

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СТОЯЧИХ ВОЛН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ВВЭР-1200

Г.В. Аркадов*, В.И. Павелко*; В.П. Поваров; М.Т. Слепов****

* АО «Научно-технический центр «Дианпром»

249031, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 6

** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная 1



Рассматриваются малоизученные проблемы акустических стоячих волн (АСВ) в главных циркуляционных контурах РУ ВВЭР. Долгое время указанному феномену не уделялось должного внимания как исследователей, так и специалистов АЭС. В общем случае для образования АСВ необходимы акустические неоднородности среды в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения продольной волны, в которых происходит скачок акустического сопротивления, что показано авторами на примере решения волнового уравнения. На основании экспериментального материала разработана классификация АСВ, описаны шесть типов АСВ и определены их основные параметры. Построены амплитудные распределения всех основных типов АСВ исходя из фазовых соотношений сигналов датчиков пульсаций давления и акселерометров, установленных на трубопроводах ГЦК. Эти распределения носят общий характер и справедливы для всех типов ВВЭР. Впервые обнаружена глобальность всех низших типов АСВ. Сформулированы четыре свойства-атрибута АСВ. Закономерные температурные зависимости АСВ представляют первый атрибут, который является источником диагностической информации при разогреве (расхолаживании) блока ВВЭР. Получены линейные экспериментальные зависимости частот АСВ от температуры ТН. Экспериментально найдены частоты, на которых происходит резонансное возбуждение ГЦК по причине совпадения частот АСВ и гармоник оборотной частоты главного циркуляционного агрегата (ГЦНА). Выполнена оценка энергии АСВ, которая своим происхождением обязана функционированию ГЦНА. Его работу можно представлять как непрерывное генерирование пульсаций давления, которые в виде бегущей волны падают на неоднородности акустического тракта и после отражения от них образуют стоячую волну.

Ключевые слова: акустическая стоячая волна, ВВЭР-1200, датчик пульсации давления, главный циркуляционный агрегат, автоспектральная плотность мощности, взаимная спектральная плотность мощности, активная зона, техническое диагностирование.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям по виброакустике в реакторостроении не уделяется должного внимания. Вибрация как один из множества факторов износа оборудования никакими

© Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов, 2021

проектами реакторных установок не считается основным фактором истощения ресурса и не имеет установленных главным конструктором РУ предельных уровней как по частотным, так и по амплитудным значениям. Акустика собственно циркуляционных контуров и вовсе не принимается во внимание при обосновании безопасности РУ в любом отечественном или зарубежном проекте [1]. В то же время известны неудачные конструкции РУ, в которых виброакустические эффекты приводили к отказам оборудования или к преждевременному истощению его ресурса [2]. Коварство вибраций состоит в том, что, когда их амплитуда достаточно мала, вкладом вибраций в истощение ресурса оборудования можно пренебречь, но они могут играть определяющую роль при резонансных вибрационных явлениях [3, 4]. Резонансное возбуждение вибраций считается недопустимым любым проектом РУ. Именно поэтому Россия не могла бы с таким успехом выйти на международный рынок, не предъявив в составе проекта АЭС различные системы технического диагностирования (СТД) реактора нового поколения. Сложные наукоемкие системы диагностики с большим затруднением и скепсисом продвигаются в эксплуатационную практику [5]. Новые блоки НВОАЭС-2 типа ВВЭР-1200 более, чем какие-либо другие с РУ типа ВВЭР, оснащены современными системами диагностики нового поколения, существенно расширившими возможности анализа различных аномальных процессов в реальном масштабе времени. В представленной статье освещены только некоторые наиболее весомые проблемы виброакустических эффектов, полученных экспериментально на ВВЭР-1200 с помощью различных СТД нового поколения.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В общем случае волновое уравнение (уравнение Даламбера) для некоторой функции двух переменных $U(x, t)$ имеет вид

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} + f(x, t). \quad (1)$$

Уравнение представлено в элементарном виде для одномерной пространственной координаты и функции времени $U(x, t)$. Для многомерного и, в частности, трёхмерного пространства (x, y, z) уравнение записывается с использованием оператора Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U(x, y, z, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \Delta U(x, y, z, t) + f(x, y, z, t), \quad (2)$$

где $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ – оператор Лапласа; $f(x, y, z, t)$ – внешнее вынуждающее воздействие; c – скорость распространения продольной волны в среде.

Однородное (без внешней вынуждающей силы) волновое уравнение может описывать акустические стоячие волны (АСВ), возникающие от некоторого начального стационарного воздействия $U_0(x)$. Решением является комплексная гармоническая функция времени $e^{j\omega t}$ с пространственно зависимой амплитудой $U_0(x)$:

$$U(x, t) = U_0(x) \cdot e^{j\omega t}. \quad (3)$$

При синусоидальном пространственном возмущении стоячая волна имеет свойства

- пространственной синусоиды для каждого фиксированного момента времени;
- временной синусоиды для каждой фиксированной точки в пространстве;
- одинаковых амплитуд и одинаковых частот двух бегущих волн, образующих стоячую волну.

