

## АНАЛИЗ «БЫСТРЫХ» ШУМОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВВЭР

**Г.В. Аркадов\***, **В.И. Павелко\*\***, **М.Т. Слепов\*\*\***

*\* Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии «Райз»*

*111141, г. Москва, Зеленый проспект, д. 5/12, стр. 3*

*\*\* АО «Научно-технический центр «Дианпром»*

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

*\*\*\* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС*

*396071, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1*



Исследования маневренных режимов ВВЭР для подтверждения возможности участия АЭС в режиме суточного несения мощности ведутся достаточно длительное время. Испытания на различных АЭС с ВВЭР-1000 (Запорожская АЭС в 1998 г., Хмельницкая АЭС в 2005 г., АЭС Тянь-Вань – в 2007 г.) показали практическую возможность участия АЭС в суточном графике несения мощности. В связи с вводом в эксплуатацию новых энергоблоков с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-1200 необходимо проведение аналогичных работ на всех АЭС с РУ ВВЭР-1200: НВАЭС-2, ЛАЭС-2, Белорусская АЭС. Представлены некоторые аспекты использования шумовых методов контроля для анализа состояния оборудования РУ и активной зоны (АЗ). Проанализированы штатные архивы системы верхнего блочного уровня (СВБУ), системы внутриреакторного контроля (СВРК) и результаты дополнительно произведенных многоканальных «быстрых» измерений с частотой 1 кГц для анализа маневренного режима 95–55–95% реакторной установки ВВЭР-1200. Выявлены глобальные возмущения нейтронного потока в активной зоне (АЗ) после одного шага органа регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ), которые затухают в течение одной секунды, если за это время не произошел следующий шаг ОР СУЗ. Контролировать такие быстрые нейтронные процессы можно только нейтронно-шумовыми измерениями с верхней частотой не менее 20 Гц.

**Ключевые слова:** ВВЭР-1200, ксеноновые колебания, офсет, борное регулирование, паровая фаза, нейтронные шумы, спектр, акустические стоячие волны.

**Для цитирования:** Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ «быстрых» шумовых измерений динамических процессов ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 19–36. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

## **ВВЕДЕНИЕ**

С момента возникновения технологии шумового анализа сигналов РУ с ВВЭР различными группами исследователей независимо друг от друга было сформулировано несколько критериев при регистрации информации для получения качественных результатов для последующего анализа. основополагающим требованием к проведению шумовых экспериментов являлась регистрация данных при стационарных режимах работы энергоблоков, так как любая нестационарность вносила существенные изменения в спектральные оценки, что в конечном итоге затрудняло работу и искажало полученные результаты. Данное требование директивно включалось в инструкции по эксплуатации различных диагностических систем, использующих шумовые методы анализа сигналов (система SUS производства «Siemens»). В течение длительного периода времени сложившаяся ситуация устраивала как разработчиков различных диагностических систем, так и персонал АЭС, эксплуатирующих их на энергоблоках. С одной стороны, это объяснялось несовершенством используемых технических средств (низкой скоростью работы аналого-цифровых преобразователей, ограниченным объемом для хранения информации, громоздкостью аппаратуры и т.д.), с другой – использованием отечественных энергоблоков АЭС только в режиме несения базовой нагрузки без отслеживания суточных колебаний мощности в энергосистеме.

С вводом в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200, для которых изначально проектом предусмотрено участие в суточном регулировании мощности, возникла необходимость организации и проведения шумовых измерений при переходных режимах работы. В статье представлены некоторые результаты шумовых исследований маневренных режимов ВВЭР-1200 энергоблока 1 НВАЭС-2, осуществленных в сентябре 2022 г. в соответствии с разработанной рабочей программой. В рабочей программе пошагово прописаны действия персонала АЭС для десяти последовательных маневренных суток, построенных по различным стратегиям их реализации. Здесь рассматриваются десятые сутки с так называемым жестким регулированием мощности. В заключении рабочей программы делается, на наш взгляд, сомнительное предложение: «Специальной методики для обработки результатов не требуется. Обработка результатов проводится на основании таблиц и графиков из архива СВБУ, СВРК, КЭ СУЗ». Пользуясь теми же архивами и дополнительно произведя многоканальные «быстрые» измерения с частотой 1 кГц, проанализируем данный маневренный режим.

## **КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА И ХРОНОЛОГИЯ СОБЫТИЙ**

Исследования маневренных режимов ВВЭР – как расчетно-теоретические, так и натурные экспериментальные – проводятся длительное время [1–17]. Так натурные испытания проводились с ВВЭР-1000 на Запорожской АЭС в 1998 г. [4], на Хмельницкой АЭС в 2005 г. [8], на АЭС Тянь-Вань в 2007 г. [9]. Из литературных ссылок, расположенных хронологически, следует, что актуальность темы маневрирования мощностью не снимается и в настоящее время, так как маневренные испытания проводятся на всех новых блоках с ВВЭР-1200 (НВАЭС-2, ЛАЭС-2, Белорусская АЭС) с первой кампании по настоящее время [10–15]. Тем самым в поисках оптимума развивались различные стратегии маневренных режимов. После каждого этапа испытаний предлагались модернизации существующего проектного оборудования РУ и способы автоматизации ведения маневренного режима.

Обычно испытания проводились в течение не более 10-ти суток. Полномасштабный суточный маневренный режим предполагает непрерывную работу в течение не менее двухсот эффективных суток [16].

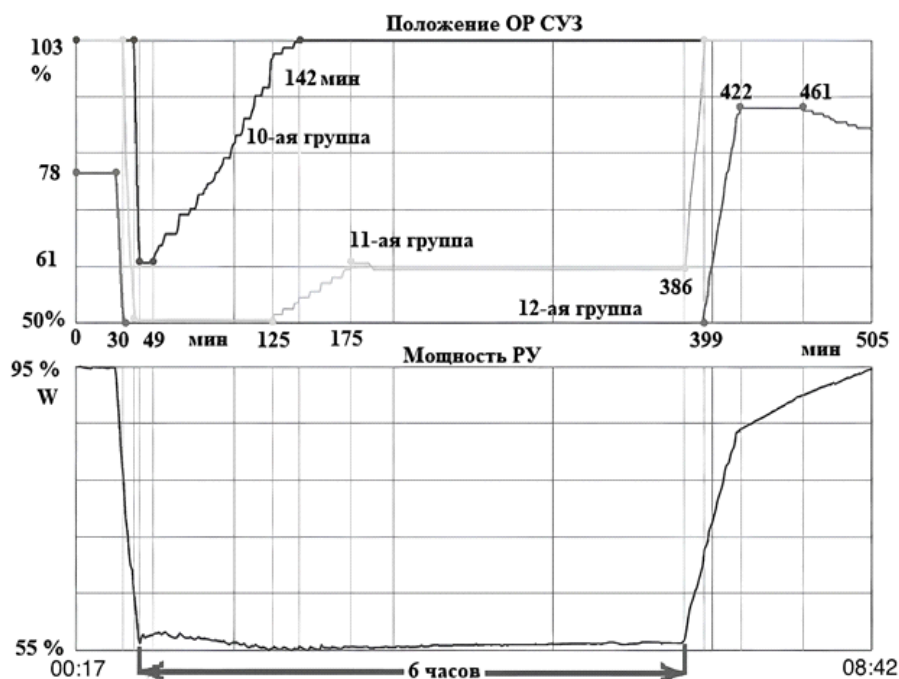


Рис. 1. Изменение положения регулирующих групп (верхний график) и мощности (нижний) РУ при проведении маневренного режима

Название суточного маневренного режима мощности в виде 100–50–100% сложилось исторически и в настоящее время не соответствует действительности. После многочисленных расчетных и экспериментальных работ в названии режима изменился верхний уровень мощности из соображений поддержания надежной работы турбогенератора (ТГ) – 96%. Нижний уровень мощности может варьироваться от 45 до 75%.

