

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

EDN SAGHCF

Оригинальная статья / Original paper



Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР

Г.В. Аркадов¹ , М.Т. Слепов²

¹ Некоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз»,
г. Москва, Российская Федерация

² Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская область,
Российская Федерация

slepovmt@nvnppl.rosenergoatom.ru

Аннотация. Многие исследовательские коллективы и группы уделяли значительное внимание вопросам шумового анализа и контроля параметров работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Это нашло отражение в научной среде в виде многочисленных публикаций, монографий, статей и обзоров, посвященных изучению шумовых составляющих различных вариативных сигналов реакторных установок (РУ). Однако, несмотря на передовые теоретические работы по этой теме, прикладные исследования, то есть прямые реакторные эксперименты, остались в стороне от интересов как отечественных, так и зарубежных ученых. Необходимость практических исследований обусловлена сложностью интерпретации разнообразных аномалий, выявляемых с помощью шумовых методов, а также необходимостью точной настройки различных моделей. Кроме того, спектральные образы оборудования могут значительно различаться не только между разными проектами РУ, но и внутри однотипных блоков на одной АЭС. Эти проблемы невозможно решить только с помощью теоретических или расчетных методов, а также с использованием имитационного моделирования. Ситуация усложняется тем, что проведение шумовых исследований представляет собой сложную задачу как по выбору источников шумовых данных, так и по интерпретации полученной информации. Вероятно, именно эти причины объясняют значительное снижение интереса к экспериментальным работам по шумовой тематике на различных РУ как в мировой практике, так и в России. В представленной статье в краткой форме рассмотрены некоторые возможности методов нейтронно-шумового контроля активных зон, направленных на повышение надежности и безопасности ЯЭУ. Кроме того, в статье обсуждаются пути снижения трудоемкости их использования для максимально раннего выявления аномального состояния различного оборудования.

Ключевые слова: нейтронный шум, датчик прямого заряда, акустическая стоячая волна, внутриреакторный контроль, спектральная плотность мощности, когерентность.

Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР. Глобальная ядерная безопасность. 2024;14(4):55–70. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

For citation: Arkadov G. V., Slepov M. T. Neutron noise control techniques for VVER core. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

Neutron noise control techniques for VVER core

Gennady V. Arkadov¹ , Mikhail T. Slepov²

¹ Non-profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation

² Novovoronezh Nuclear Plant the branch of JSC Russian Concern for Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

slepovmt@nvnppl.rosenergoatom.ru

Abstract. Many research staffs and groups have paid considerable attention to the issues of noise analysis and control of nuclear power plant operation parameters. This is reflected in the scientific environment in the form of numerous publications, monographs, articles, and reviews devoted to the study of noise components of various variation signals of

reactor plants. However, despite the advanced theoretical works on this topic, applied research, i.e. direct reactor experiments, remains aside from the interests of both local and foreign scientists. The need of practical research is due to the complexity of interpretation of a variety of anomalies detected by noise methods, as well as the need to fine-tune various models. In addition, the spectral images of equipment can differ significantly not only between different designs of reactor plants, but also within the same-type units at one NPP. These problems cannot be solved by theoretical or computational methods alone, or by using simulation modeling. The situation is complicated by the fact that noise studies are a complex task both in terms of selecting noise data sources and interpreting the obtained information. Probably, these reasons explain the significant decrease of interest to experimental works on noise subject at various reactor plants both in the world practice and in Russia. The paper briefly discusses some possibilities of methods of neutron-noise control of cores aimed at improving the reliability and safety of NPPs. In addition, the article considers ways to reduce the labor intensity of their use for the earliest possible detection of anomalous condition of various equipment.

Keywords: neutron noise, direct charge sensor, acoustic standing wave, in-reactor control, spectral power density, coherence.

Введение

В российской атомной энергетике активно применяются внутриреакторные измерения и используются расчетные коды для восстановления пространственно-зависимого поля энерговыделения в активной зоне. Это является основной задачей системы внутриреакторного контроля (СВРК). В реакторе ВВЭР-1200 из 163 тепловыделяющих сборок (ТВС), образующих активную зону, 54 оснащены сборкой внутриреакторных детекторов. В эту сборку входят семь датчиков прямого заряда, равномерно распределенных по высоте. Каждый датчик генерирует сигнал, пропорциональный нейтронному потоку, что в общей сложности составляет 378 отдельных каналов для измерения внутриреакторного нейтронного потока.

Токовый сигнал датчиков прямого заряда возникает в результате реакции взаимодействия нейтронов с нейтроночувствительным элементом детектора. В зависимости от типа ядерной реакции, процесс токообразования могут определять различные частицы: электроны, протоны, α -частицы и осколки деления. В настоящее время наибольшее практическое применение нашли датчики прямого заряда, в которых носителями тока являются электроны. Нейтронные датчики прямого заряда можно разделить на две категории: активационные и комптоновские.

Активационные датчики в основном используют β -частицы, образующиеся в нейтроночувствительном элементе (родий) при распаде β -активных нуклидов, которые возникают в результате взаимодействия с нейтронами. В комптоновских датчиках,

напротив, применяются комптоновские и фотоэлектроны, которые образуются при взаимодействии с материалом эмиттера, испускающим γ -кванты в результате ядерной реакции [1].

Система внутриреакторного контроля использует постоянную составляющую токов активационных датчиков прямого заряда. Значения обновляются раз в секунду, что в большинстве случаев достаточно для контроля нейтронно-физических и теплогидравлических параметров активной зоны, а также для управления полем энерговыделения в переходных режимах [2]. Однако в токовых сигналах датчиков прямого заряда присутствует флуктуирующая (шумовая) составляющая, обусловленная комптоновским эффектом поглощения γ -квантов материалом эмиттера. Ее вклад в общую силу тока составляет примерно 1% [1] от общего уровня сигнала.

Несмотря на кажущуюся незначительность шумовой составляющей, анализ флуктуаций открывает новые возможности для контроля фактического состояния реакторной установки с ВВЭР. Это, в свою очередь, улучшает наблюдаемость активной зоны во время эксплуатации и повышает ядерную и радиационную безопасность энергоблока в целом.

Краткие сведения о цифровой обработке сигналов

Периодические сигналы можно разложить в ряд Фурье, который представляет собой сумму гармонических функций или комплексных экспонент с частотами, распо-

ложенными в арифметической прогрессии. Однако, существуют ограничения на такое разложение [3]. Для практических целей обычно выделяется временной интервал, для которого строится ряд Фурье, а в остальное время сигнал считается равным нулю. Сергиенко А.Б. [3] приводит синусно-косинусную форму разложения исходного сигнала в ряд Фурье, формула (1):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \times \cos(k\omega_1 t) + b_k \times \sin(k\omega_1 t)). \quad (1)$$

В приведенном выражении $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота, соответствующая периоду повторения сигнала, равному T , связанная с частотой f формулой $\omega = 2\pi f$. Коэффициенты a_k и b_k рассчитываются по формулам (2):

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(k\omega_1 t) dt; \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(k\omega_1 t) dt.$$

Используя формулу (3) Эйлера [4,5]:

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x, \quad (3)$$

получим суммы комплексных экспонент с положительными и отрицательными показателями, формула (4):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k}{2} (e^{jk\omega_1 t + j\varphi_k} + e^{-jk\omega_1 t - j\varphi_k}). \quad (4)$$

Пропуская ряд математических преобразований (подробный вывод см. в источниках [3,4]), можно перейти к комплексной форме ряда Фурье, формула (5):

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{-jk\omega_1 t}; \quad (5)$$

где коэффициенты C_k вычисляются по формуле (6):

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \times e^{-jk\omega_1 t} dt. \quad (6)$$

Все вышесказанное справедливо, прежде всего, для сигналов, которые повторяются через равные промежутки времени. Однако в реальности такие сигналы не являются периодическими.

