

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>





УДК 621.036.56

EDN MWTZVK


Оригинальная статья / Original paper



Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения

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
 tymofeecht@yandex.ru

Аннотация. В представленной статье, авторами поднимаются вопросы вибрационного мониторинга тепловыделяющих сборок (ТВС) на основе анализа нейтронных шумов при обработке токовых сигналов датчиков прямого заряда (ДПЗ). Раскрыты принципы оценки вибрационного состояния ТВС по спектральным характеристикам. Сформулированы преимущества нейтронно-шумовых методов контроля, главными из которых является пассивность, использование штатного оборудования и возможность оценки вибросостояния ТВС в процессе работы блока на мощности. Кратко описаны отличия ТВС-5 от штатных ТВС для реакторных установок (РУ) ВВЭР-1200. Впервые произведен анализ нейтронных шумов тепловыделяющих сборок пятого поколения (ТВС-5) в составе седьмой топливной кампании на блоке 1 Нововоронежской АЭС-2 в низкочастотном и высокочастотных диапазонах. В низкочастотном диапазоне отмечено полное совпадение спектральных характеристик ТВС-5 и штатных ТВС. На основе экспериментальных данных делается важный вывод, что ТВС-5 по вибрационному состоянию не выделяются относительно штатных ТВС. Одновременно отмечено отличие регистрируемых экспериментально резонансов в спектральных характеристиках ТВС от набора частот, для которых проводилось теоретическое моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния ТВС. В высокочастотном диапазоне, авторами отмечены различия между спектрами ТВС-5 и штатных ТВС. Авторами выделены частоты, которые являются общими для ТВС-5 и штатных ТВС, но есть и частоты, регистрируемые только для определенного типа ТВС. Учитывая, что оценка нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне ранее не проводилась, делать выводы преждевременно, необходимо дальнейшее продолжение работы на действующих блоках АЭС.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка пятого поколения (ТВС-5), нейтронно-шумовой контроль, спектр, когерентность, ВВЭР-1200, датчик прямого заряда, вибрационное состояние, спектральные максимумы, собственные частоты, ТВЭЛ.


Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(5):64–77. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>

For citation: Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):64–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>

Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies

Gennady V. Arkadov¹  , Mikhail T. Slepov²  

¹ «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation

² Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of the Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation
 tymofeecht@yandex.ru

Abstract. The article considers the issues of vibration monitoring of fuel assemblies based on the analysis of neutron noise during the processing of current signals from direct charge sensors. The principles of estimating the vibration state of fuel assemblies based on spectral characteristics are disclosed. The advantages of neutron noise control methods are formulated, the main of which are passivity, the use of standard equipment and the ability to assess the vibration state of the fuel assembly during operation of the unit at power. The differences between TVS-5 and standard fuel assemblies for VVER-1200 reactor installations are briefly described. For the first time, neutron noise analysis of fifth-generation fuel assemblies (TVS-5) as part of the seventh fuel campaign at unit 1 of Novovoronezh NPP-2 in the low-frequency and high-frequency ranges has been performed. In the low-frequency range, a complete coincidence of the spectral characteristics of the TVS-5 and the standard TVS was noted. Based on experimental data, an important conclusion is drawn that the fuel assemblies-5 do not stand out in terms of vibration relative to regular fuel assemblies. At the same time, a difference was noted between the experimentally recorded resonances in the fuel assembly spectral characteristics and the set of frequencies for which theoretical modelling and calculation of the stress-strain state of the fuel assembly were performed. The differences are noted between the TVS-5 and regular TVS spectra in the high-frequency range. The authors have identified frequencies that are common to TVS-5 and regular fuel assemblies, but there are also frequencies that are registered only for a certain type of fuel assemblies. Taking into account that neutron noise in the high-frequency range has not been assessed previously, it is too early to draw conclusions, and further work on existing nuclear power plant units is necessary.

Keywords: fifth generation fuel assembly (TVS-5), neutron noise control, spectrum, coherence, VVER-1200, direct charge sensor, vibration state, spectral maxima, natural frequencies, fuel elements.

Введение

Стратегия развития российской атомной отрасли направлена на создание двухкомпонентной ядерной энергетики, включающей реакторы на тепловых и быстрых нейтронах. Замыкание ядерного топливного цикла должно охватывать не только быстрые реакторы, работающие на уран-плутониевом МОКС- и СНУП-топливе [1,2], но и стандартные тепловые легководные реакторы. Начиная с 2021 г. на Балаковской АЭС проводится опытно-промышленная эксплуатация уран-плутониевого РЕМИКС-топлива [3] в реакторе ВВЭР-1000, что является важным шагом в этом направлении.

Для безопасности персонала промышленное производство уран-плутониевого топлива для ВВЭР должно быть полностью автоматизированным и безлюдным, как это реализовано при фабрикации ТВС для «быстрых» реакторов. Для этого в Росатоме разработана конструкция тепловыделяющей сборки пятого поколения для ВВЭР – ТВС-5.