На рисунке 1 представлена зависимость от времени мощности реактора. Временной интервал составляет 505 мин (00:17 - 08:42). На нем отмечены временные маркеры в минутах, при которых происходят характерные изменения положений органов регулирования (ОР) групп 10, 11 и 12 системы управления и защиты (СУЗ).

Через 30 минут после начала записи из стационарного состояния мощности в 95% последовательно одна за другой регулирующие группы ОР СУЗ перемещаются в запланированные нижние экстремальные положения. Сначала 12-я группа из положения в 78% перемещается в положение 50%, затем 11-ая группа перемещается из положения в 103% (верхний концевой выключатель (ВКВ) в положение 50%, затем 10-я группа из положения 103% (ВКВ) перемещается в положение 62%.

Перемещение регулирующих групп происходит с максимальной допустимой скоростью, приводящей к скорости снижения мощности 3% в минуту, что соответствует снижению мощности ТГ со скоростью 36 МВт в минуту. Таким образом, за 15 минут все три группы оказываются в нижнем запланированном положении. За это короткое время мощность реактора падает от 95 до 55%.

Кроме положений регулирующих групп ОР СУЗ и мощности РУ минимальные значения принимает аксиальный офсет (–47%), что много меньше рекомендованных значений офсета, и температура теплоносителя (ТН) на входе в активную зону 291°C ( $T_{вх} = 291^{\circ}\text{C}$ ). Затем  $T_{вх}$  незначительно повышается в результате температурного эффекта реактивности, что можно отнести к перерегулированию. В данный короткий период времени изменяются расход продувочной воды и концентрация борной кислоты, т.е. двумя основными реактивностными воздействиями – перемещением трех

групп ОР СУЗ и водообменом – достигается минимальный запланированный уровень мощности в 55%.

Процесс перехода 95–55% является очень высокоскоростным переходным процессом, который в дальнейшем определит негативные стороны маневрирования мощности. Такое быстрое и значительное по амплитуде изменение мощности РУ вызывает также мощные аксиальные ксеноновые колебания (КК) в нисходящей фазе (т.е. направленные на уменьшение мощности РУ).

Таким образом, второй этап испытаний – удержание постоянной мощности на уровне 55% в течение шести часов – начинается и в дальнейшем сопровождается мощными КК. Три группы ОР СУЗ, находящиеся на минимальных прогнозных положениях, вызывают большую неравномерность поля энерговыделения активной зоны, что уменьшает глубину выгорания топлива. Это подтверждается минимальным значением аксиального офсета с уровнем –47%, т.е. минимальная мощность в 55% вырабатывается, главным образом, нижней половиной активной зоны.

Уже на 19-ой минуте с начала испытаний 10-я группа ОР СУЗ направляется в обратную сторону (вверх), внося положительную реактивность, компенсируя тем самым нисходящий тренд КК [8, 12, 17, 18]. Всего за 100 минут 10-я группа ОР СУЗ из положения ВКВ после достижения глубины погружения в 62% вновь вернулась в исходное положение ВКВ, совершив большое число шагов перемещений исключительно для подавления нисходящей фазы КК. При этом мощность РУ в течение шести часов (ночной период) поддерживается с высокой точностью на постоянном уровне 55% не только ОР СУЗ, но и авторегулированием со стороны второго контура. Удержание мощности с высокой точностью – второй негативный фактор данного маневренного режима. Здесь возможен водообмен как еще один реактивный фактор, если авторегулирование со стороны ТГ путем удержания давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК) на постоянном уровне достигает допустимых границ. Авторегулирование путем удержания давления в ГПК в узком «коридоре» – основное свойство маневрирования под названием «жесткое регулирование» мощности. Увеличение объема водообмена по сравнению с базовым стационарным режимом функционирования РУ – негативный фактор при реализации маневренного режима.

На 125-ой минуте вверх направляется 11-я группа, т.е. существует временной интервал, когда в движении вверх находятся две группы (10-я и 11-я), а 12-я группа находится в неизменном нижнем положении. Увеличение числа шагов ОР СУЗ по сравнению с базовым стационарным режимом функционирования РУ – также негативный фактор при реализации маневренного режима. Движение 10-ой и 11-ой групп вверх монотонно увеличивает офсет с –47% до –34%, несколько сдвигая генерирование мощности в верхнюю половину активной зоны. Активная зона находится в непрерывном нестационарном состоянии, что ускоренно исчерпывает ресурс твэлов, ОР СУЗ, системы группового и индивидуального управления (СГИУ) и всех других органов управления реактивностью. В этот период авторегулирование (рис. 1) производится относительно частыми актами. После достижения 10-ой и 11-ой групп стационарных состояний авторегулирование меняет свой характер (рис. 1).

При движении двух групп стержней давление пара в коллекторе парогенератора как параметр, характеризующий авторегулирование со стороны турбины, имеет вид зашумленной константы. На 175-ой минуте после достижения двумя группами (10-ой и 11-ой) своих стационарных состояний (10-я группа – на ВКВ, 11-я группа – на уровне 61%) аксиальный офсет вновь по линейной зависимости спадает до –40%.

Изменение расхода ТН в первом контуре в зависимости от мощности РУ является плотностным эффектом – увеличение плотности ТН (и массового расхода) при снижении температуры ТН. Однако во временном интервале удержания постоянной мощ-

ности на уровне 55% монотонно снижается расход ТН через теплообменные петли (на 2%). При нестационарном энерговыделении изменяются локальные теплогидравлические характеристики участков активной зоны, приводящие к изменению объема ТН, проходящего через поперечное сечение ТВС, а также расходов перетечек ТН между соседними ТВС (по оценке авторов, с использованием методов шумового анализа величина перетечек ТН между соседними ТВС доходит до 4% от общего расхода ТН через поперечное сечение). Значит при реализации данного маневренного режима появляется неопределенность теплосъема или энергонапряженности ТВС. Кроме того интегральное гидравлическое сопротивление всей активной зоны также несколько изменяется, изменяя общий перепад давления на активной зоне и общий расход ТН в первом контуре.

В данный интервал времени повышается температура ТН на входе в активную зону  $T_{вх}$ . Далее этот запас реактивности используется при увеличении мощности РУ с 55 до 95%, в том числе и за счет отрицательного температурного коэффициента реактивности.

После окончания шести часов удержания мощности на уровне 55% осуществляется переходный процесс 55–95% перемещением 11-ой и 12-ой групп ОР СУЗ вверх. Производится также увеличение расхода продувочной воды и снижение концентрации борной кислоты, которая была практически неизменной на уровне 55% мощности. В результате мощность увеличивается до 87% по линейному закону со скоростью втрое меньшей, чем скорость снижения мощности на первом этапе 95–55%. На 399-ой минуте 11-ая группа достигает своего ВКВ, а после 422-ой минуты 12-я группа прекращает движение вверх, и увеличение мощности далее происходит по восходящей фазе КК, которые начинают подавлять вновь движением 12-ой группы ОР СУЗ, но уже вниз. Аксиальный офсет возвращается в рекомендованный диапазон и достигает +2%. Таким образом, осуществляется довольно сложный маневренный режим, в котором задействованы все управляющие реактивные воздействия (УРВ), а движения ОР СУЗ вверх и вниз направлены не только на изменение мощности, но и на ее удержание на постоянном уровне в результате подавления КК.