Поэтому необходимо сделать несколько допущений, как это описано в источниках

[3,4], чтобы перейти от формулы (6) к формуле прямого преобразования Фурье (7):

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \times e^{-j\omega t} dt. \quad (7)$$

В результате использования формулы (7) вместо нумерованных коэффициентов ряда Фурье C_k , рассчитывается новая величина $S(\omega)$ – спектральная функция сигнала $s(t)$, называемая спектральной плотностью. Таким образом, преобразование Фурье является инструментом спектрального анализа непериодических сигналов.

В дискретном представлении формула (7) принимает вид выражения (8), согласно Р.Б. Рандаллу [5]:

$$S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \times e^{-j\frac{\omega n k}{N}}. \quad (8)$$

В исследовании Сергиенко А.Б. [3] было доказано, что спектральная плотность не предоставляет никакой информации о флуктуациях – то есть о случайной составляющей случайного процесса. Это означает, что фазы спектральных компонентов в различных реализациях процесса являются случайными и независимыми друг от друга.

Таким образом, более целесообразным вариантом является использование спектральной плотности мощности, так как она не зависит от соотношения фаз спектральных составляющих, формула (9):

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S_T(\omega)|^2}{T}. \quad (9)$$

Взаимный спектр $S_{AB}(\omega)$, двух различных процессов $S_A(\omega)$ и $S_B(\omega)$ определяется выражением (10):

$$S_{AB}(\omega) = S_A^*(\omega) \times S_B(\omega), \quad (10)$$

где $S_A^*(\omega)$ – комплексно-сопряженный спектр относительно $S_A(\omega)$.

Взаимный спектр позволяет рассчитать две фундаментальные величины, связывающие два процесса. Во-первых, функцию когерентности, характеризующую степень линейной зависимости между сигналами в частотной области, формула (11):

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{AB}(\omega)|^2}{S_{AA}(\omega) \times S_{BB}(\omega)}. \quad (11)$$

Функция когерентности является безразмерной величиной и может принимать значения от 0 до 1. Если $\gamma(\omega_i) = 1$, то два процесса на частоте ω_i связаны линейно, в случае

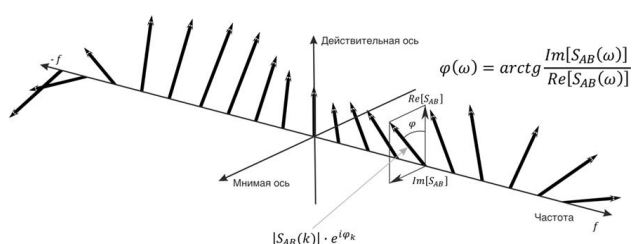
$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}[S_{AB}(\omega)]}{\text{Re}[S_{AB}(\omega)]}, \quad (12)$$


Рисунок 1. Расчет разности фаз колебаний на основе взаимного спектра в комплексной форме
Figure 1. Calculation of oscillation phase difference based on mutual spectrum in complex form

В условиях вибрационных нагрузок состояние оборудования нельзя оценивать, основываясь только на критериях циклической прочности и виброизноса. Даже если эти критерии выполняются, аномальное состояние может наступить при частичном или полном нарушении прочности и целостности оборудования.

значений уровней вибрации внутрикорпусных устройств и корпуса реактора является экспериментальный – проведение большого количества измерений вибрации в различных режимах эксплуатации реактора.

Этот подход успешно применяется в атомной энергетике Германии, где вибрационные нормы были установлены на уровне национальных стандартов еще в 90-е гг. XX века. К сожалению, в России нормативная база значительно отстает от этого уровня.

Глобальный нейтронно-шумовой эксперимент

В конструкции активной зоны реактора ВВЭР-1200 были произведены значительные изменения. Высота топливной колонны стала больше, а диаметр топливной композиции – шире. В то же время диаметр центрального отверстия был уменьшен, что привело к увеличению общей массы топлива. Кроме того, был изменен регламент управления системой управления и защиты (СУЗ). Количество управляющих групп возросло, а глубина погружения отдельных органов управления уменьшилась. ТВС также претерпели изменения. Была добавлена антивибрационная нижняя решетка и перемешивающие элементы в верхней части. В активной зоне реактора ВВЭР-1200 более высокое давление в первом контуре и увеличенный расход теплоносителя по сравнению с реактором ВВЭР-1000.

Учитывая все эти факторы, необходимо провести исследование активной зоны реактора ВВЭР-1200 в условиях эксплуатации, опираясь на опыт нейтронно-шумовой диагностики реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Для энергоблоков ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 уже накоплена экспериментальная база по нейтронно-шумовым измерениям как в России, так и за рубежом. Однако энергоблок ВВЭР-1200 представляет собой новый объект для исследования. Следует отметить, что в проекте ВВЭР-1200 есть ТВС, в которых органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) и каналы нейтронных измерений (КНИ) ДПЗ совмещены в одной сборке. Это позволяет непосредственно из-

мерять токи ДПЗ в зависимости от положения ОР СУЗ [2,6].

Для получения необходимой информации был проведен уникальный эксперимент с регистрацией нейтронных шумов по всевозможным комбинациям коммутации ДПЗ. Для получения спектральных оценок нейтронного потока в активной зоне была использована мобильная измерительная система модульного типа, которая позволяла непрерывно записывать сигналы в течение 1800 секунд с частотой дискретизации 1024 Гц без подключения к компьютеру. Это обеспечивало полностью автономный цикл работы.

Штатная организация эксперимента предусматривала подключение мобильной системы к проектным каналам системы контроля вибрации (СКВ). При этом сама система не отключалась и использовалась в рабочем режиме. В одной многоканальной экспериментальной записи содержится 14 токовых сигналов от двух разных сборок КНИ, три сигнала от внешних ионизационных камер и до 12 сигналов от акселерометров. Технические средства и методика проведения измерений подробно описаны в работах Павелко В.И. и др. [7] и Федорова А.И. и др. [8].

Существуют определенные ограничения на коммутацию сборок КНИ. Например, для сохранения контроля за состоянием активной зоны с помощью КНИ проектант разделил 54 сборки на две группы по 27 штук. Каждая группа имеет свои кабельные трассы, аппаратуру обработки и помещения. Это позволяет сохранить половину сборок КНИ для наблюдения за активной зоной в случае различных аварий на атомной электростанции. Для подключения сборок КНИ можно использовать только выделенные группы, где один КНИ должен быть из первой группы, а другой – из второй. При этом можно менять порядок сборок внутри группы.

На рисунке 2 схематично показаны варианты коммутации сборок для одной сборки с координатами 12-27. Всего существует 27 вариантов коммутации. Группы КНИ показаны разными цветами для наглядности.