Разработка новой конструкции ТВС-5 на основе ТВС-2М [4] обусловлена применением в будущем перспективного переработанного уран-плутониевого топлива. ТВС-5 сможет обеспечить минимизацию дозозатрат персонала завода-изготовителя при выполнении производственных и контрольных операций с ТВС. Также новая конструкция

ТВС должна исключать образование жидких радиоактивных отходов при изготовлении ТВС путем исключения технологических операций лакопокраски/смазки твэлов и последующей отмывки собранной ТВС от лака/смазки. С учетом вышеизложенного, основным требованием, предъявляемым к конструкции ТВС-5 (в отличие от ТВС-2М), является требование по обеспечению возможности ее дистанционной сборки на заводе-изготовителе с минимальным обособленным уровнем наносимых при сборке дефектов оболочек твэлов без применения лаков и/или смазывающих составов. Реализация данных требований в новой конструкции ТВС обеспечит возможность ее дистанционной сборки, разборки и ремонта как на заводе-изготовителе, так и на АЭС с использованием стенда инспекции и ремонта ТВС. Разрабатываемая конструкция ТВС должна обладать высокой степенью унификации в рамках технологии ВВЭР – должна обеспечивать возможность ее использования с минимальными изменениями (учитывающими особенности конструкций оборудования различных типов реакторов ВВЭР) на всех современных типах реакторных установок (РУ) ВВЭР большой мощности – ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, а также ВВЭР-1300 (ВВЭР ТОИ).

Главным отличием ТВС-5 от сборок предыдущих поколений является отсутствие креплений тепловыделяющих элементов в решетке нижнего узла ТВС для возможности обеспечения сборки высокофонового уран-плутониевого топлива на заводе-изготовителе и дистанционной замены дефектных твэлов при выполнении ремонта в условиях АЭС. Жесткий каркас, препятствующий искривлению кассеты в процессе эксплуатации образуется за счет приварки ДР к 18 направляющим каналам (НК). Вблизи нижней решетки расположена анти-вибрационная решетка, снижающая уровень вибронагрузок на элементы ТВС в зоне хвостовика.

Одним из этапов обоснования безопасной эксплуатации ТВС является оценка ее вибропрочности. С целью обоснования вибропрочности ТВС-5 необходимо провести расчеты ее динамических параметров, а также напряженно-деформированного состояния (НДС) ее конструктивных элементов при вынужденных колебаниях – вибрации, вызываемой за счет пульсации давления теплоносителя, колебаний опорных конструкций, работой насосного оборудования. Для достоверной оценки вибрационных нагрузок на ТВС необходимо определить амплитуду и частоту вибрации. Коварство вибрационных процессов проявляется в том, что при относительно малых амплитудах колебаний данным процессом при расчете ресурса оборудования можно пренебречь, но в случае совпадения одной или нескольких частот (резонансные явления) указанное воздействие может иметь основополагающую роль. Конечно, любое резонансное явление считается недопустимым, и на уровне проектирования стремятся полностью исключить возможного совпадения частот различных колебательных процессов, однако не всегда удается этого избежать. К сожалению, вопросам вибрационного мониторинга ТВС во время эксплуатации уделяется крайне незначительное внимание, т.к. ошибочно предполагается отсутствие методов и методик, позволяющих проводить контроль во время работы энергоблоков.

Авторы в своих работах [5–10] убедительно доказывают, что анализ нейтронного

шума датчиков прямого заряда (ДПЗ) позволяет с достаточной степенью точностью установить частотный состав вибрации ТВС различного типа. При получении дополнительных данных от разработчика реакторной установки ВВЭР-1200 АО ОКБ «Гидропресс», возможна оценка амплитуд колебаний ТВС по нейтронным шумам.

Исходя из сказанного выше становится понятным, почему оценка вибрационных нагрузок на ТВС в активной зоне ВВЭР-1200 производится на основе данных, характерных для реакторов ВВЭР-1000¹. В отчете¹ постулируется, что в спектре вибрационных нагрузок присутствуют возбуждающие воздействия с частотами 5,0; 10,0; 16,5 и 33,0 Гц, при этом амплитуда виброускорений элементов активных зон не превышает 0,5 м/с². Для указанных значений частот вибрационных нагрузок проводится анализ НДС элементов ТВС-5: оболочках твэлов, ДР, нижней решетки. Задача оценки вибропрочности элементов ТВС проводится в несколько этапов: расчет спектра собственных частот и форм колебаний ТВС в целом, проверка условий отстройки полученных частот от вызывающих вибрации нагрузок для исключения резонансных явлений, моделирование динамики ТВС методом модальной суперпозиции в условиях вибронагружения, расчет компонентов НДС с учетом полученных амплитуд колебаний.

Несмотря на безусловную фундаментальность и безупречность исполнения научно-исследовательской работы, отраженной в отчете Нововоронежской АЭС¹ (далее – НВАЭС), авторы считают своим долгом напомнить, что никакой расчетный метод или программный код не может учесть все особенности конструкции каждого конкретного энергоблока и специфику различных процессов, делающих уникальной каждую РУ, а только прямые измерения позволяют

¹ Отчет о научно-исследовательской работе. Разработка и обоснование безопасности применения ядерного топлива для реакторных установок АЭС-2006: обоснование безопасности проведения реакторных испытаний опытной партии ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 в 7-9 топливных загрузках. – Москва, НИЦ Курчатовский институт, 2024. – 97 с. – Режим доступа: по запросу.

определить все тонкости работы конструкций и устройств. В представленной статье впервые приводятся экспериментальные данные по частотному составу вибрации двух ТВС-5, эксплуатирующихся на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 в составе 7-топливной компании.

Краткие сведения об испытаниях ТВС-5 на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2

В рамках Программы первоочередных работ на 2020–2021 гг. по переходу на «Сбалансированный ЯТЦ», утвержденной Первым заместителем гендиректора по операционному управлению Госкорпорации «Росатом» А.М. Локшиным, АО ОКБ «Гидропресс» в сотрудничестве с ПАО «НЗХК» провели комплекс расчетно-экспериментальных НИОКР. В результате этих исследований была разработана конструкция ТВС-5, для которой экспериментально подтверждена возможность дистанционной сборки пучка ТВЭЛов.