### **НЕЙТРОННОЕ ПОЛЕ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ОР СУЗ**

Штатные перемещения органов регулирования вниз в активную зону (10-ой, 11-ой и 12-ой групп ОР СУЗ) в переходном процессе 95–55% сопровождаются выбросами вниз нейтронной мощности активной зоны, и по мере продвижения органов вниз амплитуда выбросов монотонно уменьшается (рис. 2). При движении 12-ой группы вверх в переходном процессе 55–95% наблюдаются выбросы нейтронной мощности также вверх (рис. 3). При данном перемещении 12-ой группы вверх амплитуда выбросов нарастает, а также наблюдается возрастающий тренд среднеквадратичного значения (СКЗ) нейтронного фоновых шума. Такая динамика нейтронного потока  $n(t)$  объясняется различной скоростью его изменения  $n(t)/dt$  в зависимости от введения отрицательной реактивности (движение ОР СУЗ вниз) и положительной реактивности (движение ОР СУЗ вверх).

По отношению к уровню стационарного нейтронного шума (НШ) единственный шаг любой группы ОР СУЗ вызывает значительно больший по амплитуде выброс НШ. Если сравнить СКЗ стационарного НШ и амплитуду выброса НШ в результате одного шага ОР СУЗ, то получим различие в три – пять раз. После одного шага ОР СУЗ вся активная зона глобально подвергается практически мгновенному значительному по амплитуде воздействию, которое затухает в течение одной секунды, если за это время не произошел следующий шаг ОР СУЗ. Контролировать такие быстрые нейтронные процессы можно только нейтронно-шумовыми измерениями до верхней частоты не менее 20 Гц.

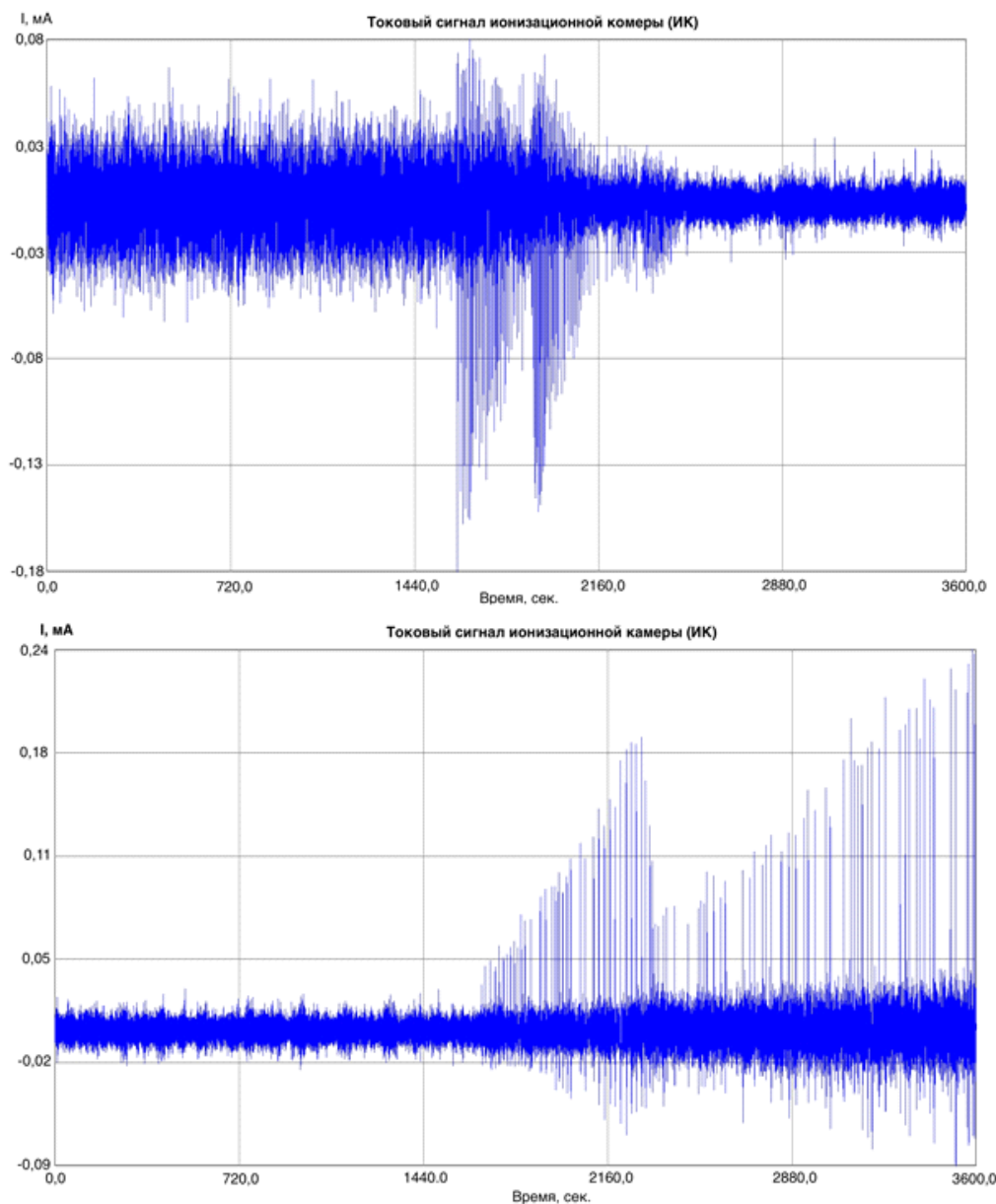


Рис. 2. Фрагменты нейтронной мощности по сигналам ИК при начале снижения мощности за счет перемещения ОР СУЗ вниз в переходном процессе 95–55% (верхний график) и при начале увеличения мощности в переходном процессе 55–95% за счет перемещения вверх 12-ой группы

Сразу после достижения мощности РУ в 55% следует малый интервал времени, на котором не производятся УРВ и, в частности, нет перемещений ОР СУЗ. Здесь НШ представляет собой почти стационарный процесс с СКЗ меньшим, чем СКЗ НШ на уровне мощности 95% (верхний график на рис. 2).

На рисунке 2 проиллюстрировано, что выбросы вверх и вниз сигналов нейтронной мощности связаны именно с движением 10-ой, 11-ой и 12-ой групп ОР СУЗ вниз или вверх. В ночной период малой мощности производится подавление КК перемещением вверх 10-ой и 11-ой групп ОР СУЗ. Эти два противоположно направленных реактивных эффекта приводят к тому, что выбросы НШ вверх уменьшаются по