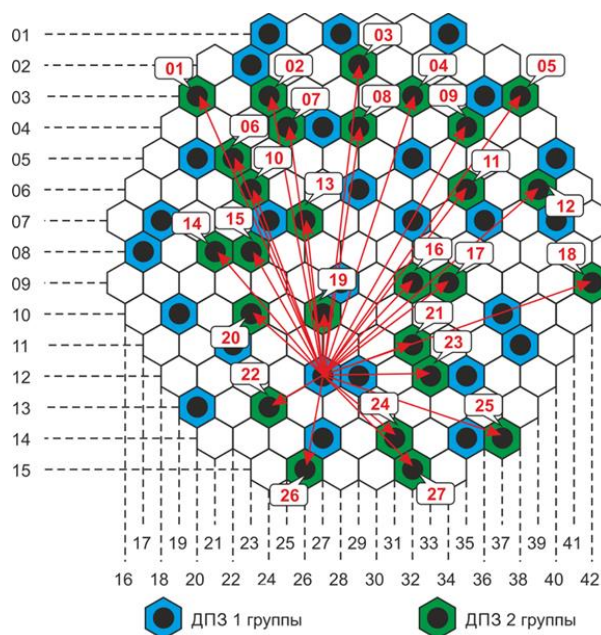


Рисунок 2. Полный перебор пар ДПЗ для ТВС 12-27
Figure 2. Complete overshoot of direct charge sensor pairs for fuel assemblies 12-27

Если менять первый КНИ из первой группы на следующий и перебирать вторую группу КНИ в той же последовательности, что и в предыдущем случае, то можно получить еще 27 многоканальных записей сигналов ДПЗ. Таким образом, можно получить $27 \times 27 = 729$ многоканальных записей. Каждая запись длится 30 минут, что дает общее время регистрации 364,5 часа. Процедура перекоммутации сборок КНИ представляет собой программный диалог между СКВ и системой внутриреакторной шумовой диагностики (ВРШД), что занимает сопоставимое время.

Таким образом, удалось получить уникальные многоканальные измерения флуктуаций нейтронного поля с полным перебором детекторов ионизационных камер. Нейтронно-шумовой эксперимент с перебором 729 пар КНИ претендует на обеспечение полноты наблюдаемости активной зоны.

Локализация кипения теплоносителя по высоте ТВС

Семь сигналов, полученные от одного КНИ, позволяют составить 21 комбинацию функций когерентности между ДПЗ данного КНИ. Это дает нам возможность исследовать все возможные пары сигналов, расположенные на разных уровнях ТВС.

В идеальном цилиндрическом реакторе, где теплофизические свойства теплоносителя остаются неизменными, функции когерентности, рассчитанные для одинаковых расстояний между двумя детекторами нейтронного потока (ДПЗ), должны быть идентичными.

Однако в реальных условиях, когда плотность теплоносителя уменьшается с увеличением аксиальной координаты и изменяется его агрегатное состояние, функции когерентности внутри одного семейства могут отличаться. Это можно наблюдать на примере ТВС с координатами 10-19, как показано на рисунке 3.

Все функции когерентности обладают общими свойствами:

- резонанс первой корпусной акустической стоячей волны ($АСВ_{1К}$) вблизи частоты 8,75 Гц (подробнее об условиях возникновения и свойствах различных АСВ можно прочитать в источниках [9,10]);
- минимум в диапазоне частот от 1,2 до 1,6 Гц;
- минимум в диапазоне частот от 7,48 до 7,52 Гц.

Акустическая стоячая волна $АСВ_{1К}$ с частотой 8,75 Гц представляет собой глобальный барометрический эффект, который чувствителен к среднему значению паросодержания в активной зоне и наблюдается во всех спектральных оценках сигналов ДПЗ, что делает ее глобальным явлением. Так, например, резонанс $АСВ_{1К}$ можно увидеть во всех оценках функции когерентности (рис. 3), которые были получены из одной многоканальной записи сигналов с семи датчиков положения в одном канале исследования.

Несмотря на свою глобальность, резонанс $АСВ_{1К}$ имеет некоторую закономерную изменчивость. Разные пары ДПЗ дают разные параметры резонанса $АСВ_{1К}$ (амплитуду, центральную частоту и добротность), хотя паровая фаза в среднем за время регистрации процессов оставалась неизменной. Амплитуда резонанса колеблется в широком диапазоне значений от 0,23 до 0,81, а частота, наоборот, в очень узком диапазоне от 8,72 Гц до 8,75 Гц.

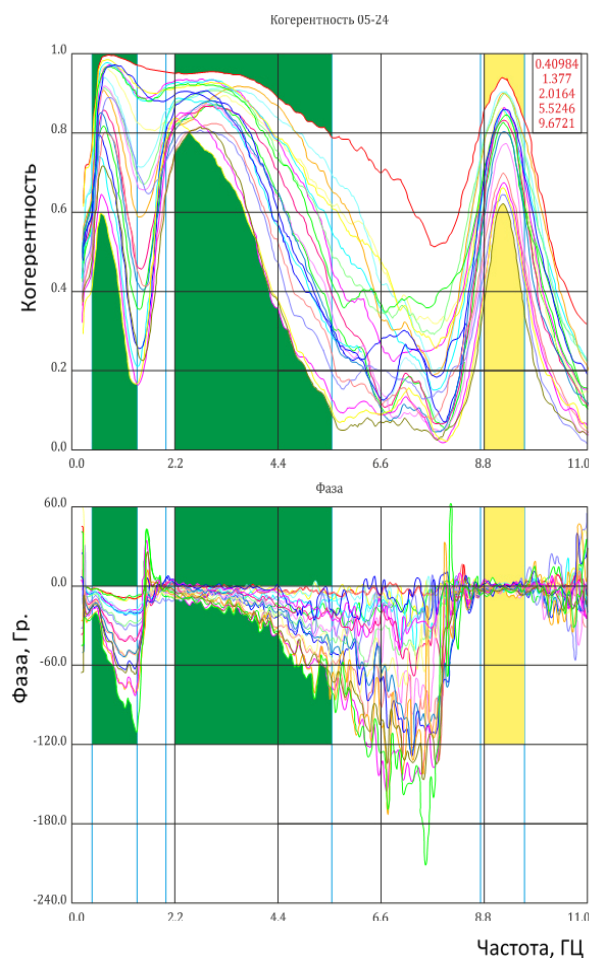


Рисунок 3. Семейства функций когерентности (верхний график) и фаз (нижний график) всевозможных пар сигналов ДПЗ одного КНИ для ТВС с координатами 05-24

Figure 3. Families of coherence functions (upper graph) and phases (lower graph) of all possible pairs of signals of direct charge sensors of one neutron measurement channel for fuel assemblies with coordinates 05-24

Параметры резонанса $АСВ_{1К}$ связаны с некоторой усредненной величиной паровой фракцией теплоносителя (ТН) из-за пространственной глобальности $АСВ_{1К}$. При увеличении объемной доли пара частота, амплитуда и добротность резонанса должны уменьшаться. В этом случае одна и та же паровая фракция ТН «рассматривается» различными парами датчиков под разными углами. Высокая амплитуда резонанса $АСВ_{1К}$ наблюдается для двух ДПЗ, расположенных в однофазном ТН. Например, для сигналов соседних ДПЗ (ДПЗ1-ДПЗ2, ДПЗ2-ДПЗ3, ДПЗ3-ДПЗ4) когерентность на частоте $АСВ_{1К}$ оказывается высокой. Для удаленных ДПЗ1-ДПЗ7 амплитуда меньше. Она также

низкая для когерентностей, в которых участвует сигнал срединного ДПЗ4.