На следующем этапе планировалось провести испытания конструкции ТВС-5 в действующем реакторе. Согласно п. 2 «Решения №В545-ТП-007-О об организации работ по изготовлению и реакторным испытаниям опытной партии из трех ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 начиная с шестой топливной загрузки» предполагалось начать эксплуатацию сборок ТВС-5 с урановым топливом с шестой топливной загрузки. Проведенные расчеты показали, что опытная эксплуатация трех ТВС-5 в загрузках шесть-восемь незначительно влияет на проектные нейтронно-физические характеристики. Однако начало испытаний было перенесено. В связи с этим было принято новое решение об организации работ по реакторным испытаниям опытной партии из трех ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2, начиная с седьмой топливной загрузки.

Для выполнения программы испытаний в седьмую топливную загрузку в активную зону устанавливаются 72 ТВС:

- 12 ТВС типа Z49B6;
- 24 ТВС типа Z49Y7;
- 24 ТВС типа Z44Y7;

- 9 ТВС типа Z49Y9.
- 3 ТВС типа Y49Y9 (ТВС-5).

Среднее обогащение топлива подпитки составляет 4,69 % вес.

Расположение ТВС-5 в активной зоне седьмой топливной загрузки представлено на рисунке 1 (ТВС-5 выделены красным цветом), а краткие сведения сведены в таблице 1. Из представленных данных следует, что под постоянным контролем находятся только 2 сборки (07-18 и 03-36) из 3 возможных. Сборка установленное в ячейку №13 (координаты 14-33) не оснащена измерительными каналами ДПЗ. Поэтому дальнейший анализ вибрационного состояния ТВС-5 по нейтронно-шумовым сигналам будет произведен только для двух ТВС-5, оснащенных каналами ДПЗ. Общий вид сборки ТВС-5 представлен на рисунке 2 (взят из Отчета о научно-исследовательской работе; см. сноску 1).

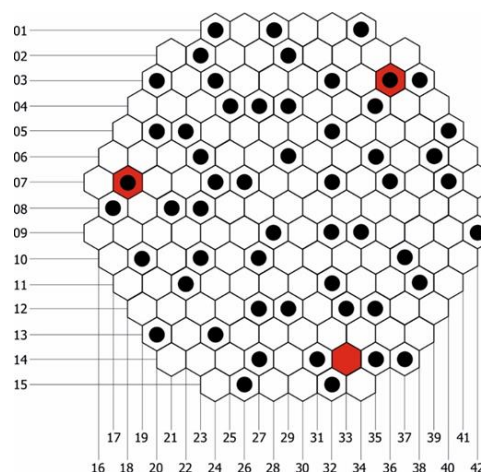


Рисунок 1. Картограмма седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2, ТВС-5 выделены красным цветом. ТВС со сборками ДПЗ отмечены черным кругом

Figure 1. Cartogram of the seventh fuel loading unit No.1 NVNPP-2, fifth generation fuel assembly are highlighted in red. Fuel assemblies with direct charge sensors assemblies are marked with a black circle

Таблица 1. Краткие сведения о ТВС-5 в составе седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2
Table 1. Brief information about TVS-5 as part of the seventh fuel load of Unit No. 1 of the Novovoronezh Nuclear Power Plant-2

№ п/п	Координаты	Ячейка	Заводской номер	Оснащение ДПЗ
1	07-18	90	4929 20401	+
2	14-33	13	4929 20402	-
3	03-36	147	4929 20403	+