Подробно фундаментальные свойства комплексного гармонического представления волны, связь уравнений Гельмгольца и Даламбера с обыкновенным дифференциальным уравнением Лагранжа изложены в [6, 7]. В самых простых случаях для образования АСВ необходимы акустические неоднородности среды в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения продольной волны, в которых происходит скачок акусти-

ческого сопротивления [8, 9]. Для выделения АСВ на фоне других физических эффектов в спектральных оценках разработаны четыре основных признака [6, 7].

1. В двух сигналах датчиков пульсаций давления (ДПД) колебания на частоте АСВ будут, как правило, либо синфазны (нулевая фаза), либо противофазны (фаза 180°). В редких случаях синфазность или противофазность АСВ в разных точках главного циркуляционного контура (ГЦК) может нарушаться. Это происходит в разветвленных контурах циркуляции теплоносителя (ТН) в результате интерференции волн, распространяющихся по разным путям и имеющих разные фазовые набеги в точках, где они, суммируясь, вновь образуют единую АСВ. Такое свойство АСВ целесообразно проиллюстрировать рисунками 1 – 5, где представлены развёртки одной циркуляционной петли РУ ВВЭР-1200 с установленными датчиками пульсации давления (ДПД), где ДПД_Г установлен на «горячей» нитке, ДПД_Х – на «холодной», а ДПД_U – на U-образном гйбе. Как видно из рисунков, для всех типов АСВ фазы будут иметь величину 0 или 180° .

2. В некоторой окрестности центральной частоты АСВ фазы взаимной спектральной плотности мощности сигналов двух ДПД остаются постоянными по частоте. Резонансы АСВ всегда «размыты» или низкодобротны (рис. 6: АСВ_{1п}; АСВ_{1к}; АСВ_{2п}; АСВ_{4п}) по сравнению с резонансами вибрационного происхождения (рис. 6: $f(\text{ГЦНА})$) – резонанс от оборотной частоты ГЦНА). Другие типы резонансов, вызванные, например, вынужденными колебаниями на гармониках оборотной частоты ГЦНА, всегда высокодобротны.

3. При монотонном изменении температуры ТН центральная частота АСВ изменяется также монотонно (рис. 6: АСВ_{1п}; АСВ_{1к}; АСВ_{2п}; АСВ_{4п}). Данный эффект связан с изменением скорости звука в ТН в зависимости от температуры. Как показано выше, в двух сигналах акселерометров, смонтированных непосредственно на трубопроводе петли, эти три признака также проявляют себя в полной мере.

4. Сопровождение низшего типа АСВ почти гармоническим рядом АСВ. Применение этого признака для идентификации АСВ на практике весьма затруднительно. Некоторые гармоники АСВ могут отсутствовать, а их амплитуда не обязательно спадает с частотой (рис. 6: АСВ_{1п}; АСВ_{2п}; АСВ_{4п}).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АСВ РУ ВВЭР-1200

Новая реакторная установка ВВЭР-1200, отличаясь от РУ ВВЭР-1000 массогабаритными характеристиками, имеет иные параметры собственных колебаний конструкции и теплоносителя. Опасность совпадения частот собственных и вынужденных колебаний или так называемого резонансного возбуждения грозит увеличением амплитуд колебаний, что уменьшает виброресурс РУ. Средняя температура ТН в активной зоне ВВЭР-1200 выше, чем у ВВЭР-1000, и так называемое «недогретое» кипение ТН, возможно, будет сильнее сдвигать частоты АСВ. Даже малое увеличение паровой доли ТН может значительно снизить частоту АСВ. По данному фактору следует ожидать уменьшения частот АСВ ВВЭР-1200 по сравнению с ВВЭР-1000. Оценить результирующий эффект изменения свойств АСВ ВВЭР-1200 по сравнению с АСВ ВВЭР-1000 от перечисленных выше факторов расчетным путем практически невозможно. Изменение параметров того или иного пика спектральной характеристики зависит от его происхождения. Если наблюдается резонанс собственных колебаний, то необходимо обнаруживать малые по абсолютной величине изменения собственной частоты. При собственных колебаниях амплитуду, частоту и добротность резонанса связывают с массой, жесткостью и демпфированием некоторого элемента конструкции. Собственная частота, изменяясь вслед за малым изменением жёсткости, может соответствовать значительным изменениям свойств опор конструкции. Уже малое изменение собственной частоты может сигнализировать о начале развития дефекта и, таким образом, является важным диагностическим признаком.

Если вибрационный резонанс вызван внешней вынуждающей силой, то изменение его параметров может соответствовать изменению свойств как конструкции, так и внешней силы. Здесь пределы допустимых изменений амплитуды, частоты и добротности резонанса много больше, чем в случае собственных колебаний. Природа возникновения и специфика АСВ как главного источника возмущения колебаний внутрикорпусных устройств, корпуса РУ и ГЦК изучалась достаточно длительное время [1 – 4], однако систематизировать информацию, разработать классификацию и выделить главные характеристики применительно к РУ ВВЭР-1200 удалось относительно недавно [6, 7]. Информацию о резонансах АСВ, главным образом, извлекают из сигналов ДПД.