АСВ_{1К} представляет собой мощный осциллятор давления, который воздействует на весь объем теплоносителя (ТН) в активной зоне с частотой 8,75 Гц. Периодическое изменение давления, вызванное воздействием акустической стоячей волны (АСВ_{1К}), приводит к периодическому изменению объема пара в активной зоне. Это, в свою очередь, вызывает периодическое колебание нейтронного потока на указанной частоте вблизи датчика прямого заряда ДПЗ4. Важно отметить, что сигналы двух датчиков давления, расположенных в разных средах, коррелируют только по одноименной составляющей фракции ТН. Например, на уровне ДПЗ7 присутствует как паровая, так и водяная фракции. Поэтому корреляция сигналов ДПЗ1-ДПЗ7 происходит только по водяной фазе, что значительно снижает амплитуду резонанса АСВ_{1К}. Поэтому, чем меньше амплитуда резонанса функции когерентности сигналов ДПЗ1-ДПЗ7, тем больше доля паровой фазы по сравнению с долей водяной фазы. По этим критериям можно определить некоторые эмпирические диагностические признаки на качественном уровне.

Однако для более точной оценки стадии кипения и локализации по высоте лучше рассматривать функцию когерентности соседних по высоте ТВС датчиков прямого заряда. На рисунке 4 показаны функции когерентности для пар ДПЗ одной сборки с координатами 08-17. На уровнях ДПЗ 1, 2 и 3 функции когерентности пар ДПЗ1-ДПЗ2 и ДПЗ2-ДПЗ3 имеют ярко выраженную sink-структуру¹ в диапазоне от 4,5 Гц до 7,5 Гц, что следует интерпретировать как глобальное зашумление и ярко выраженный пик АСВ_{1К} (8,75 Гц). На уровне ДПЗ2 происходит максимальное выделение энергии для всех ТВС. Поэтому, по крайней мере, начальные стадии пузырькового кипения

уже присутствуют в этом уровне. Однако однофазный теплоноситель на уровне ДПЗ1 с начальными стадиями недогретого² кипения на уровнях ДПЗ2 и ДПЗ3 обеспечивает высокие корреляции по жидкому компоненту (когерентность примерно 0,6 как для sink-структуры, так и для АСВ_{1К}).

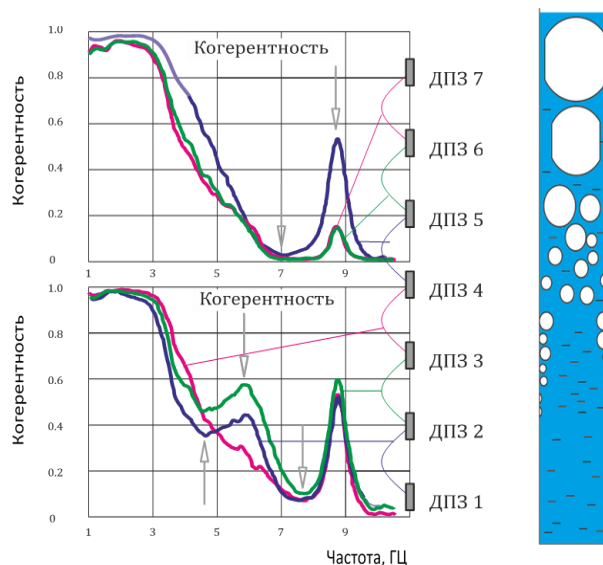


Рисунок 4. Упрощенное изображение двухфазного ТН в одной ТВС 08-17 и расположение двух ДПЗ, сигналы которых обладают высокой и низкой когерентностью

Figure 4. Simplified image of a two-phase coolant in a single fuel assembly 08-17 and the location of two direct charge sensors whose signals have high and low coherence

Начиная с пар ДПЗ3 и ДПЗ4 и далее (ДПЗ4 – ДПЗ5, ДПЗ5 – ДПЗ6, ДПЗ6 – ДПЗ7), можно заметить исчезновение так называемой sink-структуры и монотонное снижение когерентности вплоть до частоты 7,5 Гц. Это свидетельствует о том, что корреляции выше среднего уровня (уровня ДПЗ4) связаны с паровой фракцией теплоносителя. Особенно наглядно снижение амплитуды резонанса на частоте АСВ_{1К} в парах ДПЗ5 – ДПЗ6 и ДПЗ6 – ДПЗ7. Это позволяет сделать вывод о стадии кипения, сопровождающейся образова-

¹ Последовательность периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, функции когерентности, возникающую из-за тригонометрических сомножителей или слагаемых типа $\sin(\omega\tau_0)$, $\cos(\omega\tau_0)$, $\sin\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\cos\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\sin\frac{(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$, $\cos\frac{(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$ и т.д., подробнее в источниках [6,9,11].

² Под термином «недогретое кипение» авторы подразумевают тип кипения, который имеет место, когда жидкость с температурой ниже температуры насыщения приходит в контакт с поверхностью нагревателя достаточно горячей, чтобы вызвать кипение. При этом, попав в область холодной жидкости, паровые пузырьки конденсируются, и не происходит результирующего отвода (накопления) паровой фазы в объем жидкости или ядро потока.

нием пузырьков и увеличением паровой фракции. Резонанс на частоте АСВ_{1К}, как было описано выше, обусловлен барометрическим эффектом реактивности, то есть колебаниями нейтронного потока, вызванными изменениями давления в жидкой фазе теплоносителя. Поэтому с уменьшением доли жидкой фазы и увеличением паровой замедляющая способность теплоносителя снижается, что, в свою очередь, влияет на амплитуду пика на частоте АСВ_{1К}.

Таким образом, анализируя изменения двух характеристик – sink-структуры в диапазоне от 4,5 Гц до 7,5 Гц и значения максимума на частоте АСВ_{1К} – в функциях когерентности между ДПЗ одной ТВС, можно с определенной степенью достоверности судить не только о стадии кипения теплоносителя, но и о локализации этих стадий по высоте ТВС.

Оценка надежности фиксации ТВС в АЗ

Спектральная оценка каждого ДПЗ уникальна и неповторима, так как теплофизическое состояние теплоносителя в АЗ всегда различается как по радиусу, так и высоте. Однако, несмотря на разнообразие сигналов, можно выделить общие характеристики, которые свойственны большинству ДПЗ на одном горизонте.

Серия измерений, проведенных для горизонта ДПЗ1 разных ТВС показала, что на частоте 6,14 Гц в спектральных плотностях мощности (СПМ) наблюдается резонанс (рис. 5). Исключение составляют ДПЗ1, которые имеют собственное зашумление в этом диапазоне частот. Резонанс отличается высокой добротностью, и его частота точно повторяется от одной СПМ ДПЗ1 к другой. В некоторых СПМ ДПЗ1 также наблюдается вторая гармоника с частотой 12,28 Гц и даже субгармоника 5/2 – 15,40 Гц.

В горизонтальной плоскости на уровне ДПЗ1 наблюдается глобальное явление на частоте 6,14 Гц. В вертикальной плоскости оно не распространяется за пределы горизонта защитного ДПЗ2, т.к. лишь в редких случаях это явление может быть зафиксировано на уровне ДПЗ2 в небольшом количестве ТВС. Анализируемый эффект можно уверенно отнести к вибрационному по не-

скольким характерным признакам: высокая добротность резонанса, наличие гармоник и субгармоник, пространственное распределение, зависящее от расхода теплоносителя (по диаметру АЗ), и групповые фазовые соотношения, указывающие на коллективные маятниковые колебания ТВС.