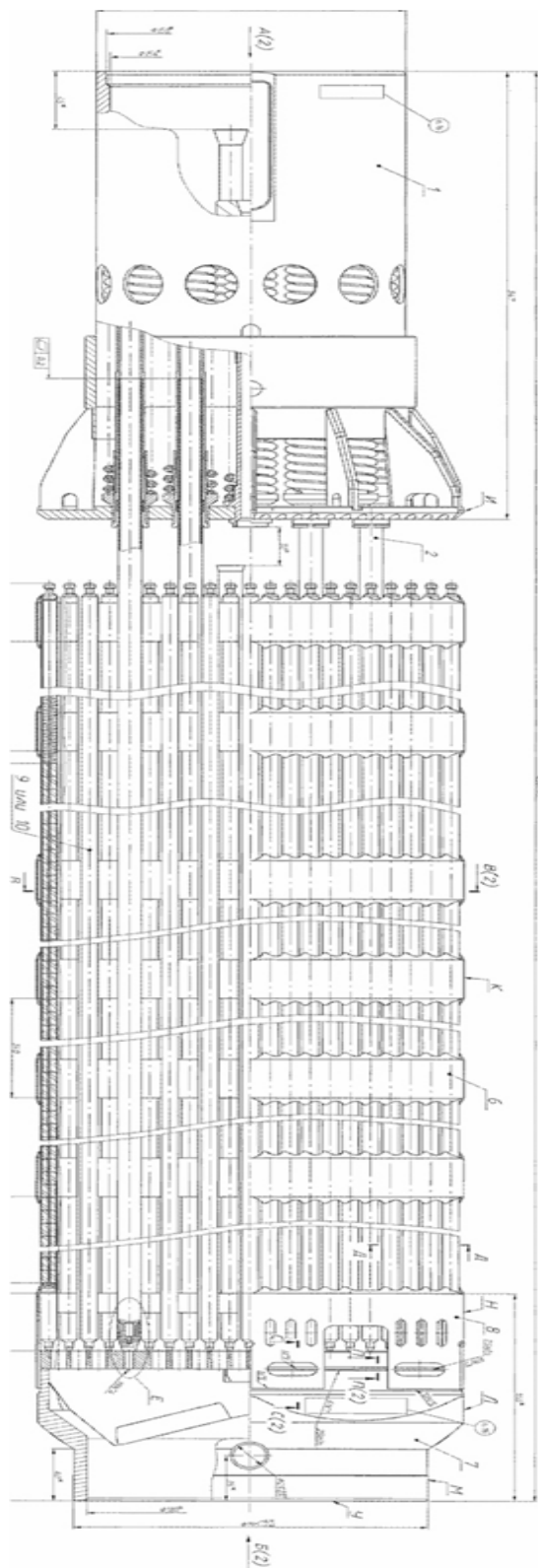


Рисунок 2. Общий вид ТВС пятого поколения (TBC-5)^{см.сн.1}

Figure 2. General view of the fifth-generation fuel assemblies (TVS-5)^{Note 1}

Для регистрации нейтронно-шумовых сигналов, а также сигналов виброускорения реализовано стандартное для НВАЭС реше-

ние, представляющее собой интеграцию измерительных каналов различного типа стационарных систем диагностики в единый измерительный кластер с использованием мобильных сборщиков данных прецизионного класса. Указанная возможность интеграции была впервые опробована при пуске энергоблока №1 НВАЭС-2 (подробнее см. в работе авторов [11]) и широко используется в настоящее время в виде штатной измерительной процедуры [10].

В качестве источника данных для нейтронно-шумового анализа используются сигналы ДПЗ системы внутриреакторного контроля (СВРК) (подробнее источник [15]). Из конструктивных особенностей возможно подключение только двух сборок ДПЗ к измерительному кластеру, что позволяет проводить одновременный анализ только 14 нейтронно-шумовых сигналов (2 x 7), 12 акселерометров (4 на верхнем блоке реактора + 8 на петлях) и 3 ионизационных камер.

В настоящей статье будут подробно анализироваться сигналы только ДПЗ, размещенных как в ТВС-5, так и в штатных ТВС во время эксплуатации блока на мощности (сведения об используемых в экспериментах парах ТВС сведены в табл. 2). Для анализа вибрационного были подобраны соответствующие пары для каждой ТВС-5, учитывая особенности размещения в АЗ нового топлива, а также вид и год эксплуатации. К сожалению, учитывая технические ограничения (возможность использования только 14 нейтронно-шумовых каналов) и расположение ТВС-5 в седьмой топливной загрузке, выбор пар не является оптимальным. Для анализа использовались временные реализации длительностью 30 мин., частота дискретизации 1024 Гц.

Таблица 2. Краткие сведения об используемых в экспериментах парах ТВС

Table 2. Brief information about the fuel assemblies used in the experiments

№ п/п	Координаты	Вид топлива	Год работы	Координаты	Вид топлива	Год работы
1	03-36	Y49Y9	1	20-29	Z49Y9	2
2	03-36	Y49Y9	1	04-35	Z49B6	2
3	07-18	Y49Y9	1	20-29	Z49Y9	2
4	07-18	Y49Y9	1	08-21	Z49Y7	2

Низкочастотный диапазон

Долгое время, в научной среде существовало ошибочное мнение о невозможности получения достоверных данных из нейтронно-шумовых сигналов для частот свыше 50 Гц. Объяснялось данное заблуждение, с одной стороны, низкой скоростью работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), с другой, большой инертностью используемых ДПЗ и ионизационных камер (ИК), работающих на активационном принципе. В действительности при использовании соответствующих технических средств и авторской методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [10,11]) исследуемую частотную полосу можно существенно расширить вплоть до предельной частоты в 512 Гц. Однако в данной работе предлагается исследовать два диапазона: низкочастотный от 0 Гц до 50 Гц (условно) и высокочастотный от 50 Гц до 200 Гц (условно). Низкочастотный диапазон нейтронных шумов достаточно хорошо изучен и описан в специальной литературе.

Начиная с РУ ВВЭР-440 (подробнее в источнике [12]), через РУ ВВЭР-1000 ([13]), и заканчивая референтными блоками с РУ ВВЭР-1200 ([9]) проводились систематические нейтронно-шумовые измерения в низкочастотном диапазоне, накапливались базы данных, проводилась систематизация и оценка полученных материалов. Поэтому отсутствие в отчете (см. сноску 1) некоторых частот вибрации ТВС, полученных экспериментально и подробно описанных в соответствующих источниках [13,14], вызывает некоторое недоумение у авторов.

Разберем более подробно частотный состав вибрационного состояния как ТВС-5, так и штатных ТВС. На рисунке 3 представлены автоспектральные плотности мощности всех ДПЗ, задействованных в эксперименте для пар 03-36 и 02-29, 03-36 и 04-35, 07-18 и 02-29, 07-18 и 08-21, измеренных практически сразу после выхода энергоблока №1 НВАЭС-2 на номинальный уровень мощности. При сравнении спектров ТВС-5 и стандартных ТВС заметных отличий не выявлено, что позволяет сделать первый вывод о том, что вибрационное состояние

ТВС-5 как минимум соответствует вибрационному состоянию штатных ТВС. Незначительные отличия связаны со спецификой работы каждой ТВС. К сожалению, в качестве измерительных каналов задействованы сборки внутриреакторных детекторов (СВРД) второго года эксплуатации, поэтому часть ДПЗ неисправно, что заметно на представленных графиках. Для детального анализа вибрационного состояния ТВС рассмотрим более подробно в качестве примера спектральные оценки для пары 03-36 и 02-29.