Специалистами НВАЭС разработана методология проведения измерений с использованием переносного анализатора в качестве универсального интегрирующего устройства для объединения в единый измерительный кластер различных измерительных систем. В качестве анализатора использовался 40-канальный прибор LMS SCADAS Mobile – универсальный мобильный анализатор для измерения и анализа сигналов динамических процессов, совместимый практически с любым типом датчиков: акселерометрами, мостовыми датчиками, микрофонами, датчиками оборотов и термопарами. Он может работать с ПК или ноутбуком через Ethernet-интерфейс, через беспроводной интерфейс или как автономный регистратор. Управление анализатором выполняется с помощью ПО LMS Test.Xpress, имеющего функции программирования усилителей, калибровки каналов, настройки параметров измерений, управления процессом измерений и анализа данных. Более подробная информация по проведению измерений дана в [10, 11].

Благодаря большому объёму экспериментальных работ, выполненных на различных стадиях ввода в промышленную эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200 [10] и регулярных многоканальных синхронизированных измерениях в течение плановой эксплуатации, удалось описать основные АСВ с характерными признаками.

АСВ_{1п} – первая петлевая АСВ – самая низкочастотная локальная простая АСВ, покрывающая всю петлю. АСВ_{1п} имеет один узел на стенке шахты в «горячем» патрубке корпуса РУ и второй узел на стенке шахты в «холодном» патрубке корпуса РУ, а пучность находится примерно посередине петли на U-образном трубопроводе (см. рис. 1). Одним торцом эквивалентного трубопровода является шахта внутрикорпусная, видимая со стороны «холодного» трубопровода. После отражения от шахты волна пробегает в обратном направлении до другого эквивалентного торца, в качестве которого вновь выступает та же шахта, но видимая со стороны «горячего» трубопровода. Нулевые фазы между сигналами любых датчиков петли свидетельствуют о неизменности знака амплитуды АСВ_{1п}, т.е. о наличии в петле единственной полуволны АСВ_{1п}.

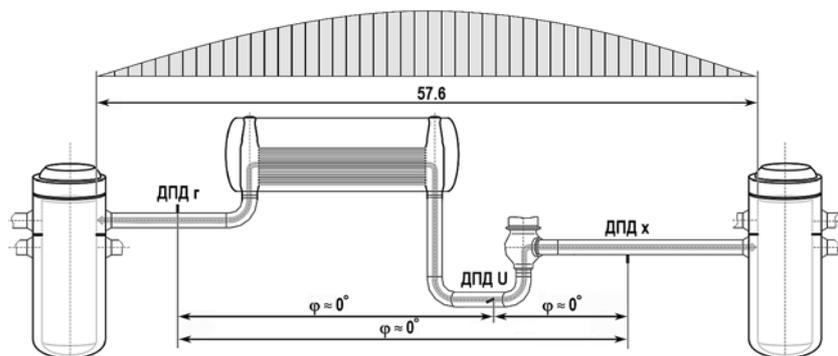


Рис. 1. Первая петлевая АСВ (АСВ_{1п})

Следующая по возрастанию частоты после АСВ_{1п} стоячая волна имеет нулевые фазы в любой паре сигналов четырех ДПД в четырех «горячих» трубопроводах (см. рис. 2).

Эта волна глобальная и покрывает своей полуволной корпус реактора. Обозначим её как АСВ_{1к} и в дальнейшем будем называть первой корпусной АСВ.

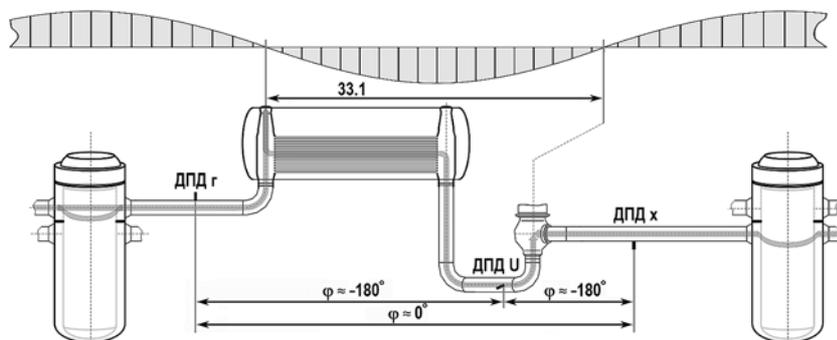


Рис. 2. Первая корпусная АСВ (АСВ_{1к})

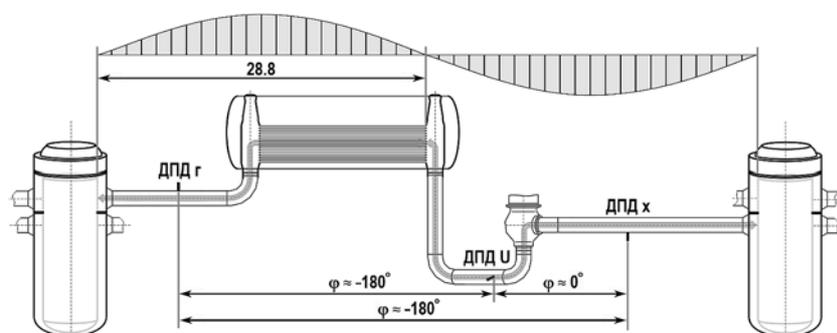


Рис. 3. Вторая петлевая АСВ (АСВ_{2п})