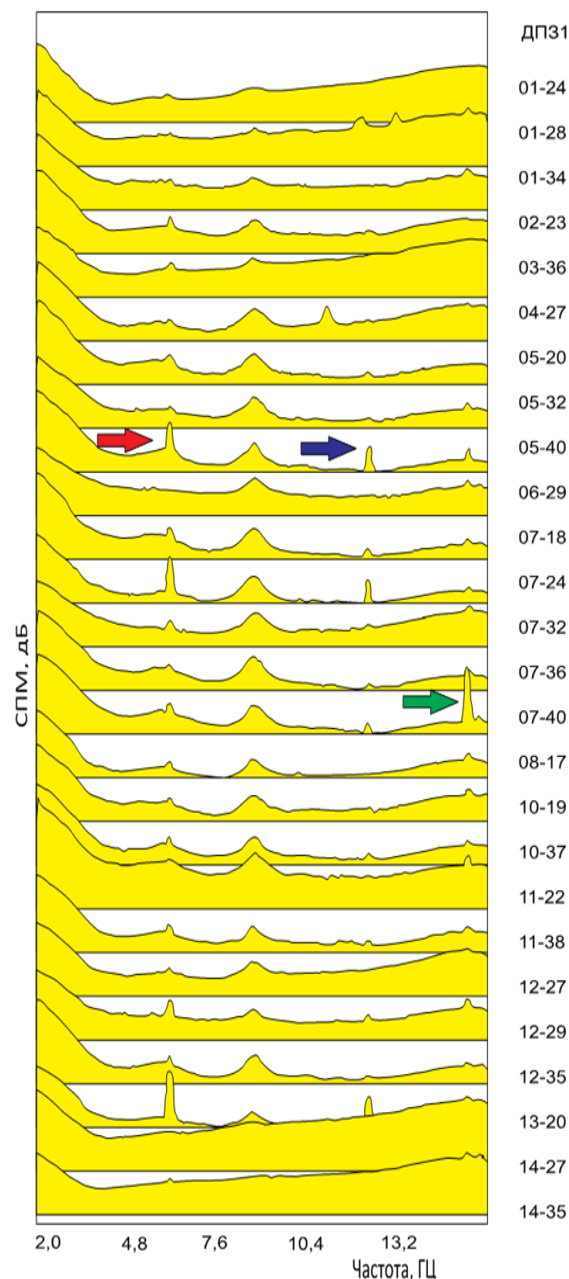


Рисунок 5. СПМ сигналов ДПЗ1. Стрелками обозначены гармоника и субгармоники резонанса 6,14 Гц. Справа – номера ТВС

Figure 5. Power spectral density of signals of direct charge sensors1. The arrows indicate harmonics and subharmonics of the 6.14 Hz resonance. The numbers of fuel assemblies are on the right

Согласно пояснительной записке³ и источникам [12,13], частота 6,14 Гц соотносится с первой изгибной формой колебаний ТВС, представляющей собой колебания балки с двумя закрепленными концами. Отсутствие существенных различий в частоте колебаний (с точностью не менее 0,01 Гц⁴) для всех ТВС, независимо от их возраста, свидетельствует о том, что условия закрепления (степень поджатия пружин) остаются неизменными, что означает надежную фиксацию ТВС в активной зоне (АЗ).

В работе [14] представлены экспериментальные данные об изменении собственной частоты колебаний ТВС в зависимости от степени поджатия пружин. При уменьшении степени поджатия собственная частота колебаний ТВС снижается, достигая значений вплоть до 3,9 Гц (данные для воды при температуре 30 °С).

Таким образом, наличие резонанса на частоте 6,14 Гц в спектральных характеристиках токовых сигналов ДПЗ на горизонте 1 свидетельствует о нормальном (штатном) поджатии ТВС. Отклонение в сторону более низких значений указывает на ослабление или недостаточную степень поджатия.

Все это открывает путь к созданию эффективного и надежного метода диагностирования степени прижима тепловыделяющих сборок в процессе работы энергоблока. Этот метод, недоступный ранее, не требует установки дополнительного оборудования и может быть реализован исключительно на основе расчетов.

Возникает вопрос о причинах отсутствия резонанса с частотой 6,14 Гц на ДПЗ, расположенных выше горизонтов 1 или 2. Вероятно, это связано с глобальным шумом, который делает резонанс неразличимым. Однако в некоторых режимах на горизонтах

3 или 4 регистрируются колебания с частотой 12,28 Гц, что соответствует второй гармонике частоты 6,14 Гц, что в свою очередь позволяет сделать вывод о зашумлении диапазона частот, в которых возможна регистрация первой гармоники.

Необходимо отметить, что резонанс на частоте 6,14 Гц в настоящее время наблюдается только в нейтронно-шумовых сигналах датчиков прямого заряда для реакторов с ВВЭР-1200. Для реакторов с ВВЭР-1000 такой эффект не был обнаружен. Однако это не означает, что вибрационное состояние тепловыделяющих сборок в реакторах разных типов существенно различается. Скорее всего, этот эффект связан с несовершенством методики измерений, используемой на реакторах с ВВЭР-1000. Ожидается, что при использовании современных аппаратных средств и методики «тонких» измерений, разработанной авторами (подробнее в [7,8]), этот эффект будет обнаружен и на реакторах с ВВЭР-1000.

Анализ нейтронно-шумовой составляющей ДПЗ на маневренных режимах

Для проведения качественного анализа шумовых сигналов необходимо было соблюдать определенные принципы их регистрации. Одним из ключевых принципов было использование стабильных режимов работы оборудования. Указанное ограничение было связано с низкой разрядностью и тактовой частотой аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Из-за этого любые отклонения от стационарных режимов работы оборудования или изменения в процессе работы приводили к значительным искажениям в спектральных оценках, что затрудняло работу и искажало результаты. Долгое время такой подход к анализу шума устраивал разработчиков измерительных систем и персонал атомных электростанций (АЭС), которые использовали эти системы на энергоблоках. Это было обусловлено тем, что энергоблоки отечественных АЭС были предназначены для базовой нагрузки без учета суточных колебаний мощности в энергосистеме.

Ситуация изменилась с вводом в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200, которые

³ Пояснительная записка. Сборка тепловыделяющая ядерного реактора, Нововоронежская АЭС-2, 2006.В.132.&.0UJA&&.JKA&&.021.СА.0006 392М.06.16.01 ПЗ, ОКБ «Гидропресс», 2009., 102 с.

⁴ Указанная точность измерений обоснована одним из авторов в рамках подготовки к защите диссертации и ввиду большого объема не может быть представлена в данной работе. Однако при необходимости, авторы готовы предоставить указанную информацию при обращении на их электронные адреса

изначально были предназначены для суточного регулирования мощности. Поэтому возникла необходимость измерений шумовой составляющей вариативных сигналов в переходных режимах работы.

Авторы разработали методику и успешно провели серию шумовых измерений в маневренных режимах работы энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 в сентябре 2022 года. Длительность регистрации составила несколько часов.

В статье рассматривается запись, длительностью 400 минут. Начало записи соответствует моменту, когда энергоблок достиг 77 % стационарного состояния, а конец – 96 % стационарного состояния. Более подробно об этом можно узнать из работ [15,16].

В виду ограниченного объема статьи авторы ограничатся анализом только одной пары сборок с координатами 04-29 и 04-27. Важно отметить, что КНИ 04-29 установлена в тепловыделяющей сборке, где перемещается орган регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) 12 группы, а КНИ 04-27 находится в соседней тепловыделяющей сборке (ТВС). Для получения спектральных оценок сигналов, исходные процессы были подвергнуты цифровой фильтрации и разреживанию. Верхняя частота была установлена на уровне 32 или 16 Гц в соответствии с рекомендациями из [6].

