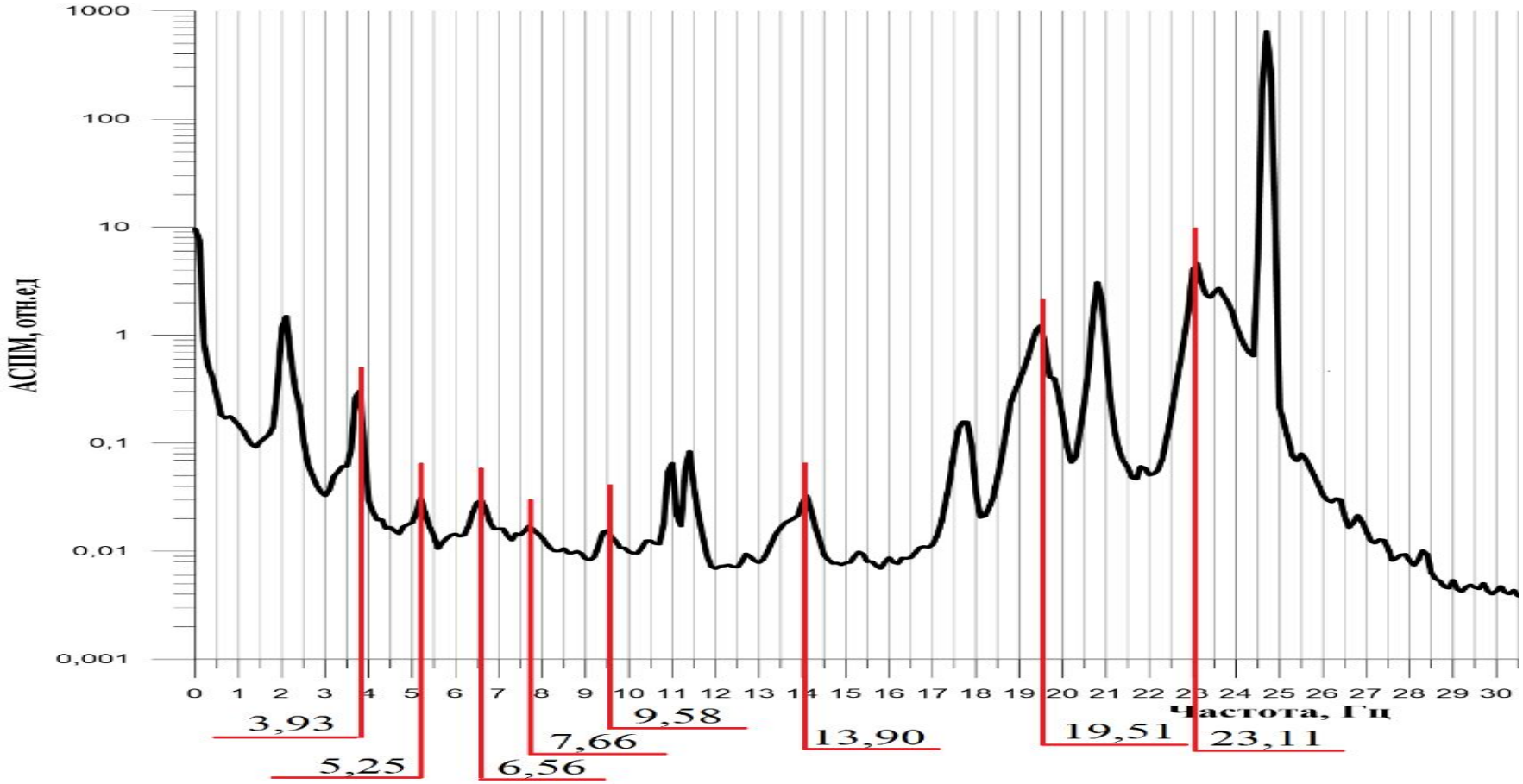

Рисунок 4– Автоспектральная плотность мощности АСПМ ВВЭР-440 режим номинальный

Из рисунка 4 видно, удовлетворительное для практического применения соответствие результатов расчета частот АСВ, генерируемых в оборудовании 1-го контура, автоспектральным плотностям мощности сигналов от датчиков пульсаций давления системы SUS.

В результате верификации акустической модели реактора получено удовлетворительное для практического применения соответствие результатов расчета частот АСВ, генерируемых в оборудовании 1-го контура в пусковых режимах, автоспектральным плотностям мощности сигналов от датчиков пульсаций давления системы SUS.

Доказано, что акустические свойства ядерного реактора, независимо от количества подключенных к нему циркуляционных петель теплоносителя, подобны свойствам группы одновременно функционирующих резонаторов Гельмгольца.

Необходимо отметить, что большинство из доминирующих пиков в публикациях, посвященных идентификации источников возбуждения АСВ, до настоящего времени не интерпретированы [17,18].