На рисунке 4 представлены спектральные оценки для ТВС с координатами 03-36 (рис. 4а) и 02-29 (рис. 4б) и полный перебор функций когерентности² для всевозможных пар ДПЗ в пределах одной ТВС, (соответственно рис. 4б и рис.4г). Для адекватного воспроизведения информации убраны спектры неисправных ДПЗ. Необходимо выделить следующие частоты (интерпретация ниже):

- $f(\text{ТВС}_{1И}) = 6,1 \text{ Гц}$ – изгибная частота ТВС;
- $f(\text{АСВ}_{1К}) = 8,7 \text{ Гц}$ – частота первой корпусной акустической стоячей волны (АСВ);
- $f(\text{ТВС}_{2И}) = 12,3 \text{ Гц}$ – вторая гармоника изгибной частоты ТВС;
- $f(\text{ГЦНА}_{1обр}) = 16,6 \text{ Гц}$ – оборотная частота вращения главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА);
- $f(\text{ГЦНА}_{2обр}) = 33,2 \text{ Гц}$ – вторая гармоника оборотной частоты вращения ГЦНА.

Из приведенного перечня реально зарегистрированных в эксперименте частот, списочному составу, представленному в отчете (см. сноску 1): 5,0 Гц; 10,0 Гц; 16,5 Гц и 33,0 Гц, соответствуют только две частоты: 16,5-16,6 Гц и 33,0-33,2 Гц.

Частота 6,1 Гц (обозначение – $f(\text{ТВС}_{1И})$) впервые была зарегистрирована во время проведения нейтронно-шумовых измерений на РУ ВВЭР-1200 и только в спектрах ДПЗ позиции 1 (источники [8,9]). В спектральных оценках ДПЗ РУ с ВВЭР-1000 указанная ча-

² Расчет функции когерентности и ее значение при спектральном анализе изложены в источниках [5,10,13].

стота отсутствовала, что позволило сделать вывод об особенностях вибрационного состояния ТВС РУ с ВВЭР-1200. Следует подчеркнуть, что все измерения, где частота 6,1 Гц регистрировалась в спектрах, ДПЗ проводились по авторской методологии [10],

которая позволяет выявлять «тонкую» структуру нейтронных шумов. В случае использования штатных систем диагностики, например, системы контроля вибрации (СКВ), частота 6,1 Гц не выявляется.

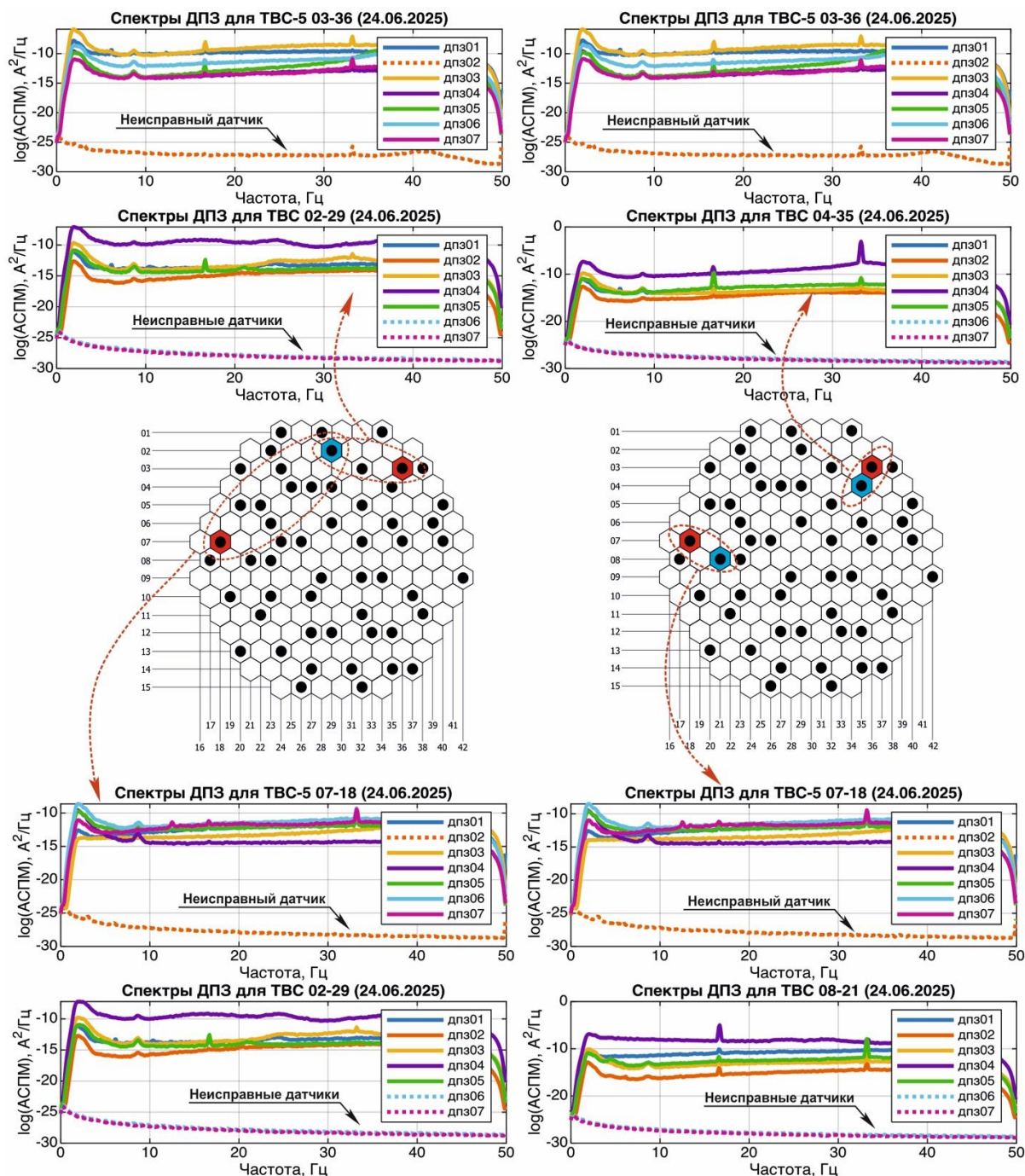


Рисунок 3. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте
Figure 3. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment