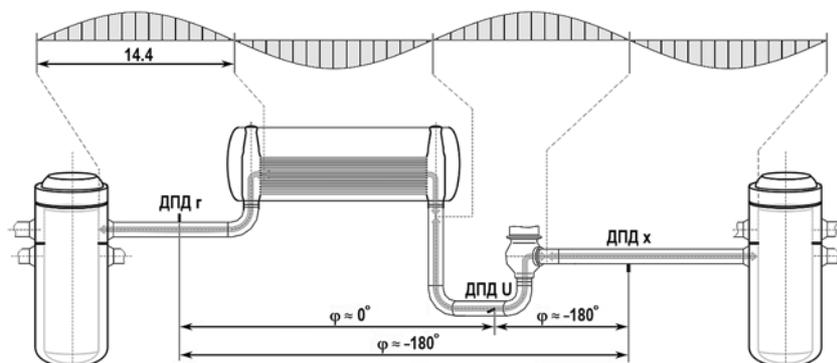


Рис. 4. Четвёртая петлевая АСВ (АСВ_{4п})

По известному распределению амплитуд АСВ_{1п} несложно перейти к распределению амплитуд её гармоник (см. рис. 3). Обозначим через АСВ_{2п} вторую гармонику петлевой АСВ_{1п} или, проще говоря, вторую петлевую АСВ. Её узел пришелся в точности на «холодный» коллектор ПГ, усиливая тем самым его вибронгруженность. Вторая гармоника мала по амплитуде по сравнению с амплитудой первой петлевой АСВ, поэтому ожидать каких-либо вибрационных аномалий на этой частоте не приходится. Третья гармоника АСВ_{1п} не наблюдается в эксперименте, и это предсказывалось простой моделью чередования неоднородностей, когда их число равно степени двойки.

Несложно построить и четвёртую гармонику АСВ_{1п}. Обозначим её через АСВ_{4п} и назовём четвертой петлевой АСВ (см. рис. 4). Её узел находится вблизи «горячего» кол-

лктора ПГ, а амплитуда четвертой гармоники соизмерима с амплитудой АСВ_{1п}. Важной особенностью АСВ_{4п}, требующей контроля, является близкое расположение к ней второй оборотной частоты ГЦНА (33,2 Гц). Изменение скорости звука при разогреве или расхолаживании блока приводит к совпадению данных частот.

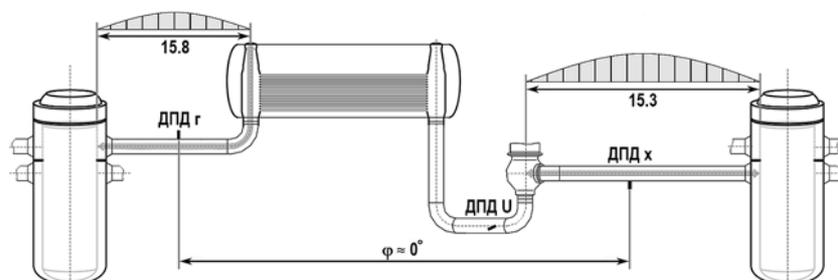


Рис. 5. «Горячая» АСВ (АСВ_{1Г}) и «холодная» АСВ (АСВ_{1Х})

Очевидны и простые локальные АСВ, покрывающие своей полуволной «горячий» и «холодный» трубопроводы ГЦК (см. рис. 5). АСВ_{1Г} – простая «горячая» АСВ, которая имеет один узел на стенке шахты в «горячем патрубке» корпуса РУ, а второй – на крышке ПГ «горячего» коллектора.

Данные об АСВ применительно к РУ ВВЭР-1000 сведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства АСВ РУ ВВЭР-1200

№ п/п	Наименование АСВ	Обозначение	Частота АСВ, Гц при $t_{\text{ТН}} = 40^{\circ}\text{C}$	Частота АСВ, Гц при $t_{\text{ТН}} = 290^{\circ}\text{C}$	Длина полуволны АСВ, м
1	Первая петлевая АСВ	АСВ _{1п}	11.59	7.09	57.6
2	Первая корпусная АСВ	АСВ _{1к}	15.86	9.96	33.1
3	Вторая петлевая АСВ	АСВ _{2п}	21.46	13.53	28.8
4	Четвёртая петлевая АСВ	АСВ _{4п}	26.10	40.93	14.4
5	«Горячая» АСВ «Холодная» АСВ	АСВ _{1Г} АСВ _{1Х}	– –	– –	15.8 15.3

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРИ СОВПАДЕНИИ ГАРМОНИК ОБОРОТНОЙ ЧАСТОТЫ ГЦНА С ЧАСТОТАМИ АСВ

При изменении температуры теплоносителя (при разогреве или расхолаживании блока) изменяется и центральная частота АСВ. Монотонное повышение температуры теплоносителя вызывает монотонное движение центральной частоты АСВ по направлению к 0 Гц. В качестве примера на рис. 6 представлены спектры пульсаций давления в горячей нитке первой петли ВВЭР-1200 при температурах от 121 до 286°C.