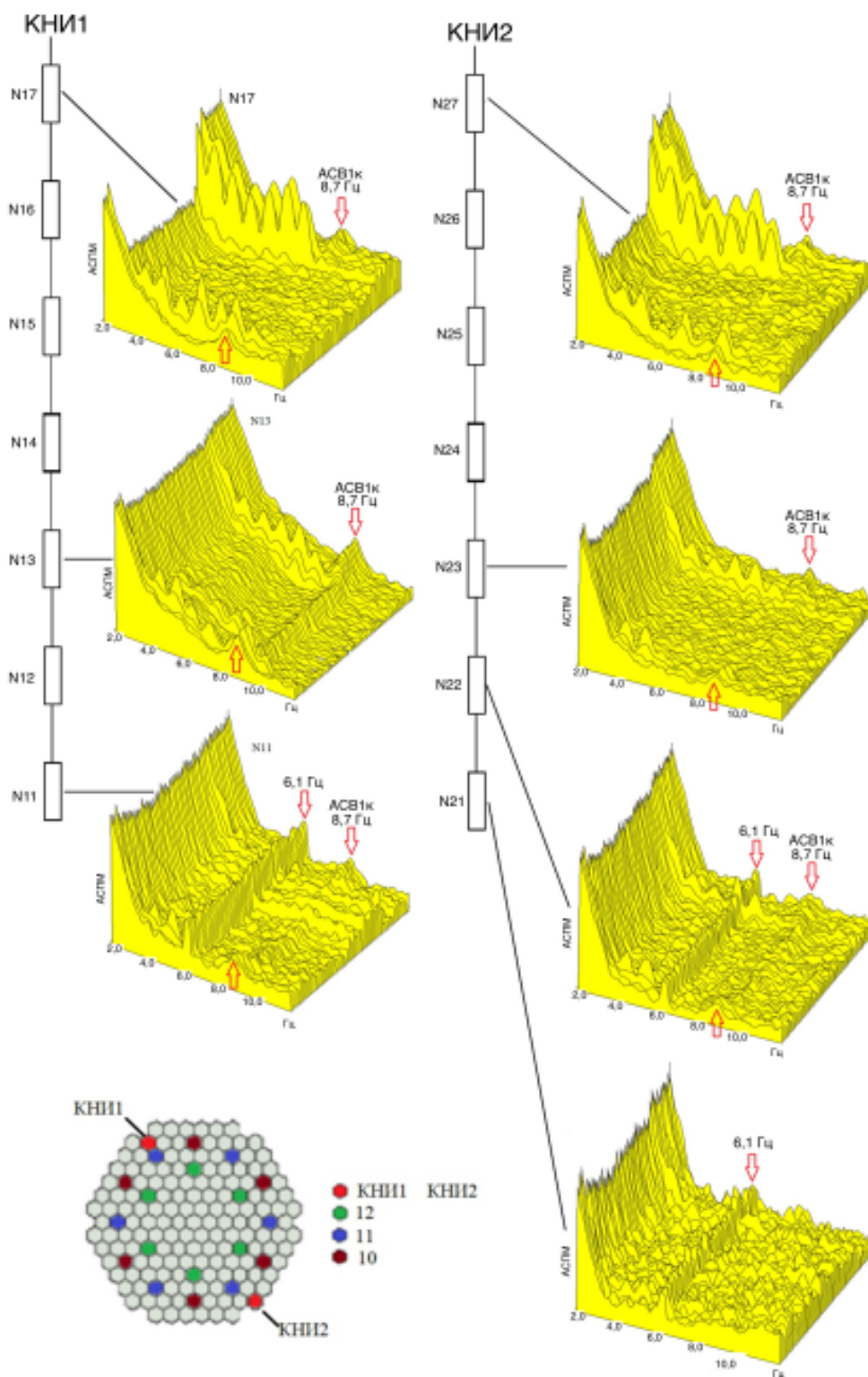


Рис. 3. Водопасы спектров (АСПМ) сигналов датчиков прямого заряда (ДПЗ) КНИ1 (левый столбец) и КНИ 2 (правый столбец). Стрелками помечены две резонансные особенности: АСВ1к (8,7 Гц) и вибрационный резонанс на частоте 6,1 Гц

амплитуде, а СКЗ фона НШ практически остаются неизменными. Даже после прекращения движения ОР СУЗ и, как результат, подавления КК НШ представляет собой практически стационарный процесс вплоть до момента начала переходного процесса 55–95%. Иные УРВ помимо перемещения ОР СУЗ на мощности 55% СКЗ НШ не изменяют. Таким образом, перемещения ОР СУЗ, как УРВ, наиболее сильно возмущают нейтронное поле активной зоны по сравнению с другими УРВ. Переход на мощность 95% перемещением 12-ой группы ОР СУЗ вверх сопровождается не только ростом амплитуды выбросов нейтронной мощности, но и медленным ростом СКЗ НШ.

Любые изменения нейтронной мощности изменяют теплогидравлические характеристики ТН и, в частности, изменяется объем паровой фазы, даже если она получена в результате так называемого «недогретого кипения»<sup>1</sup> ТН.

### **«БЫСТРЫЕ» ШУМОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА РУ С ВВЭР-1200**

Схлопывание паровой фазы в результате уменьшения мощности РУ приводит к высвобождению положительной реактивности. Таким образом, в процессе проведения маневренного режима изменяется объем паровой фазы ТН, внося положительную или отрицательную реактивность.

Увеличение объема паровой фазы ТН делает энергетический спектр нейтронов (не путать с частотным спектром НШ) более жестким, т.е. сдвигается в сторону высоких энергий или в сторону «быстрых» нейтронов. Свойства двухфазного теплоносителя как замедлителя нейтронов ухудшаются по сравнению с однофазным водяным ТН, т.е. изменяется соотношение между «быстрыми» и «медленными» нейтронами в пользу первых. На малой мощности РУ энергетический спектр нейтронов становится более «мягким», происходит своего рода спектральное регулирование активной зоны из-за изменения уран-водного отношения в сопровождении нового источника реактивности в виде КК, т.е. с суточной периодичностью меняется нуклидный состав делящихся изотопов активной зоны на разных уровнях мощности. В конечном итоге для поддержания нулевой реактивности на мощности может дополнительно расходоваться запас реактивности, что укорачивает топливную кампанию. Такие эффекты контролируются с помощью высокочастотных нейтронно-шумовых измерений.

Шумовой анализ раньше проводился только для стационарных временных рядов, что соответствует стационарному состоянию реакторной установки. Маневренный режим, очевидно, вызовет нестационарность нейтронного поля. Его можно анализировать совместно как во временной, так и в частотной области, принимая во внимание тип нестационарности. Один из способов спектрального анализа нестационарных временных рядов состоит в предположении о «медленном» характере нестационарности.

Тогда всю исследуемую временную реализацию секционируют на смежные временные участки, на каждом из которых производятся спектральные оценки в предположении, что на каждом таком участке временной ряд практически стационарен. Затем все одноименные оценки спектральной характеристики, полученные на разных временных участках, представляют в трехмерном виде, добавляя ось времени и получая так называемый водопад спектров. На рисунке 3 изображены водопады ДПЗ для двух сборок каналов нейтронных измерений (КНИ).

Рассмотрим, что нового привносит нейтронно-шумовой спектральный анализ маневренного режима.

---

<sup>1</sup> 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.



Длина одного участка временного ряда должна быть достаточной, чтобы достоверно оценивать спектральную характеристику. Как показывает опыт [19, 20], для диапазона частот нейтронного шума от 1 Гц и выше минимально достаточной длиной является длина в 10 минут при частоте дискретизации 100 Гц.

Если учесть, что регистрация маневренного режима производится в многочасовом режиме, то получаем достаточно большое количество спектральных оценок для водопада спектров. В частности, в рассматриваемом маневренном режиме длиной 510 минут будем иметь водопад спектров из 51-ой спектральной характеристики.

Существуют две резонансных особенности нейтронного шума ВВЭР-1200, одна из них – это наличие первой корпусной акустической стоячей волны ( $АСВ_{1К}$ ) [19, 20] на частоте 8,7 Гц в номинальных условиях (см. рис. 3), воздействующая на все сигналы ДПЗ и на все сигналы ИК. Вторая резонансная особенность – локальный вибрационный резонанс на частоте 6,1 Гц, регистрируемый в сигналах нижних ДПЗ1 и ДПЗ2 (см. рис. 3), т.е. резонансы имеют разные физическую природу происхождения, пространственное распределение и реакцию на изменение мощности РУ. В течение одного шага ОР СУЗ длиной одна секунда на эти два резонанса воздействуют так называемые финитные (конечной длительности) резонансы внешней силы: одна в восемь периодов, другая – шесть периодов.

На рисунке 3 изображены водопады спектров сигналов двух каналов нейтронных измерительных (КНИ) диаметрально удаленных друг от друга по активной зоне с координатами 02–23 и 14–37. Рассмотрим подробнее, как маневренный режим влияет на эти две спектральные особенности нейтронного шума.