При перемещении ОР СУЗ регистрировались наблюдаются δ -образные возмущения нейтронного, значительно превышающие фоновые значения как в сигналах внешних ионизационных камер (ИК), так и в сигналах внутризонных ДПЗ (см. рис. 6). ДПЗ с номерами 7, 6, 5, 4 одновременно реагируют на перемещение органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Это свидетельствует о том, что причиной данных возмущений является общий фактор. Амплитуда одного из выбросов может превышать среднеквадратичное значение (СКЗ) фона в десятки раз, что существенно увеличивает мощность и вариативность процесса.

ОР СУЗ из 12-й группы расположены в той же ТВС, что и КНИ с координатами 04-29. Это означает, что расстояние между

поглощающими стержнями (ПС) СУЗ и ДПЗ7 составляет всего несколько сантиметров. В каждой ТВС имеется 18 направляющих каналов, предназначенных для перемещения ОР СУЗ. Эти каналы расположены симметрично относительно вертикальной оси симметрии ТВС и равномерно распределены по ее поперечному сечению. Измерительный канал КНИ немного смещен относительно вертикальной оси симметрии ТВС. В непосредственной близости от него, на расстоянии нескольких сантиметров, находятся четыре ПС СУЗ. Любое их перемещение вызывает локальное возмущение нейтронного поля, которое регистрируется ближайшими ДПЗ.

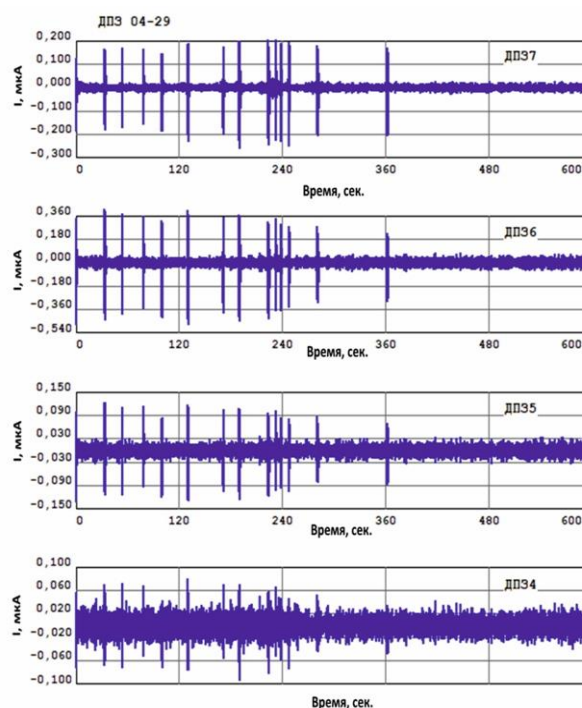


Рисунок 6. Реализации шумов верхних ДПЗ (ДПЗ7,6,5,4 – сверху – вниз) в ТВС 04-29 с ОР СУЗ 12 группы на уровне мощности 77 % в течение 10 мин
Figure 6. Realizations of noise of upper direct charge sensors (direct charge sensors 7,6,5,4 - from top to bottom) in TVS 04-29 with control rods of group 12 at power level 77 % during 10 min

Для анализа спектральной характеристик сигналов ДПЗ был выбран временной интервал длительностью 10 минут. Это означает, что на протяжении всей реализации, которая составляет 400 минут, было получено 40 спектров плотности мощности (СПМ). Эти спектры представлены в виде трехмерного «водопада» на рисунке 7.

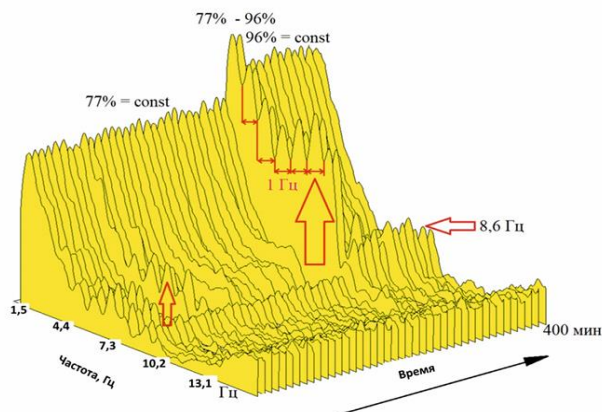


Рисунок 7. Водопад спектров СПМ в логарифмическом масштабе для сигнала ДПЗ6 в течение всего времени измерений

Figure 7. Falls of power spectral density spectra in logarithmic scale for the direct charge sensors 6 signal during the whole measurement time

На каждом десятиминутном интервале наблюдается различное количество δ -образных возмущений. Однако в любом случае они формируют характерный спектр, напоминающий «гребенку». Например, при стационарном уровне мощности в 77 %, средняя интенсивность перемещений 12 группы ОР СУЗ составляет примерно один шаг в минуту. Эти перемещения создают импульсную нестационарность. В процессе увеличения мощности РУ с 77 % до 96% за 6,5 минут ОР СУЗ совершил 31 перемещение. Из них 14 были с двойным шагом, а 17 – с одинарным. Всего было 45 одинарных шагов, что составляет около семи шагов в минуту. Каждая из сорока СПМ на рисунке 7 имеет свой уникальный вид.

Не имеет значения, в какой части реализации произошло δ -образное возмущение и сколько их было. После спектрального преобразования мы получаем гармонический ряд частотных максимумов. Единственный шаг ОР СУЗ (или выброс) на интервале времени оценивания СПМ в 10 минут лишь незначительно увеличивает общую дисперсию сигнала, а структура, напоминающая «гребенку», находится на уровне собственного нейтронного фона [17,18,19].

Однако когда начинают двигаться вместе 11 и 12 группы ОР СУЗ, в СПМ сигнала ДПЗ появляется характерная структура, напоми-

нающая «гребенку» (см. рис. 7, красная вертикальная стрелка).

Частота дискретизации СВРК при регистрации сигналов, ограничена 1 Гц, не позволяет фиксировать высокочастотные возмущения нейтронного поля, вызванные перемещением ОР СУЗ. Поэтому при исследовании маневренных режимов целесообразно использовать дополнительно высокочастотную запись нейтронных шумов.

Так, например, если рассмотреть форму δ -образных возмущений во временной области (см. рис. 5), можно увидеть, что они длятся ровно 1 секунду и состоят из высокочастотных компонентов, где многократно повторяется элементарный шаг длительностью 0,125 секунды, что соответствует частоте 8 Гц. Это свидетельствует о высокочастотном полигармоническом возмущении нейтронного поля (рис. 8). Теперь можно определить числовые параметры этой гребенчатой структуры. Спектральная характеристика шума ДПЗ или ИК имеет вид гребенки с шагом по частоте, равным 1 Гц, и эти гармоники достигают как минимум частоты 8 Гц (рис. 8).