В движении приходят частоты всех стоячих волн, и, что важно, каждая центральная частота АСВ имеет свою скорость [Гц/град] перемещения по оси частот. В процессе разогрева ТН на величину ~ 300°C происходит совпадение некоторой гармоники оборотной частоты главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) с центральной частотой некоторой АСВ (или ее гармоники). В номинальном режиме функционирования при 100%-ом уровне мощности реактора такого совпадения допускать нельзя, но в динамических режимах совпадение неизбежно [10, 11]. По оценке авторов, при полном разогреве энергоблока весь ГЦК последовательно проходит через восемь режимов резонансного возбуждения (рис. 7), когда происходит совпадение центральных частот

АСВ с оборотной частотой ГЦНА ($f_{обр} = 16.6$ Гц) или её гармониками ($n \times f_{обр}$).

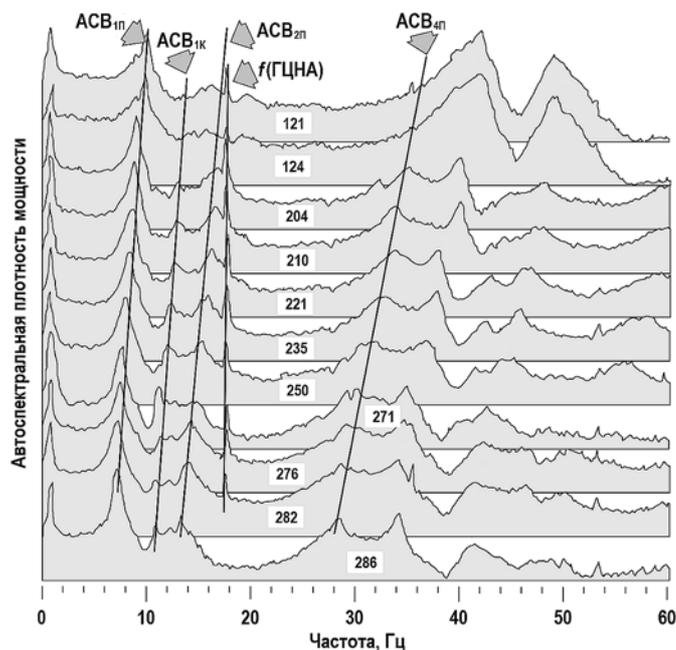


Рис. 6. Спектры пульсаций давления в горячей нитке первой петли ВВЭР-1200 для температурного диапазона от 122 до 286°C. При температуре 276°C – совпадение АСВ со второй гармоникой оборотной частоты ГЦНА. При низких температурах – совпадения по низшим и высшим АСВ

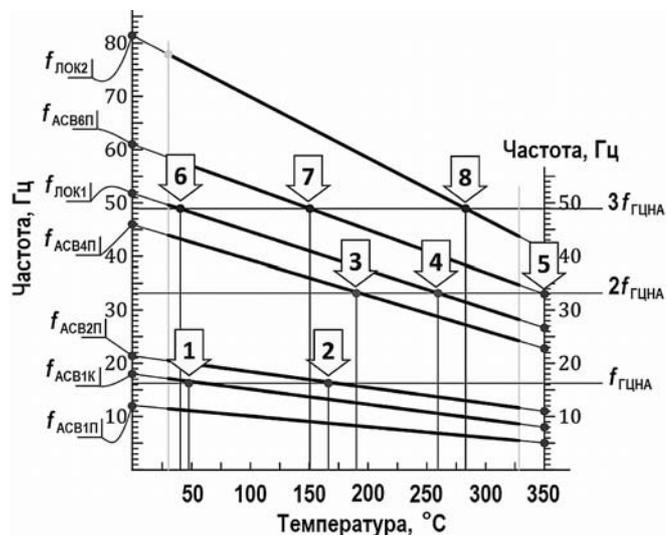


Рис. 7. Зависимость центральных частот АСВ от температуры теплоносителя первого контура (цифры от 1 до 8 – номера режимов)

В ходе исследований экспериментально доказано резонансное возбуждение при достижении температуры ТН ~ 170°C (режим 2; АСВ_{2п}) и ~ 190°C (режим 3; АСВ_{4п}). Указанные режимы резонансного возбуждения не учтены главным конструктором при оценке ресурсных характеристик и не описаны в эксплуатационной документации как критические режимы, требующие минимального времени их прохождения. В этой связи повышается роль вибрационных измерений в процессе пуско-наладочных работ при вводе в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР. Практически ценным является подход, в

соответствии с которым вибросостояние новой РУ ВВЭР-1200 подобно вибросостоянию ВВЭР-1000 в том смысле, что перечисленные выше частоты изменятся незначительно [12]. Данный тезис базируется на том, что и массогабаритные характеристики конструкции, и теплогидравлические характеристики ТН следующих поколений ВВЭР изменятся незначительно по сравнению с ВВЭР-1000 на основании принципа конструкционного консерватизма. Тем не менее, не исключается эффект тройного совпадения частот вынужденных, собственных колебаний и гармоник ГЦН при том, что такой эффект отсутствует в РУ ВВЭР-1000 в номинальных режимах эксплуатации [12, 13].