Из рисунка 3 следует, что один шаг ОР СУЗ (10-ой, 11-ой или 12-ой группы ОР СУЗ) длиной в точности одна секунда внутри себя содержит «гребенку» целочисленных гармоник 1, 2, 3 Гц и так далее, вплоть до 10 Гц. Эти гармоники низкодобротные, как низкодобротна и сама  $АСВ_{1К}$  на частоте 8,7 Гц. Вибрационный резонанс на частоте 6,1 Гц, хотя и имеет высокую добротность, тем не менее, также покрывается низкодобротной гармоникой 6,0 Гц, т.е. «гребенка» покрывает и частоту  $АСВ_{1К}$ , и вибрационный резонанс. Возможно резонансное возбуждение.

При быстром переходе из стационарного состояния 95% к 55% мощности РУ последовательным движением вниз трех групп ОР СУЗ вся активная зона подвергается мощным воздействиям в виде множества эквидистантных (удаленных друг от друга на одно и то же расстояние с шагом 1 Гц) гармоник. При этом центральная частота  $АСВ_{1К}$  на мощности 55% увеличивается, так как уменьшается средняя температура ТН в активной зоне. На протяжении всего ночного периода удержания мощности на уровне 55% 12-я группа ОР СУЗ находится в погруженном состоянии на отметке 50%, а 11-ая группа – не выше 62%. Такое глубокое погружение ОР СУЗ в активную зону разрушает точечный глобальный компонент нейтронного шума в верхней половине активной зоны и приводит к нулевым когерентностям сигналов «ИК-ИК» от 2 Гц до частоты  $АСВ_{1К}$  (см. рис. 3). При движении ОР СУЗ групп 10 и 11 вверх на мощности 55% для подавления КК амплитуда «гребенки» значительно уменьшилась как результат противодействия двух реактивных эффектов.

Модуляции нейтронного поля активной зоны со стороны  $АСВ_{1К}$  носят барометрический характер из-за изменения реактивности при изменении давления в ГЦК и проявляются более всего там, где нет противодействия со стороны поглощающих стержней ОР СУЗ, т.е. в нижней половине активной зоны, что видно по сигналам ДПЗ в горизонте третьего ДПЗ3 и ниже (см. рис. 3). В горизонтах верхних ДПЗ (выше ДПЗ3) эффект  $АСВ_{1К}$  отсутствует при погруженных в активную зону ОР СУЗ на уровень 50% (половина активной зоны). В верхней половине активной зоны ОР СУЗ поглощают все нейтронные эффекты выше 3 Гц. Ионизационная камера «интегрирует» большие объе-

мы активной зоны, поэтому в когерентностях сигналов «ИК-ИК» АСВ<sub>1К</sub> по-прежнему остается глобальным эффектом, но с меньшей амплитудой. Частота вибрационного резонанса 6,1 Гц не зависит от уровня мощности РУ (в отличие от частоты АСВ<sub>1К</sub>), а его амплитуда несколько увеличилась в переходном процессе 55–95% (см. рис. 3) в силу того, что вибрационный резонанс локализован в нижней части активной зоны, где воздействие ОР СУЗ много меньше, чем в верхней половине активной зоны.

Автоспектральные плотности мощности (АСПМ) одноименных сигналов ДПЗ двух удаленных КНИ (см. рис. 3) практически повторяют друг друга. В горизонте ДПЗ7

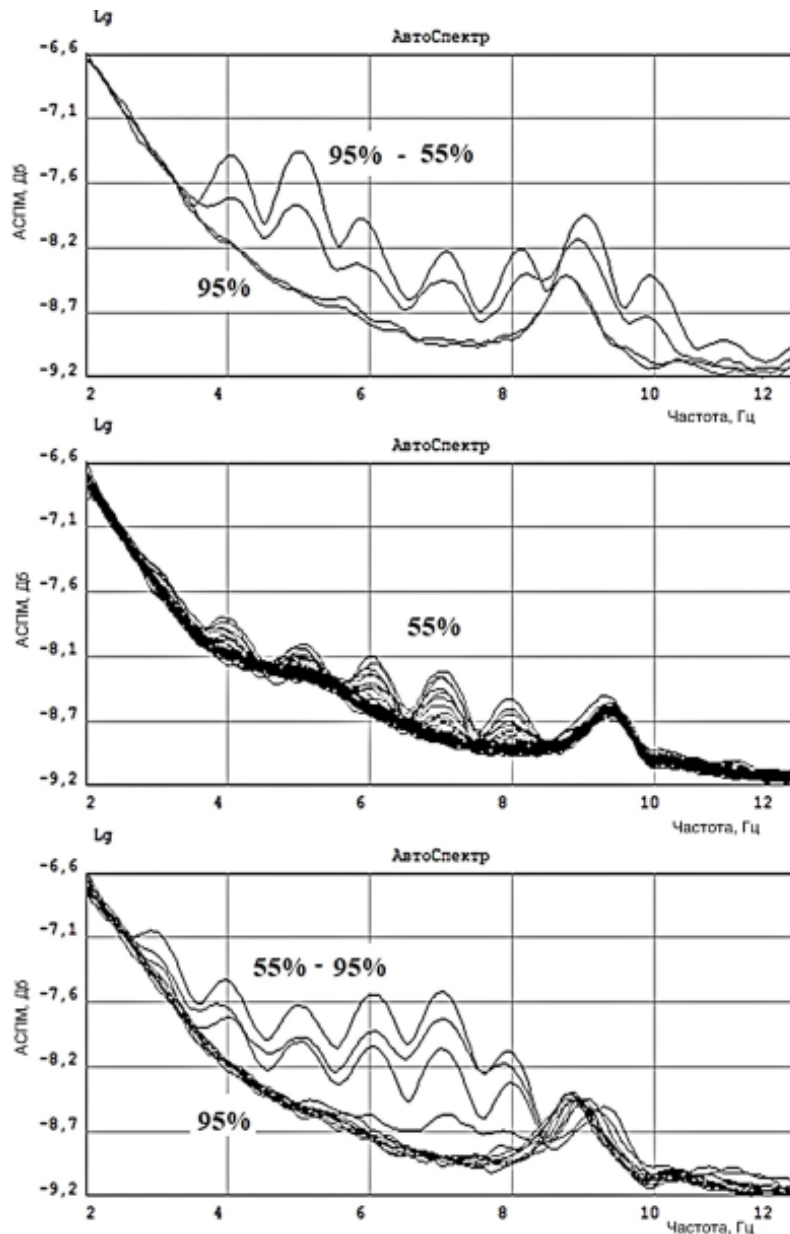


Рис. 4. Фрагменты нейтронной мощности по сигналам ИК при начале снижения мощности за счет перемещения ОР СУЗ вниз в переходном процессе 95–55% (верхний график), стационарное состояние (средний график) и при начале увеличения мощности в переходном процессе 55–95% за счет перемещения вверх 12-ой группы (нижний график)

«гребенка» принимает максимальные амплитуды в отличие от горизонта ДПЗЗ, а для нижних горизонтов ДПЗ1, ДПЗ2 возмущение от движения ОР СУЗ – минимально. На мощности 55%, когда в верхней половине активной зоны находятся ОР СУЗ, в горизонте ДПЗ7 мощность НШ ничтожно мала. АСВ<sub>1к</sub> проявляется только на мощности 95% и в горизонте ДПЗЗ и ниже.