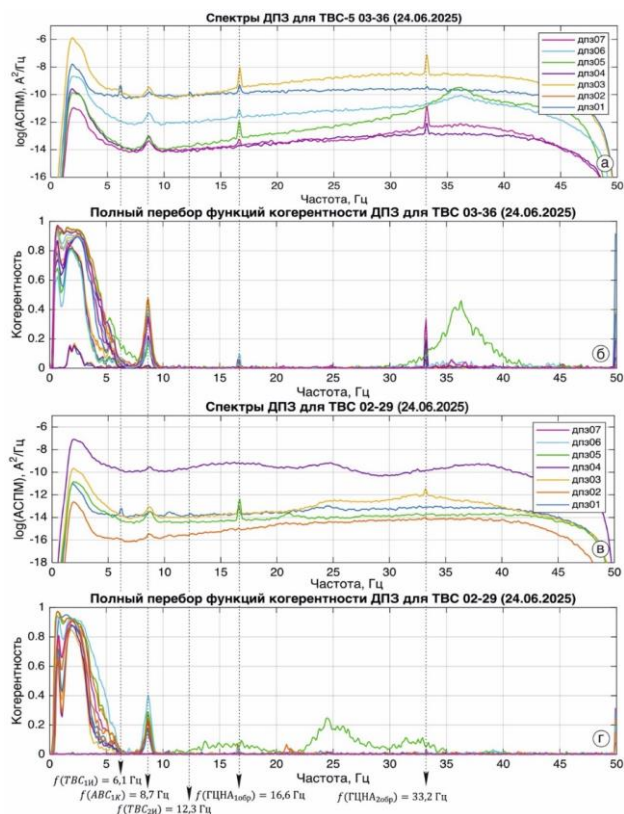


Рисунок 4. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 (а) и ТВС 02-29 (в) в диапазоне от 0 Гц до 50 Гц. Соответствующие функции когерентности для ТВС 03-36 (б) и ТВС 02-29 (д)

Figure 4. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment for fuel assembly 03-36 (a) and fuel assembly 02-29 (в) in the range from 0 Hz to 50 Hz. The corresponding coherence functions for fuel assembly 03-36 (б) and fuel assembly 02-29 (д)

Благодаря выводам, представленным в Пояснительной записке³, можно утверждать, что частота 6,1 Гц соответствует первой изгибной частоте вибрации ТВС. Более того, в работе Ю.Г. Драгунова и соавторов [16] так представлены результаты экспериментальной работы по изучению влияния степени поджатия ТВС на частоту собственных колебаний. Из полученных данных следует важный вывод о том, что ТВС совершает колебания на своей частоте только в случае регламентного поджатия, при ослаблении частота сдвигается в низкочастотную область. За все время наблюдений

за вибрационным состоянием ТВС РУ с ВВЭР-1200, авторам не удалось обнаружить сдвига частоты 6,1 Гц в низкочастотную область ни у одной контролируемой ТВС. Частота 6,1 Гц регистрируется абсолютно у всех ТВС не зависимо от года эксплуатации и места расположения в АЗ с точностью до 0,01 Гц⁴, что говорит о надежном поджатии топлива в РУ с ВВЭР-1200. Вопрос о том, почему указанный резонанс регистрируется только одним ДПЗ на позиции 1 – открытый. Авторы, пока предполагают, что на остальных уровнях фоновые значения нейтронного шума превышают слабые колебания нейтронного поля вызванные вибрацией ТВС, поэтому описываемый эффект не проявляется. Однако, на горизонтах 4 и 5 часто регистрируется частота 12,3 Гц (источник [10] – вторая гармоника $f(TBC_{1и})$).

Наличие гармонических составляющих в спектрах один из признаков чисто механической природы колебаний, что еще раз подтверждает вывод, что ТВС совершает колебания именно на этих частотах.

Частота 8,7 Гц (обозначение – $f(ACB_{1к})$) является частотой первой корпусной акустической стоячей волны. АСВ является суперпозицией прямой (падающей) волны давления и отраженной от какого-либо препятствия. Если говорить именно о $ACB_{1к}$, то максимальная пульсация давления наблюдается по оси реактора (пучность), минимальные (узлы) на крышках горячих коллекторов в парогенераторах. Полная информация о поле акустических стоячих применительно к РУ ВВЭР-1200 представлена в авторской монографии [8], а также в работах [17,18]. Однако, следует обратить внимание на следующий факт. В связи с широким распространением мобильных анализаторов сигналов и специализированного программного обеспечения возникло неправильное представление о сути спектрального преобразования и используемых единицах измерения. На рисунках 3 и 4 показаны рассчитанные спектры ДПЗ, имеющие по оси Y в качестве

³ Сборка тепловыделяющая ядерного реактора. Пояснительная записка 2006.В.132.&.0UJA&&.JKA&&.021CA.0006 392M.06.16.01 ПЗ. – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2009 – 102 с.

⁴ Обоснование точности определения частоты и ее погрешности при нейтронно-шумовых измерениях обосновано одним из авторов в работе [10] стр. 52–58.