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ГЦНА НА ГЕНЕРИРОВАНИЕ АСВ

Энергия, заключенная в стоячей волне, обязана своим происхождением функционированию ГЦНА [14]. Его работу можно представлять как непрерывное генерирование пульсаций давления, которые в виде бегущей волны падают на неоднородности акустического тракта и после отражения от них образуют стоячую волну. Пульсации давления ТН образуются в результате вращения вала ГЦНА независимо от того, подвержен ли ГЦНА вибрациям или нет [14, 15]. Вибрации ГЦНА создают дополнительный источник пульсаций давления ТН. Взаимная характеристика, например, такая, как коэффициент регрессии между рассматриваемыми параметрами – амплитудой и дисперсией (или СКЗ) в разных поддиапазонах частот одной автоспектральной плотности мощности, получаемый по длительным виброизмерениям одного и того же сигнала ДПД, и будет диагностическим признаком [16, 17].

Проведем оценку энергии, затрачиваемой ГЦНА на создание и поддержание АСВ в ГЦК.

Удельная энергия АСВ в единице объема

$$E(x, t) = I(x, t)/c, \text{ Дж/м}^3, \quad (4)$$

где $I(x, t)$ – плотность потока мощности АСВ, $\text{Н}/(\text{м}\cdot\text{с})$; c – скорость звука.

Решая волновые уравнения для давления $P(x, t)$ и скорости $V(x, t)$ продольной волны

$$\partial^2 P(x, t)/\partial x^2 = c^{-2} \cdot \partial^2 P(x, t)/\partial t^2, \quad (5)$$

$$\partial^2 V(x, t)/\partial x^2 = c^{-2} \cdot \partial^2 V(x, t)/\partial t^2, \quad (6)$$

получим комплексные выражения

$$P(x, t) = A \cdot e^{-j(kx - \omega t)}, \quad V(x, t) = A \cdot e^{-j(kx - \omega t)} / (\rho \cdot c), \quad (7)$$

где A – амплитуда волны давления; ρ – плотность теплоносителя.

Тогда модуль плотности потока мощности АСВ

$$|I(x, t)| = |\langle \text{Re}P \cdot \text{Re}V \rangle| = A^2 / (2 \cdot \rho \cdot c^2), \quad (8)$$

где $\langle \rangle$ – усреднение за период; Re – действительная часть.

Мощность АСВ для всего ГЦК оценивается выражением

$$N(x, t) = V_k \cdot |E(x, t)| \cdot \omega_{\text{АСВ}}, \quad (9)$$

где V_k – объем ГЦК; $\omega_{\text{АСВ}}$ – частота АСВ.

Мощность АСВ в пересчете на одну циркуляционную петлю

$$\begin{aligned} N_1(x, t) &= 0.25 V_k \cdot |E(x, t)| \cdot 2\pi \cdot f_{\text{АСВ}} = 0.25 (M_{\text{ТН}}/\rho) \cdot 0.5 A^2 / (\rho \cdot c^2) \cdot 2\pi \cdot f_{\text{АСВ}} = \\ &= 0.25 \pi \cdot f_{\text{АСВ}} \cdot M_{\text{ТН}} \cdot [A / (\rho \cdot c)]^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где $M_{\text{ТН}}$ – масса ТН в ГЦК.

Величину пульсаций давления A определим широким диапазоном от $1 \cdot 10^5$ до

$1 \cdot 10^6$ Па согласно [8], тогда $N_1(x, t)$ 0 [0.036, 0.36] МВт.

Заметим, что ГЦНА [10, 11] представляет собой асинхронную машину переменного тока, которая как и всякая насосная установка имеет определённый КПД, равный 0.7 на рабочих режимах. Поэтому потребление электроэнергии на создание и поддержание АСВ в ГЦК необходимо проводить с учётом КПД, что даёт новую интервальную оценку потерь мощности на один ГЦНА [0.048, 0.48] МВт, что составляет от ~ 0.2 до ~ 2.0 МВт на весь блок.

Приведённый расчёт – грубооценочный, но он даёт представление о том, что существующая конфигурация ГЦК и поле различных АСВ могут приводить к потере до 9% мощности ГЦНА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение виброакустики в реакторной инженерии идёт крайне медленно, возможно, из-за ведомственных барьеров, сложности математического аппарата, наукоёмкости систем диагностирования, отсутствия нормативных требований, регламентирующих акустические и вибрационные эффекты в ГЦК и их непрерывный контроль [17]. Оборудование РУ обладает спецификой, требующей индивидуального подхода. Значительные массогабаритные характеристики вибрирующих элементов конструкции, уникальная гидродинамика проточных частей и огромные величины вынуждающих вибрации сил выделяют вибрационный фактор в обоснование надёжности и ресурса оборудования РУ в специальную проблему, требующую отдельного и строго регламентированного подхода [10].