Чтобы соотнести амплитуды АСПМ сигнала ИК1 в различных состояниях маневренного режима, на рис. 4 в традиционном виде представлены все оценки АСПМ (51 функция), собранные в три группы. Все три семейства представлены в одном и том же динамическом диапазоне (ось Y). В первой АСПМ на мощности 95% и в переходном процессе 95–55% (всего четыре функции), во второй – только на мощности 55%, в третьей – в переходном процессе 55–95% и на мощности 95%. В первой группе видно, какое значительное возмущение вносит перемещение ОР СУЗ (масштаб представления АСПМ – логарифмический) и что оно носит периодический характер по частоте, чего во временной области обнаружить затруднительно. «Гребенка» начинается от 4 Гц и с шагом 1 Гц простирается до 11 Гц. Кроме того видно, как увеличилась амплитуда и частота АСВ<sub>1к</sub>. Во второй группе – относительно стабильная и с много меньшей амплитудой «гребенка» АСПМ из-за перемещения двух групп ОР СУЗ вверх при подавлении КК.

В третьей группе – вновь увеличение амплитуды АСПМ при движении 12-ой группы ОР СУЗ вверх. Теперь «гребенка» начинается с 3 Гц и, захватывая АСВ<sub>1к</sub>, уменьшает ее частоту. Изменения частоты и амплитуды АСВ<sub>1к</sub> наблюдаются только при движении ОР СУЗ, т.е. непрерывного тренда этих параметров, который должен сопровождать резонансное возбуждение, не наблюдается.

### **ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ**

Помимо АСПМ сигналов ДПЗ (см. рис. 3), функции когерентности сигналов «ДПЗ-ДПЗ» также позволяют устанавливать пространственные зависимости нейтронно-шумовых эффектов активной зоны. Рядом установленные ДПЗ одного КНИ или ДПЗ из двух соседних КНИ1 и КНИ2 выявляют помимо прочих локальные НШ-эффекты. Диаметрально разнесенные по активной зоне ДПЗ разных КНИ выявляют глобальные НШ-эффекты.

Функции когерентности сигналов рядом расположенных нижних ДПЗ одного КНИ ДПЗ21-ДПЗ22 (рис. 5) практически не реагируют на изменение мощности РУ, т.е. отсутствует «гребенка» резонансов с шагом 1 Гц. В них доминируют корреляции по глобальному (точечному) нейтронно-шумовому компоненту до 3 Гц и вибрационный резонанс 6,1 Гц. В начале переходного процесса 55–95%, когда 12-ая группа ОР СУЗ начинает перемещаться вверх, всего в одной функции когерентности возникает увеличение амплитуды вибрационного резонанса 6,1 Гц. Это резонансное воздействие ОР СУЗ на вибрации ТВС, которое не имеет продолжения.

Функции когерентности также рядом расположенных сигналов, но верхних ДПЗ одного КНИ ДПЗ26-ДПЗ27 (см. рис. 3), демонстрируют сильную зависимость от перемещений всех трех регулирующих групп ОР СУЗ и вниз, и вверх. В тех горизонтах активной зоны, где перемещаются поглощающие стержни ОР СУЗ (в переходных режимах (95–55% и 55–95%), наблюдается частотная «гребенка». На уровне мощности 55%, когда в верхней половине активной зоны находятся ОР СУЗ, доминируют только корреляции по глобальному (точечному) нейтронно-шумовому компоненту до 3 Гц. И только после завершения переходного процесса 55–95%, когда извлечены ОР СУЗ, появляется резонанс АСВ<sub>1к</sub>.

Функции когерентности сигналов удаленных нижних ДПЗ11-ДПЗ21 (см. рис. 5) чувствительны только к глобальным нейтронным эффектам. С другой стороны, они

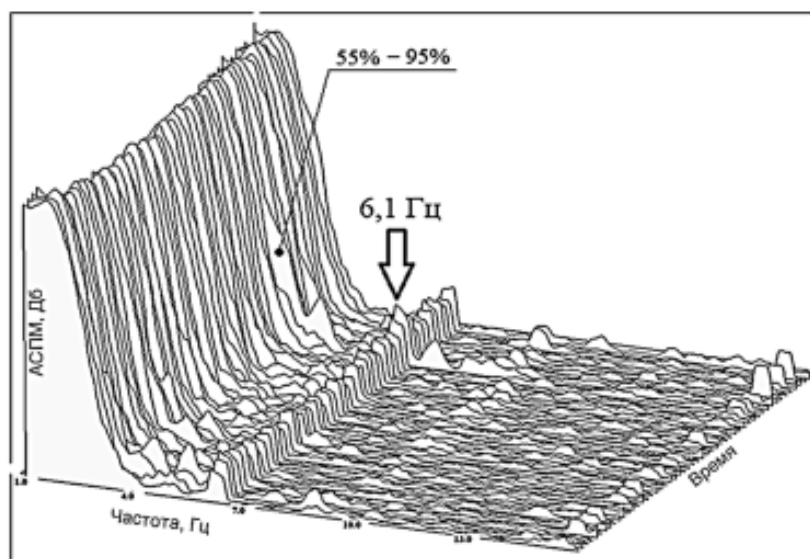


Рис. 5. Функции когерентности сигналов нижних ДПЗ одного КНИ ДП321-ДП322

аналогичны функциям когерентности сигналов соседних ДП321-ДП322 одного КНИ2, которые чувствительны и к глобальным, и к локальным нейтронным эффектам. Тогда вибрационный резонанс на частоте 6,1 Гц следует объявить глобальным явлением с одной оговоркой о том, что это явление распространяется только в горизонтах нижних ДП31 и ДП32. Выше горизонта ДП32 вибрации на частоте 6,1 Гц не наблюдаются.

Ночной режим реактора на мощности 55% реализован при глубоком погружении в активную зону сразу трех регулирующих групп ОР СУЗ с высокой эффективностью, тем самым значительно изменив пространственное распределение нейтронно-шумовых источников. По сведениям авторов, подобные экспериментальные исследования влияния ОР СУЗ на нейтронно-шумовое поле активной зоны не проводилось ранее нигде.

На мощности 55% верхняя половина активной зоны, в которой на высоте 50% всегда находится ОР СУЗ 12-ой группы, не имеет локальных эффектов и подчиняется точечной глобальной кинетике до 3 Гц. Поглощающие стержни ОР СУЗ не допускают никакие высокочастотные нейтронно-шумовые процессы выше 3 Гц. Также в верхней половине активной зоны отсутствует барометрический нейтронный эффект от воздействия стоячей волны АСВ<sub>1К</sub>. При погруженных и неподвижных ОР СУЗ эффект от АСВ<sub>1К</sub> проявляется в нижней половине активной зоны (рис. 6). В верхней половине активной зоны АСВ<sub>1К</sub> вновь восстанавливается на уровне мощности 95%, когда все ОР СУЗ извлечены.

## ВЫВОДЫ

1. После одного шага ОР СУЗ вся активная зона глобально подвергается практически мгновенному значительному по амплитуде воздействию, которое затухает в течение одной секунды, если за это время не произошел следующий шаг ОР СУЗ. Контролировать такие быстрые нейтронные процессы можно только нейтронно-шумовыми измерениями с верхней частотой не менее 20 Гц.