Результаты расчета частоты АСВ по принятой методике сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [18] для ВВЭР-440. Результаты сопоставления:

0,6Гц – соответствует АСВ компенсатора давления;

0,6-0,625Гц – 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;

6,0Гц – 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);

8,2Гц – изгибные колебания пучка ТВЭЛ;

10-12 Гц – маятниковые колебания корпуса реактора; 11,0-11,5 Гц – мультиплет (круговые колебания корпуса реактора и внутрикорпусных устройств);

11,9Гц – 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,;
2,4Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ, колебания изгибные;
23,125-23,375Гц – 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 [18] 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.

Известно, 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 имеет ясный физический смысл и механическую интерпретацию; не требует разработки сложного программного обеспечения и привлечения профессионалов в области информационных технологий;
- результаты расчетно-теоретического анализа АСВ генерируемых реактором и системой холодных и горячих участков петель первого контура АЭС с ВВЭР-440 верифицированы данными измерений на 3 энергоблоке Нововоронежской АЭС;
- верификация акустической модели реактора ВВЭР-440, проведена в условиях взаимодействия нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, приводящих к неравномерному распределению температуры теплоносителя в объеме реактора;
- выявлено удовлетворительное для практического применения соответствие результатов расчета частот АСВ, генерируемых в оборудовании 1-го контура, автоспектральным плотностям мощности сигналов от датчиков пульсаций давления системы SUS;
- доказано, что акустические свойства ядерного реактора, независимо от количества подключенных к нему циркуляционных петель теплоносителя, подобны свойствам группы одновременно функционирующих резонаторов Гельмгольца.
- Применение акустической модели реактора позволяет оптимизировать проектные и конструкторские решения путем создания оборудования способного подавлять нежелательные циклические нагрузки.

Благодарность

Авторы статьи выражают глубокую благодарность руководству НВАЭС: директору Поварову В.П., первому заместителю главного инженера А.И. Федорову, зам. директора В.А. Шварову и начальнику отдела диагностики М.Т. Слепову за организацию и проведение экспериментов, по специально разработанной расширенной программе, необходимых для верификации разработанных НИУ «МЭИ» акустических моделей реактора ВВЭР-440.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизоркин М.П. Расчетное моделирование нейтронно-физических и сопряженных физико-теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР: дис. канд. тех. наук: 05/05.14.03/Лизоркин Михаил Петрович. _М., 2007. –109 с.
2. Krysl V, MOBY-DICK User Guide, Report SCODA JS.Plzen. a.s. Ae 10068/Dok. Rev.3. 2005
3. Proskuryakov K.N. Scientific basis for modeling and calculation of acoustic vibrations in the nuclear power plant coolant Journal of Physics: Conference SeriesJ. Phys.: Conf. Ser. 891 012182
4. Чарный И. А., Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах, изд-во технико-теор. литературы, М., 1951г.
5. Лепендин Л.Ф. «Акустика» Учеб. Пособие для вузов./М.: Высшая школа, 1978 г.– 448 с.
6. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. – М.:МЭИ, 1984, 67 с.
7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1, «Энергия» Москва, 19708.
8. Льоцци М. История физики.- М.: Наука, 1970. – 464 с
9. Hermann von Helmholtz. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music / Alexander John Ellis. — Longmans, Green, 1885. — 576 с
10. Ольсон Г. «Динамические аналогии», М. Государственное издательство иностранной литературы, 1947г.
11. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику Физматлит. 2008.- 656 с.
12. Исакович М.А. Общая акустика. М.,1973

13. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения // М.: Энергия, 1979 – 288 с.
14. Шарый Н.В. Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. ИМАШ РАН. г. Подольск , 2008 г.
15. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Избранные сочинения, т. II, ОГИЗ, Гос. изд-во технико- теор. литературы, 1948 г.
16. Слепов, М.Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС / М.Т. Слепов // Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. к. т.н., Обнинск –1999.
17. Заключительный отчет. Энергоблок 2 Кольской АЭС. “Определение вибрационных характеристик ВКУ реактора в связи с задачей продления назначенного срока службы”, Д230.01.02.00.004 ТД, ЦНКиД “ДИАПРОМ”, 2002 год.
18. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР // М.: Энергоатомиздат, 2004 – 344 с.
19. Identification of standing pressure waves sources in primary loops of NPP with WWER and PWR / Proskuryakov K.N.,. Fedorov A.I, Zaporozhets M.V. and Volkov G.Y. / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal Vol.4 2016. ISSN 2412-5954 e-ISSN 2414-6935
20 Проскуряков К.Н., Аникеев А.В, Беляев К.И., Писарева Д.А. Разработка методики расчета частоты АСВ в эксплуатационных режимах АЭС с ВВЭР. Глобальная ядерная безопасность. №2(27), С.74–81.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!