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. / Под ред. А.А. Абагяна. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
3. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. и др. Создание программно-технических комплексов диагностирования оборудования сооружаемых энергоблоков АЭС. / Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 19-23 ноября 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 72-75.
4. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. и др. Состояние и перспективы применения систем оперативной диагностики для поддержания безопасности энергоблоков с ВВЭР. / Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 19-23 ноября 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 29-31.
5. Аркадов Г.В., Матвеев В.П., Павелко В.И., Финкель Б.М. Программно-технический комплекс системы виброшумовой диагностики РУ ВВЭР // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2002. – Вып. 3. – С. 37-45.
6. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. – М.: Наука, 2018. – 469 стр., ISBN 978-5-02-040138-9.
7. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant. – Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/12220>.
8. Katona T.J. Possibility of use of noise analysis for identification of reactor conditions during accidents. // World Journal of Nuclear Science and Technology. – 2013. – Vol. 3. – No 3. – PP. 96-105. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2013.33017>.
9. Demaziere C. Multi-Physics Modelling of Nuclear Reactors: Current Practices in a Nutshell. // Int. J. Nucl. Energy Science and Technology. – 2013. – Vol. 7(4). – PP. 288-318. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2013.054368>.
10. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергобло-

ка ВВЭР-1200. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №.4. – С. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>.

11. Федоров А.И., Слепов М.Т. Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 77-87. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07>.

12. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика ВВЭР-1200. // Материалы XI Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 21-24 мая 2019 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2019. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf> (дата доступа 15.08.21).

13. IEC 61502:1999 Nuclear plants. Pressurized Water Reactors. Vibration monitoring of internal structures. 1999. Электронный ресурс: https://webstore.ansi.org/preview-pages/IEC/preview_iec61502%7Bed1.0%7Db.pdf (дата доступа 15.08.21).

14. Rohde U., Kliem S., Grundmann U. et al. The Reactor Dynamics Code DYN3D – Models, Validation and Applications. // Progr. Nucl. Energy. – 2016. – Vol. 89. – P. 170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.013>.

15. Kozmenkov Y., Kliem S., Rohde U. Validation and Verification of the Coupled Neutron Kinetic/Thermalhydraulic System Code DYN3D/ATHLET. // Ann. Nucl. Energy. – 2015. – Vol. 84. – PP. 153-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.12.012>.

16. Demaziere C., Pázsit I. Development of a Method for Measuring the Moderator Temperature Coefficient by Noise Analysis and its Experimental Verification in Ringhals-2. // Nuclear Science and Engineering. – 2004. – Vol. 148. – PP. 1-29. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE04-A2437>.

17. Andersson T., Demaziere C., Nagy A. et al. Development and Application of Core Diagnostics and Monitoring for the Ringhals PWRs. // Progr. Nucl. Energy. – 2003. – Vol. 43. – No. 1. – PP. 35-41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(03\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(03)00006-4).

Поступила в редакцию 22.08.2021 г.

Авторы

Аркадов Геннадий Викторович, заместитель директора, к.т.н., к.э.н.,
E-mail: skrepka1964@gmail.com

Павелко Владимир Ильич, заместитель директора, к.т.н.
E-mail: vippvi@mail.ru

Поваров Владимир Петрович, зам. Генерального директора – директор НВАЭС, д.т.н.
E-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Слепов Михаил Тимофеевич, начальник отдела, к.т.н.
E-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039.4

PHENOMENOLOGY OF ACOUSTIC STANDING WAVES APPLIED TO THE VVER-1200 REACTOR PLANT

Arkadov G.V. *, Pavelko V.I. *, Povarov V.P. **, Slepov M.T. **

* Scientific and Technical Center Diaprom JSC
6 Koroleva Str., 6249031 Obninsk, Kaluga reg., Russia

** Branch of Concern Rosenergoatom JSC Novovoronezh NPP
1 Industrial zone Yuzhnaya, 1396072 Novovoronezh, Voronezh reg., Russia

ABSTRACT

Underexplored issues of acoustic standing waves (ASW) in the main circulation

circuits of the VVER reactor plants are considered. It is a long time that no proper attention has been given to this phenomenon both on the part of the research community and NPP experts. In the general case, generation of ASWs requires that the medium is acoustically heterogeneous in the planes perpendicular to the direction of the longitudinal wave propagation in which an acoustic impedance jump occurs, this having been shown by the authors based on an example of the wave equation solution (D'Alembert equation) for a certain function of two variables. An ASW classification has been developed based on the obtained experimental material, 6 ASW types have been described, and their key parameters have been defined. Amplitude distributions have been plotted for all major ASW types proceeding from the phase relations of signals from the pressure pulsation detectors and accelerometers installed on the MCC pipelines. These distributions are of a general nature and are valid for all VVER types. It is for the first time that the globality of all lowest ASW types have been identified. Four properties of ASWs have been formulated as their attributes. The first attribute is regular ASW temperature dependences, this being the source of diagnostic information in the process of the VVER unit heat-up/cooldown. Linear experimental dependences of the ASW frequencies on the coolant temperature have been obtained. Frequencies have been found experimentally which lead to the MCC resonant excitation due to the coalescence of the ASW frequencies with the RCP rotational frequency harmonics. The ASW energy, which owes its origin to the RCP operation, has been estimated. The RCP operation can be presented as continuous generation of pressure pulsations which fall onto the acoustic path heterogeneities in the form of a traveling wave and generate a standing wave after being reflected from these.