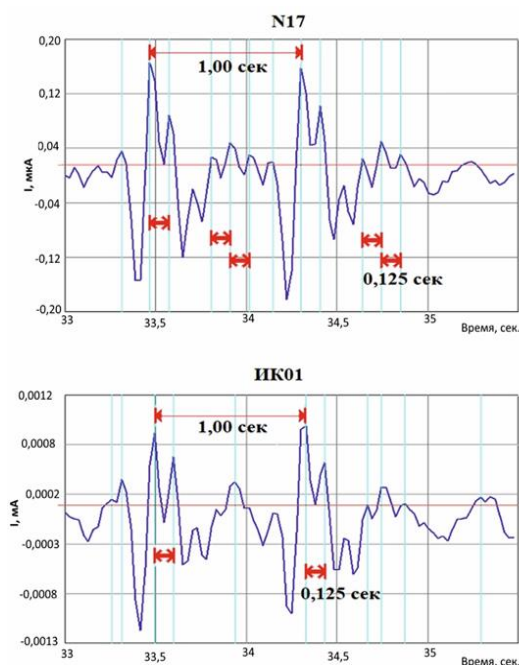


Рисунок 8. Двойной шаг ОР СУЗ длительностью две секунды (периодическое возмущение) в сигнале ДПЗ7 (верхний график) и ИК (нижний график)

Figure 8. Double step of the control rods of two seconds duration (periodic perturbation) in the direct charge sensors 7 signal (upper graph) and ionization chamber (lower graph)

Нейтронные шумы можно разделить на два типа: глобальные и локальные. Глобальные шумы не зависят от местоположения и описываются точечной нейтронной кинетикой. Они характерны для низкочастотных составляющих, например, с периодом менее 1 секунды. Перемещения органов регулирования системы управления и защиты вызывают глобальные возмущения нейтронного поля. Эти возмущения регистрируются удаленными нейтронными датчиками. Например, формы сигналов, полученных от удаленных датчиков положения (ДПЗ7) и интенсивности (ИК), идентичны. В функции когерентности сигналов ИК1 и ИК2, которые также удалены друг от друга, наблюдается тот же гребенчатый вид с шагом 1 Гц.

Эксперимент показал, что многократное высокочастотное возмущение нейтронного поля с достаточной амплитудой, вызванное ОР СУЗ, также может иметь глобальный характер (подробнее [20]). Регулирующие группы ОР СУЗ представляют собой не только «тяжелые» по вносимой реактивности органы управления, но и довольно высокочастотные. Их перемещения можно сравнить с высокочастотными гармоническими воздействиями, которые изменяют энерговыделение по всему объему активной зоны.

При обосновании маневренных режимов необходимо учитывать количество циклов воздействия с частотой до 8 Гц. Вблизи частоты 8 Гц находится глобальная первая корпусная акустическая волна ($АСВ_{ИК}$), которая охватывает всю активную зону и модулирует плотность теплоносителя, а значит, и нейтронный поток [21,22]. Изменения в нейтронном поле, вызванные перемещением органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) со скоростью не более двух сантиметров в секунду, вызывают колебания, которые вступают в резонанс с барометрическим эффектом от воздействия $АСВ_{ИК}$.

Если ОР СУЗ перемещается слишком часто, это может привести к монотонному увеличению дисперсии нейтронного потока из-за резонанса на частоте $АСВ_{ИК}$. Для сравнения амплитуды сигналов различных ДПЗ, на рисунке 9 показаны их реализации, «склеенные» во времени.

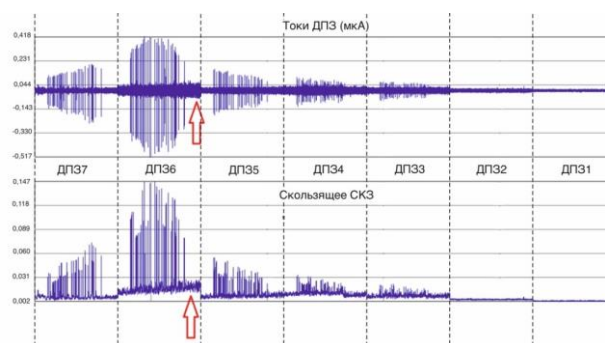


Рисунок 9. «Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7, ..., ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)

Figure 9. «Glued» one after another in time realizations of seven direct charge sensors (direct charge sensors 7, ..., direct charge sensors 1 – from left to right) during the power transition from 77 to 96 % in 6.5 min each (upper graph). Their sliding RMS are in the bottom graph

Можно увидеть, что максимальные выбросы наблюдаются на уровне ДПЗ6. Перемещение любой из регулирующих групп ОР СУЗ вызывает глобальные возмущения нейтронного поля. Помимо выбросов амплитуды нейтронного потока, вызванных перемещением ОР СУЗ, наблюдаются и другие нестационарные явления. Например, медленный рост среднеквадратичного значения (СКЗ) фона во времени при многократных шагах ОР СУЗ. На этих графиках СКЗ нейтронного фона значительно меньше амплитуды единичного выброса, но при многократных шагах ОР СУЗ в течение кампании СКЗ может достигать недопустимо больших значений.

Мощность $АСВ$ определяется амплитудами пульсаций давления, создаваемыми четырьмя главными циркуляционными насосными агрегатами (ГЦНА). При изменении мощности реактора режим работы ГЦН остается неизменным, то есть параметры $АСВ_{ИК}$ также остаются постоянными. Таким образом, $АСВ_{ИК}$ по отношению к активной зоне является постоянной вынуждающей силой, модулирующей нейтронный поток с частотой 8,6 Гц.

После нескольких перемещений органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) было замечено увеличение амплитуды колебаний потока нейтронов на частоте 8,6 Гц. Это явление связано с

резонансным возбуждением, которое возникает из-за того, что частота внешнего механического воздействия – гармоника с частотой 8 Гц, создаваемая перемещением ОР СУЗ, почти совпадает с центральной частотой низкодобротного резонанса $АСВ_{1К}$. Этот резонанс также представляет собой внешнее воздействие на активную зону, но уже барометрическое.

Таким образом, два различных физических явления – механическое и барометрическое — усиливают амплитуду потока нейтронов на частоте, близкой к 8,6 Гц.

В процессе работы реактора наблюдается взаимодействие процессов, имеющих одинаковую частоту. Это взаимодействие может быть как прямым, так и обратным. Органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) оказывают влияние на нейтронное поле, а нейтронное поле, в свою очередь, формирует ненулевой градиент вертикальных сил с частотой 8,6 Гц, воздействуя на ОР СУЗ.

В течение суток реактор переживает два переходных процесса: от 96 % мощности до 77 % и от 77 % до 96 %, а также два стационарных уровня мощности – 77 % и 96 %. Для реализации этих режимов органы управления мощностью многократно воздействуют на активную зону, создавая непрерывный нестационарный шумовой нейтронный процесс. Свойства шумового нейтронного поля реактора ВВЭР-1200 хорошо изучены, но только в стационарных режимах. Многократные перемещения ОР СУЗ приводят к резонансному возбуждению акустической стоячей волны ($АСВ_{1К}$), что, в свою очередь, способствует увеличению ее амплитуды. $АСВ_{1К}$ – это глобальное явление, которое доминирует в верхней части активной зоны. В нижней половине активной зоны резонансное возбуждение $АСВ_{1К}$ на частоте 8,6 Гц не наблюдается.

Поэтому шумовые нейтронные измерения следует проводить совместно с другими штатными измерениями во время испытаний маневренных режимов.

Заключение

Методы контроля, основанные на нейтронном шуме, обладают рядом неоспо-

римых преимуществ в выявлении и идентификации аномальных состояний оборудования. К числу ключевых достоинств можно отнести:

- отсутствие необходимости в активных действиях. Нейтронный шум, как естественный физический процесс, возникает без каких-либо манипуляций со стороны оператора;

- высокую чувствительность к отклонениям от нормы. Шумовые методы контроля способны улавливать даже малейшие изменения в состоянии оборудования, что делает их очень эффективными в диагностике;

- работу в условиях эксплуатации. Оценка нейтронного шума может использоваться, начиная с мощности РУ около 50 %, практически неограниченное время;

- точное определение местоположения дефектов. Нейтронный шум позволяет с высокой точностью определять расположение дефектов, что значительно облегчает поиск и устранение неисправностей;

- уникальность в отношении некоторых типов неисправностей. В некоторых случаях, когда другие методы не могут обеспечить точное выявление и оценку проблем, шумовые методы контроля являются незаменимыми.