2. Любые изменения нейтронной мощности меняют теплогидравлические характеристики ТН, в частности, объем паровой фазы в активной зоне. Свойства двухфазного теплоносителя как замедлителя нейтронов ухудшаются по сравнению с однофазным водяным ТН, т.е. изменяется соотношение между «быстрыми» и «медленными»

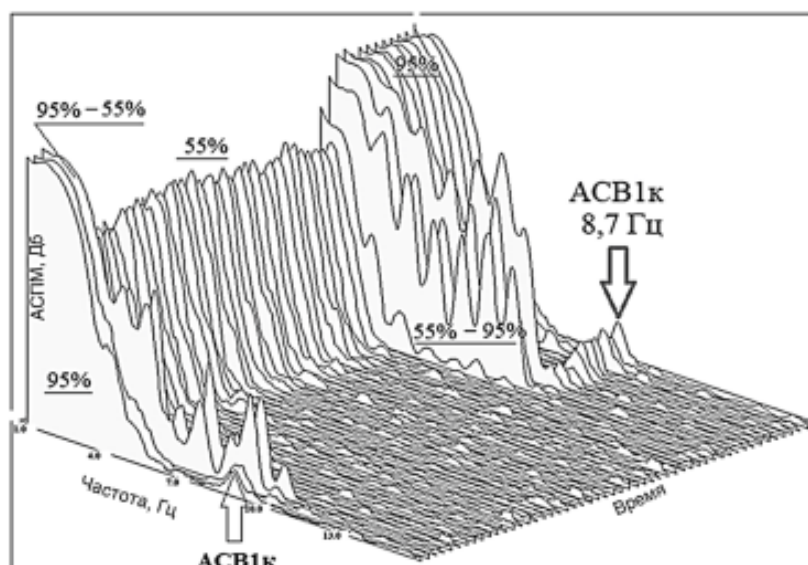


Рис. 6. Функции когерентности сигналов верхних ДПЗ одного КНИ ДП326-ДП327

ми» нейтронами в пользу первых. На малой мощности РУ энергетический спектр нейтронов становится более «мягким», происходит своего рода спектральное регулирование активной зоны из-за изменения уран-водного отношения в сопровождении нового источника реактивности в виде КК. С суточной периодичностью меняется нуклидный состав делящихся изотопов активной зоны на разных уровнях мощности. В конечном итоге, для поддержания нулевой реактивности на мощности может дополнительно расходоваться запас реактивности, что укорачивает топливную кампанию.

3. Выбросы сигнала нейтронного детектора от движения ОР СУЗ представляют собой высокочастотные повторяющиеся формы нейтронной мощности, которые в частотном виде являются «гребенкой» с постоянным шагом в 1 Гц. Один шаг ОР СУЗ длиной в точности одна секунда внутри себя содержит «гребенку» целочисленных гармоник 1, 2, 3 Гц и так далее, вплоть до 10 Гц. При частом и периодическом перемещении ОР СУЗ возможно резонансное возбуждение по характерным особенностям нейтронного шума (корпусная стоячая волна на частоте 8,7 Гц и локальный вибрационный резонанс на частоте 6,1 Гц). Опасность состоит в нештатном режиме функционирования автоматики, когда она переходит в неустойчивый автоколебательный режим. Управление в различных динамических переходных режимах необходимо тщательно промоделировать с тем, чтобы не допустить периодических и частых воздействий. При реализации маневренного режима необходимы ограничения по частоте (периодичности) введения реактивности от перемещения ОР СУЗ.

4. Глубокое погружение ОР СУЗ в активную зону на пониженной мощности в 55% поглощает в верхней половине активной зоны все нейтронно-шумовые эффекты выше 2 Гц.

### Литература

1. Игнатенко Е.И., Пыткин Ю.Н. Маневренность реакторов типа ВВЭР. / Библиотека эксплуатационника АЭС. Вып. 6 – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
2. Аверьянова С.П., Лукин Г.Л., Проселков В.Н., Филимонов П.Е., Горохов А.К., Богатырь С.М., Медведев А.В., Поваров В.П. Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР-1000 с помощью офсет-мощностной диаграммы. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93 – № 1. – С. 13-18.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3594> (дата обращения 04.08.2023).

3. Терешонок В.А., Степанов В.С., Поваров В.П., Лебедев О.В., Макеев В.В. Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000. // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 11-15.

Электронный ресурс: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_18806680\\_94837472.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_18806680_94837472.pdf) (дата обращения 04.08.2023).

4. Аверьянова С.П., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е., Горохов А.К., Молчанов В.Л., Коренной А.А., Макеев В.П. Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – № 6. – С. 414-421.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3265> (дата обращения 04.08.2023).

5. 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. – Т. 103. – № 5. – С. 277-282.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2250> (дата обращения 04.08.2023).

6. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». // Атомная энергия – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 237-240.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2639> (дата обращения 04.08.2023).

7. Аверьянова С.П., Филимонов П.Е. Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – № 6. – С. 348-351.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1630> (дата обращения 04.08.2023).

8. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 4. – С. 198-202. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1514> (дата обращения 04.08.2023).

9. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 247-252.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401> (дата обращения 04.08.2023).

10. 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. – Т. 114. – № 5. – С. 249-253.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124> (дата обращения 04.08.2023).

11. Глушенков Р.С. Исследование ключевых аспектов внедрения режима суточного регулирования мощности на АЭС Украины. // Технологический аудит и резервы производства – 2015. – Т. 2. – № 1(22). – С.18-26; DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41404

12. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А., Филимонов П.Е., Кузнецов В.И., Лаговский В.Б. Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 123-127. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/437> (дата обращения 04.08.2023).

13. Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г., Абраамян Ш.А. Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов. // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3 (28). – С. 49-63.

Электронный ресурс: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2018.3.pdf> (дата обращения 04.08.2023).

14. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А., Филимонов П.Е., Поваров В.П. Исследование ксеноновых переходных процессов на Нововоронежской АЭС. // Атомная энергия. – 2018. –

Т. 124. – № 4. – С. 183-187.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2156> (дата обращения 04.08.2023).

15. *Филимонов П.Е., Семченков Ю.М., Малышев В.В., Долгополов Н.Ю., Поваров В.П., Гусев И.Н.* Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – № 3. – С. 123-129. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3539> (дата обращения 04.08.2023).

16. *Поваров В.П., Украинцев В.Ф., Голубев Е.И., Жук М.М.* Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200. – Нововоронеж: 000 РПП «Девятое облако», 2021. – 264 с. ISBN 978-5-6046275-0-1.

17. *Филимонов П.Е., Дубов А.А., Семченков Ю.М., Бондарь А.М., Воробьев Д.Ф.* Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР-1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131 – № 5. – С. 243-249.

Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4807> (дата обращения 04.08.2023).

18. *Долгополов Н.Ю. Мезенцев П.П.* Результаты испытаний маневренных режимов на энергоблоках АЭС-2006 / Сборник тезисов VI Международной научно-технической конференции «Ввод АЭС в эксплуатацию». – М.: Атомтехэнерго. – С.11-12.

19. *Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т.* Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. / Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций. – М.: Наука, 2018. – 469 с. ISBN 978-5-02-040138-9.

20. *Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т.* Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. / Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций – М.: Наука, 2021 – 222 с. ISBN 978-5-02-040869-2.

Поступила в редакцию 14.08.2023

#### Авторы

Аркадов Геннадий Викторович, научный руководитель, к.т.н.,

E-mail: [arkgen47@mail.ru](mailto:arkgen47@mail.ru)

Павелко Владимир Ильич, к.т.н.

Слепов Михаил Тимофеевич, начальник отдела технической диагностики, к.т.н.,

E-mail: [slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

UDC 621.039.4

## An Analysis of the «Fast» Noise Measurements of the Dynamic VVER processes

Arkadov G.V. \*, Pavelko V.I. \*\*, Slepov M.T. \*\*\*

\*Non-profit partnership for promoting the development of system engineering «Rise» 5/12 bld. 3 Zeleniy pr., 111141 Moscow, Russia

\*\*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, 396072 Novovoronezh, Voronezh reg., Russia

#### ABSTRACT

Studies of maneuverable modes of VVER to confirm the possibility of participation of nuclear power plants in the mode of daily carrying capacity have been conducted for quite a long time. Tests at various nuclear power plants with VVER-1000 (Zaporizhia NPP

in 1998, Khmel'nitsky NPP in 2005, Tien Wan NPP in 2007) have shown the practical possibility of NPP participation in the daily schedule of carrying capacity, however, the commissioning of nuclear power plants with VVER-1200 requires similar work on all new units with VVER-1200: NVAES-2, LNPP-2 Belarusian NPP. The article presents some aspects of the use of noise control methods for analyzing the condition of equipment and the core.