единицы измерения «автоспектральную плотность мощности (АСПМ)», размерность, которой представляет собой исходные единицы временного сигнала (например, В, мкА, мм), деленные на частоту в квадрате, в нашем случае – $A^2/\text{Гц}$.

Частой ошибкой является попытка оценить амплитуду колебаний на определенной частоте в абсолютных единицах, исходя из спектральных данных. Это неверно, так как спектральная плотность не является амплитудой сигнала. АСПМ – это энергетическая характеристика, т.е. оценка энергии в определенном диапазоне частот, поскольку квадрат амплитуды является энергетической характеристикой процесса. Поэтому резонанс, имеющий в спектре не самую большую амплитуду, но лежащий на широком основании может быть по энергии вибрации более опасен, чем узкий пик с большой амплитудой. Именно по этой причине колебание на частоте $\text{АСВ}_{\text{ИК}}$ может быть гораздо опаснее, чем на оборотной частоте ГЦНА (обозначение – $f(\text{ГЦНА}_{10\text{бр}})$). Колебание на частоте 8,7 Гц имеет глобальный характер и регистрируется всеми ДПЗ, но что указывает резонанс в функциях когерентности (рис. 4б и рис. 4г). В отчете (см. сноску 1) расчет параметров напряженно-деформируемого состояния (НДС) ТВС-5 для частоты вибронагрузки 8,7 Гц отсутствует.

Резонансы на частоте 16,6 Гц (обозначение – $f(\text{ГЦНА}_{10\text{бр}})$), 33,2 Гц (обозначение – $f(\text{ГЦНА}_{20\text{бр}})$) широко описаны в работах [19,20] и представляют собой первую и вторую гармонику оборотной частоты ГЦНА.

Как видно из рисунка 4 значимых отличий между вибрационным состоянием ТВС-5 (03-36) и штатной ТВС (02-29) в низкочастотной области не выявлено, следовательно особенности конструкции ТВС-5 не влияют ни на частотный состав вибрации, ни по всей видимости, на величину амплитуды колебаний. Необходимо решить вопрос о стабильности вибрационного состояния, т.е. в отсутствии смещения частотных резонансов. На рисунке 5 представлены АСПМ ДПЗ для двух, описанных выше ТВС, полученных с интервалом около 1 месяца. В течении

3 месяцев эксплуатации не выявлено дрейфа обсуждаемых резонансов, что полностью подтверждает гипотезу о стабильности вибрационного состояния ТВС, в том числе и ТВС-5.

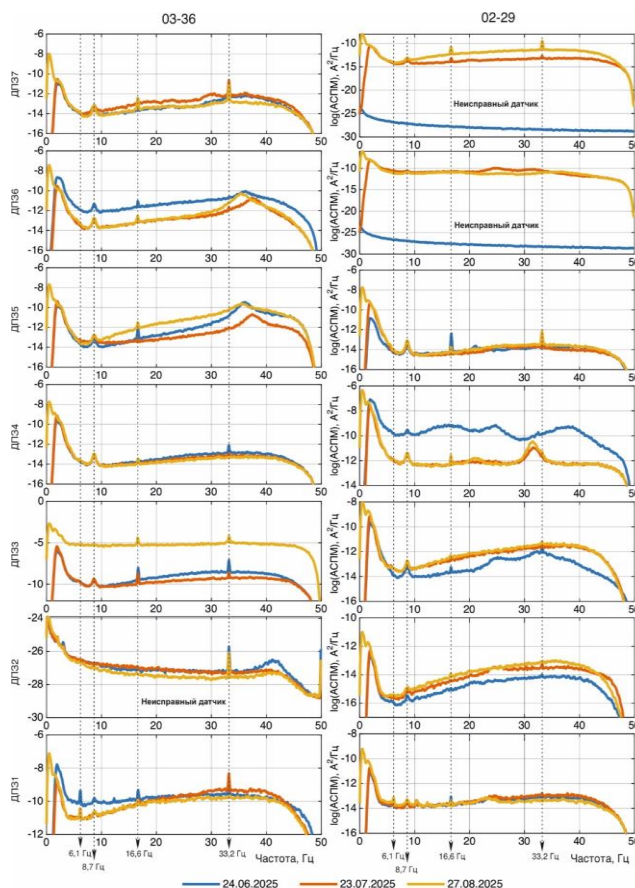


Рисунок 5. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 и ТВС 02-29 в диапазоне от 0 Гц до 50 Гц в разные моменты времени

Figure 5. Autospectral power densities of the direct charge sensors signal involved in the experiment for fuel assembly 03-36 and fuel assembly 02-29 in the range from 0 Hz to 50 Hz at different time points

Высокочастотный диапазон

В качестве высокочастотного диапазона в данной работе будет рассмотрен интервал колебаний от 50 Гц до 200 Гц. Долгое время данная зона подробно не исследовалась, но как было отмечено выше с появлением новых технических средств прецизионного класса, внесением изменений в конструкцию ДПЗ и разработкой авторами методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [9,10]) появилась возможность оценки нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне. Так,

в источнике [9] представлены некоторые спектральные оценки нейтронного шума в высокочастотном диапазоне, а в [10] доказана возможность использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для оценки состояния АЗ.