Практические исследования в области нейтронного шума являются необходимыми, поскольку интерпретация различных аномалий, выявляемых с помощью шумовых методов, может быть сложной задачей. Кроме того, для точной настройки различных моделей и анализа спектральных характеристик оборудования требуются практические исследования. Эти различия могут проявляться не только в разных проектах реакторных установок, но и в пределах одной атомной электростанции.

Применение методов контроля на основе нейтронного шума значительно повышает наблюдаемость активной зоны без использования дополнительного оборудования, что в свою очередь способствует повышению уровня безопасности ядерной энергетической установки.

В режимах с частыми изменениями мощности реактора частота шагов регулирующих органов системы управления и защиты

значительно возрастает по сравнению с режимом постоянной мощности. Это приводит к высокочастотному воздействию на нейтронный поток и резонансному возбуждению нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц.

Для анализа режимов с частыми изменениями мощности необходимо проводить многоканальные шумовые нейтронно-вибрационные измерения, в дополнение к стандартным сигналам системы внутриреакторного контроля и системы виброакустического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мительман М.Г., Розенблюм Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. Москва: Энергоиздат, 1982. 78 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093237/ (дата обращения: 13.09.2024).
2. Поваров В.П., Украинцев В.Ф., Голубев Е.И., Жук М.М. Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200. Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. 264 с. EDN: SUYOSM. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259> (дата обращения: 13.09.2024).
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 756 с. EDN: Режим доступа: <https://djvu.online/file/AMUs2BmF0nS10> (дата обращения: 13.09.2024).
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. 656 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ> (дата обращения: 13.09.2024).
5. Randall R.B. Frequency analysis. Denmark: Bruel & Kjaer, 1987. 344 p. (In Eng.). Available at: <https://a.co/d/54hR7mm> (accessed: 13.09.2024).
6. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография (Ч.1). Москва: Наука, 2021. 216 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoymonitoring_2021/?ysclid=m3cys7lw94707251673 (дата обращения: 13.09.2024).
7. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>
8. Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Experience of carrying out comprehensive measurements using heterogeneous systems at various stages of the VVER-1200 power unit commissioning for operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>
9. Федоров А.И., Слепов М.Т. Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на энергоблоке № 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2017;3:77–87. <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07>
10. Fedorov A.I., Slepov M.T. Comprehensive measurement of diagnostic parameters of equipment at the power unit № 1 of Novovoronezh NPP in the process of pilot operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07>
11. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография. Москва: Наука, 2018. 472 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/?ysclid=m3cyymryxt825179558 (дата обращения: 13.09.2024).
12. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2021;4:110–121. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>
13. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Phenomenology of acoustic standing waves applied to the VVER-1200 reactor plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021;4:110–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>
14. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_sistemy-diagnostirovaniya-vver_2019/?ysclid=m3cz0m9w8v509642769 (дата обращения: 13.09.2024).
15. Проскуряков К.Н., Шакирзянов Ф.Н., Каратаев В.В. Способ предотвращения резонансных вибраций ТВЭЛ и ТВС ВВЭР-1000. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС*. 2008;23:18–25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17660521&ysclid=m3cz32gt29750510357> (дата обращения: 13.09.2024).
16. Proskuryakov K.N., Shakirzyanov F.N., Karataev V.V. A method for preventing resonant vibrations of TVEL and VVER-1000 fuel assemblies. *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Obespechenie bezopasnosti AES. Ser.: Ensuring the safety of nuclear power plants*. 2008;23:18–25. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17660521&ysclid=m3cz32gt29750510357> (accessed: 13.09.2024).
17. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. Москва: МЭИ, 1984. 67 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001236841> (дата обращения: 13.09.2024).

14. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР. В сборнике: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Т.2. Подольск, 2007. С. 356–375.

Dragunov Yu.G., Dranchenko B.N., Abramov V.V., Khayretdinov V.U. Dynamics and strength of water-moderated power reactors. In the collection: Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER. Vol.2. Podolsk, 2007. P. 356–375.

15. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ «быстрых» шумовых измерений динамических процессов ВВЭР. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2023;4:19–36. <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of fast noise measurements of dynamic VVER processes. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;4:19–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

16. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2023;4(143):51–61, https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. *Trydi NGTY im. R.E. Alekseeva*. 2023;4(143):51–61. (In Russ.). Available at: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51

17. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е., Лю Хайтао, Ли Йоу. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай). *Атомная энергия*. 2007;103(5):277–282. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2250/2229> (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E., Liu Haitao, Li Yo. Testing of improved algorithms controlling energy release in VVER-1000 in maneuvering regimes at the Tianwan Nuclear Power Plant (China). *Atomnaya energiya*. 2007;103(5):277–282. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2250/2229> (accessed: 05.09.2024).

18. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». *Атомная энергия*. 2008;105(4):237–240. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2639/2516> (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Kovel A.I., Mamichev V.V., Filimonov P.E. Development, implementation and current state of the calculation program «Reactor Simulator». *Atomnaya energiya*. 2008;105(4):237–240. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2639/2516> (accessed: 05.09.2024).

19. Аверьянова С.П., Филимонов П.Е. Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200. *Атомная энергия*. 2009;107(6):348–351. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1630/1610> (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Filimonov P.E. Xenon stability of VVER-1200. *Atomnaya energiya*. 2009;107(6):348–351 (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1630/1610> (accessed: 05.09.2024).

20. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Работа ВВЭР-1200/130 в суточном графике нагрузки. *Атомная энергия*. 2012;113(5):247–252. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401/1382> (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. VVER-1200/1300 reactor operation in a dailyload curve. *Atomnaya energiya*. 2012;113(5):247–252. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401/1382> (accessed: 05.09.2024).

21. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. *Атомная энергия*. 2013;114(5):249–253. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124/1105> (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Development of methods for VVER-1200/1300 control in a daily load schedule. *Atomnaya energiya*. 2013;114(5):249–253. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124/1105> (accessed: 05.09.2024).

22. Глушенок Р.С. Исследование ключевых аспектов внедрения режима суточного регулирования мощности на АЭС Украины. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015;2–1(22):18–26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23307141> (дата обращения: 02.09.2024).

Glushenkov R.S. Research of key aspects of load-following mode implementation at NPPs of Ukraine. *Technological audit and production reserves*. 2015;2–1(22):18–26. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23307141> (accessed: 02.09.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Аркадов Г.В. – обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов;

Слепов М.Т. – формулировка идеи и целей исследования, проведение исследований, представление экспериментальных данных с использованием методологии многоканальных синхронизированных измерений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Геннадий Викторович Аркадов, кандидат технических наук, генеральный директор, Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>

e-mail: arkgen47@gmail.com

Михаил Тимофеевич Слепов, кандидат технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежской области, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Arkadov G.V. – processing of research results, identifying patterns, making calculations;

Slepov M.T. – formulating research idea and objectives, conducting research, presenting experimental data using multichannel synchronized measurement methodology.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Gennady V. Arkadov, Cand. Sci (Eng), executive director, Non-profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>

e-mail: arkgen47@gmail.com

Mikhail T. Slepov, Cand. Sci (Eng), Head of Department, Novovoronezh NPP the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 16.09.2024

После доработки / Revised 14.11.2024

Принята к публикации / Accepted 19.11.2024