Key words: acoustic standing wave, VVER-1200, pressure pulsation detector, reactor coolant pump, main circulation circuit, autospectral power density, cross-spectral power density, core, technical diagnostics.

REFERENCES

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. *Vibration Noise Diagnostics of VVER*. Edited by A.A. Abagyan. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2004, 344 p. (in Russian)/
2. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. *VVER Diagnostic Systems*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2010. 391 p. (in Russian).
3. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. et al. Creation of Software and Technical Complexes for Diagnosing Equipment of NPP Power Units Under Construction. *Proc. of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of NPP with VVER»*. November 19-23, 2001. Podolsk. OKB Gidropress Publ., pp. 72-75 (in Russian).
4. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. et al. The State and Prospects of Using Operational Diagnostic Systems to Maintain the Safety of Power Units with VVER. *Proc. of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of NPP with VVER»*. November 19-23, 2001. Podolsk. OKB Gidropress Publ., pp. 29-31 (in Russian).
5. Arkadov G.V., Matveev V.P., Pavelko V.I., Finkel B.M. Software and hardware complex of the system of vibration-noise diagnostics of the RU VVER. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2002, iss. 3. pp. 37-45 (in Russian).
6. Arkadov G.V. Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibroacoustics in the Annexes to the Installation of Reactor VVER-1200*. Moscow. Nauka Publ., 2018, 469 p., ISBN 978-5-02-040138-9 (in Russian).
7. Arkadov G.V. Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant*. Singapore. World Scientific, 2021, 586 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/12220>.
8. Katona T.J. Possibility of use of noise analysis for identification of reactor conditions during accidents. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2013, v. 3, no. 3, pp. 96-105. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2013.33017>.
9. Demaziere C. Multi-Physics Modelling of Nuclear Reactors: Current Practices in a

Nutshell. *Int. J. Nucl. Energy Science and Technology*. 2013, v. 7(4), pp. 288-318; DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2013.054368>.

10. Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. The Experience of Complex Measurements with the Use of Heterogeneous Systems at Various Stages of the Start-Up of the VVER-1200 Power Unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 4, pp.44-54; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05> (in Russian).

11. Fedorov A.I., Slepov M.T. Complex Measurements of Diagnostic Parameters of Equipment at Unit 1 of NWPP-2 During Pilot Operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 3, pp. 77-87; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07> (in Russian).

12. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics of VVER-1200. *Proc. of the XI International Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with VVER»*. May 21-24, 2019. Podolsk. OKB Gidropress Publ. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf> (accessed Aug. 15, 2021) (in Russian).

13. IEC 61502:1999 Nuclear plants. Pressurized Water Reactors. Vibration monitoring of internal structures. 1999. Available at: https://webstore.ansi.org/preview-pages/IEC/preview_iec61502%7Bed1.0%7Db.pdf (accessed Aug. 15, 2021).

14. Rohde U., Kliem S., Grundmann U. et al. The Reactor Dynamics Code DYN3D – Models, Validation and Applications. *Progr. Nucl. Energy*. 2016, v. 89, p. 170; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.013>.

15. Kozmenkov Y., Kliem S., Rohde U. Validation and Verification of the Coupled Neutron Kinetic/Thermalhydraulic System Code DYN3D/ATHLET. *Ann. Nucl. Energy*. 2015, v. 84, PP. 153-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.12.012>.

16. Demaziere C., Pázsit I. Development of a Method for Measuring the Moderator Temperature Coefficient by Noise Analysis and its Experimental Verification in Ringhals-2. *Nuclear Science and Engineering*. 2004, v. 148, pp. 1-29; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE04-A2437>.

17. Andersson T., Demaziere C., Nagy A. et al. Development and Application of Core Diagnostics and Monitoring for the Ringhals PWRs. *Progr. Nucl. Energy*. 2003, v. 43, no. 1, pp. 35-41; DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(03\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(03)00006-4).

Authors

Arkadov Gennady Viktorovich, Deputy Director, Cand. Sci. (Engineering), Cand. Sci. (Economics)

E-mail: skrepka1964@gmail.com

Pavelko Vladimir Ilyich, Deputy Director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: vippvi@mail.ru

Povarov Vladimir Petrovich, Deputy Director General / Director of the Novovoronezh NPP, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Slepov Mikhail Timofeyevich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: SlepovMT@nvnpp1.rosenergoatom.ru