Since the emergence of the technology of noise analysis of signals from VVER reactor installations, researchers have formulated several criteria for obtaining results of appropriate quality. The fundamental requirement for conducting noise experiments was the registration of data in stationary modes of operation of power units, since any non-stationarity made significant changes in spectral estimates, which ultimately complicated the work and «distorted» the results obtained. This requirement was included in the operating instructions of various diagnostic systems using noise signal analysis methods (the SbS system, manufactured by Siemens). For a long period of time, the current situation suited both developers of various diagnostic systems and NPP personnel operating them at power units. On the one hand, this was due to the imperfection of the technical means used (low speed of analog-to-digital converters, limited storage capacity, bulky equipment, etc.), on the other hand, the use of domestic NPP power units only in the base load mode without tracking daily power fluctuations in the power system.

The standard archives of the upper block level system, the in-reactor control system and additionally produced multi-channel «fast» measurements with a frequency of 1 kHz for the analysis of maneuverable mode 95–55–95% of the VVER-1200 reactor plant were analyzed. Global disturbances of the core have been detected after one step of the regulatory body of the control and protection system, which attenuates within one second if the next step of the control and protection system has not occurred during this time. Such fast neutron processes can be controlled only by neutron-noise measurements with an upper frequency of at least 20 Hz.

**Keywords:** VVER-1200, xenon oscillations, offset, boron regulation, steam phase, neutron noise, spectrum, acoustic standing waves.

**For citation:** Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. An Analysis of the «Fast» Noise Measurements of the Dynamic VVER processes. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 4, pp. 19-36; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02> (in Russian).

#### REFERENCES

1. Ignatenko E.I., Pytkin Yu.N. *Maneuverability of VVER type reactors. Library of the operator of the NPP; issue 6*. M.: Energoatomizdat, 1985, 88 p. (in Russian).
2. Aver'yanova S.P., Lunin G.L., Proselkov V.N., Filimonov P.E., Gorokhov A.K., Bogatyr'S.M., Medvedev A.V., Povarov V.P. Using the Offset – Power Diagram to Monitor the Local Linear Power Density of Fuel Elements in a VVER-1000 Core. *Atomic Energy*. 2002, v.93, pp. 547-553. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020832414569> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020832414569>
3. Tereshonok V.A., Stepanov V.S., Povarov V.P., Lebedev O.V., Makeev V.V. Prevention and suppression of axial xenon oscillations in the VVER-1000 core. *Thermal engineering*. 2003, no. 5, pp. 11-15. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_18806680\\_94837472.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_18806680_94837472.pdf) (accessed Aug. 04, 2023) (in Russian).
4. Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E., Gorokhov A.K., Molchanov V.L., Korennoy A.A., Makeev V.P. Adoption of Improved Algorithms for Controlling the Energy Release of a VVER-1000 Core at the Khmel'nitskii Nuclear Power Plant. *Atomic Energy*. 2005, vol. 98, no. 6, pp. 386-393. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-005-0222-6> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0222-6>



5. Aver'yanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E., Liu Haitao, Li Iou. Testing of improved algorithms controlling energy release in VVER-1000 in maneuvering regimes at the Tianwan nuclear power plant (China). *Atomic Energy*. 2007, vol. 103, pp. 836-844. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-007-0133-9> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-007-0133-9>
6. Aver'yanova S.P., Kovel A.I., Mamichev V.V., Filimonov P.E. Development, introduction, and current state of the computational program «reactor simulator». *Atomic energy*. 2008, vol. 105, pp. 303-307. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-009-9100-y> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9100-y>
7. Aver'yanova S.P., Filimonov P.E. Xenon stability of VVER-1200. *Atomic Energy*. 2009, vol. 107, pp. 424-428. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-010-9246-7> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9246-7>
8. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperature regulation and maneuverability of VVER-1000. *Atomic energy*. 2010, vol. 109, pp. 246-251. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-011-9352-1> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9352-1>
9. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. VVER-1200/1300 operation in a daily load schedule. *Atomic energy*. 2012, vol. 113, pp. 305-313. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-013-9637-7> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9637-7>
10. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., P.E. Filimonov Development of Methods for VVER-1200/1300 Control in a Daily Load Schedule. *Atomic energy*. 2013, vol. 114, pp. 308-314. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-013-9716-9> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9716-9>
11. Glushenkov R.S. The study of key aspects of the introduction of the regime of daily power regulation at the NPP of Ukraine. *Technological audit and production reserves*. 2015, vol. 2, no. 1(22), pp. 18-26. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41404 (in Russian).
12. Aver'yanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Kuznetsov V.I., Lagovskii V.B. Offset-Cardinality Phase Diagram Method of Controlling Reactor Power. *Atomic Energy*. 2017, vol. 121, pp. 155-160. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-017-0176-5> (accessed Aug. 04, 2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0176-5>
13. Vygovsky S.B., Al Malkawi R.T., Khachatryan A.G., Abrahamyan S.A. Optimization of control algorithms for nuclear power plants with VVER-1200 to minimize water exchange in the 1st circuit during the implementation of daily maneuvering modes. *Global nuclear safety*. 2018, no 28, pp. 49-63 Available at: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2018.3.pdf> (accessed 04.08.2023) (in Russian).
14. Aver'yanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Povarov V.P. Investigation of Transient Xenon Processes in VVER-1200 at the Novovoronezh NPP. *Atomic Energy*. 2018, vol. 124, pp. 215-220. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-018-0400-y> (accessed 04.08.2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0400-y>
15. Filimonov P.E., Semchenkov Yu.M., Malyshev V.V., Dolgoplov N.Yu., Povarov V.P., Gusev I.N. VVER-1200 Tests in No. 6 Unit of the Novovoronezh NPP During Operation in a Daily Load Schedule. *Atomic Energy*. 2020, vol. 129, pp. 113-121. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-021-00721-y> (accessed 04.08.2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00721-y>
16. Povarov V.P., Ukraintsev V.F., Golubev E.I., Zhuk M.M. *Experimental studies of neutron-physical processes in the VVER-1200 core*. Novovoronezh, 2021, 264 p. ISBN 978-5-6046275-0-1 (in Russian).
17. Filimonov P.E., Dubov A.A., Semchenkov Yu.M., Bondar A.M., Vorobyev D.F. Testing of Nonstationary VVER-1200 Operating Regimes in Belarusian NPP No. 1. *Atomic Energy*. 2022, vol. 131, pp. 241-248. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-022-00873-5> (accessed 04.08.2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00873-5>
18. Dolgoplov N.Yu. Mezentsev P.P. Results of tests of maneuverable modes at NPP power units-2006. *Collection of abstracts of the 6th International Scientific and Technical Conference «Commissioning of NPP»*, Moscow: Atomtehergo, pp. 11-12 (in Russian).
19. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor plant. Series: Library of Technical Diagnostics of Nuclear Power Plants*. Moscow: Nauka, 2018, 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9 (in Russian).

20. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor plant. Series: Library of Technical Diagnostics of Nuclear Power Plants*. Moscow: Nauka, 2021, 222 p. ISBN 978-5-02-040869-2 (in Russian).

**Authors**

Mikhail T. Slepov, Head of the Technical Diagnostics Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Vladimir I. Pavelko, Cand. Sci. (Engineering)

Gennady V. Arkadov, Scientific Supervisor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: arkgen47@mail.ru