Несомненно, возникает вопрос, а для чего необходимо тщательное исследование указанной области, если в предыдущем разделе доказана идентичность вибрационного состояния ТВС-5 и штатной ТВС. Ответ кроется в особенностях конструкции ТВС-5, а именно в отсутствии фиксации твэл в решетке нижнего узла (для упрощения сборки/разборки ТВС). Согласно Отчету о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5»⁵, собственные частоты колебаний твэл находятся в полосе частот от 50 Гц до 200 Гц. На рисунке 6 представлены спектральные оценки для всех ДПЗ сборок 03-36 (ТВС-5) и 02-29 (штатная ТВС) в указанном диапазоне – рисунки 6а и 6в, а также полный перебор функций когерентности для всех пар каждой ТВС – рисунки 6б и 6г.

Первое на что следует обратить внимание это присутствие в спектрах мощных резонансов на частотах 100 Гц и 150 Гц (выделено красным цветом). Это помехи от наводок электрического тока, соответственно вторая и третья гармоника от частоты переменного тока 50 Гц. Первая гармоника фильтруется специальным режекторным фильтром, поэтому в спектральных оценках она отсутствует. Далее, в спектрах ТВС-5 и штатных ТВС имеются общие частоты: 139,3 Гц и 166,1 Гц (промаркированы черным цветом), при этом колебания на данных частотах регистрируется всеми ДПЗ, о чем говорит величина функции когерентности, достигающая значений ~0,6. Скорее всего колебания на данных частотах имеют механическую природу. Однако в спектрах штатных ТВС есть резонансы отсутствующие в спектрах ТВС-5: 113,9 Гц и 120,7 Гц (отмечены синим цветом), имеющие также высокие значение функции когерентности. Ло-

гично предположить, что наблюдаемые частотные максимумы соответствуют колебаниям твэл, сегментам твэл (участок между дистанционирующими решетками), каркаса, собственно измерительного канала и др. Однако пока такие выводы делать преждевременно и нецелесообразно ввиду недостаточности данных. Для интерпретации экспериментальных данных и нужны результаты стендовых испытаний макетов ТВС-5. К сожалению, в Отчете о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5»⁵ собственные частоты колебаний представлены интервальной величиной, а не численной оценкой с указанием точности. Поэтому прямая интерпретация экспериментальных данных по результатам стендовых испытаний затруднительна.

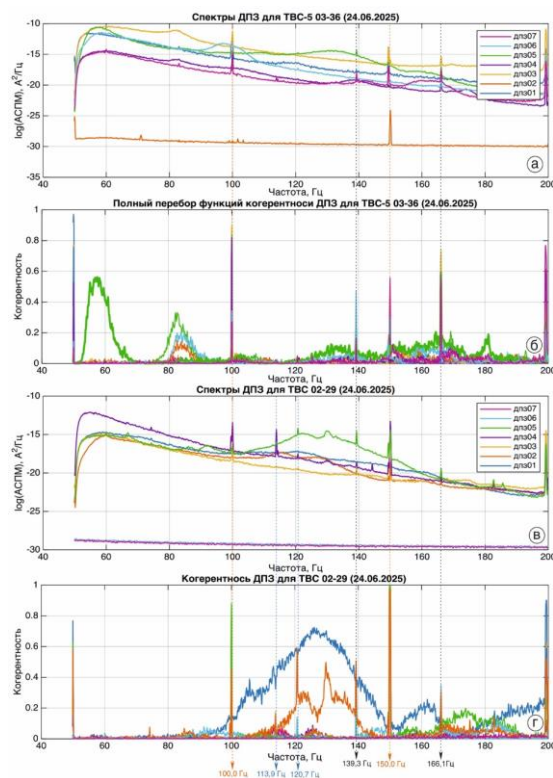


Рисунок 6. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 (а) и ТВС 02-29 (в) в диапазоне от 50 Гц до 200 Гц. Соответствующие функции когерентности для ТВС 03-36 (б) и ТВС 02-29 (г)

Figure 6. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment for fuel assembly 03-36 (a) and fuel assembly 02-29 (v) in the range from 50 Hz to 200 Hz. The corresponding coherence functions for fuel assembly 03-36 (б) and fuel assembly 02-29 (г)

⁵ Отчет о научно-исследовательской работе. Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5. 545-О-004. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2022. – 34 с.

Выводы

В представленной статье впервые принята попытка оценить вибрационного состояния ТВС пятого поколения (ТВС-5) на основе интерпретации нейтронно-шумовой сигналов ДПЗ. Методы выделения и фиксации шумовой составляющей различных вариативных сигналов, а также алгоритмы ее обработки сложны, требуют дополнительного обучения и определенного опыта работы. Скорее всего именно этими причинами объясняется существенное снижение интереса к экспериментальным работам по шумовой тематике на различных РУ в мировой практике и в РФ. Из представленных в статье примеров следует, что нейтронно-шумовые методы контроля обладают несомненными преимуществами для постоянного эксплуатационного мониторинга ТВС, ТВЭЛ и другого внутрикорпусного оборудования. Главными достоинствами нейтронно-шумовых методов контроля состояния РУ авторы считают:

- пассивность;
- высокая чувствительность к аномалиям;
- возможность работы в эксплуатационных условиях;
- точная локализация дефектов;
- уникальность по отношению к некоторым типам неисправностей.

Экспериментально выделены частоты колебаний ТВС-5: 6,1 Гц, 8,7 Гц, 12,3 Гц, 16,6 Гц и 33,2 Гц, представлена интерпретация источников возникновения вибрации. Произведено сравнение вибрационного состояния ТВС-5 и штатной ТВС в низкочастотном диапазоне, выявлено полное совпадение по частотному составу. Необходимо отметить, что предварительный расчет НДС ТВС-5 проводился на основе других частотных составляющих по Отчету о научно-исследовательской работе (см. сноску 1): 5,0 Гц; 10,0 Гц; 16,5 Гц и 33,0 Гц. Таким образом, заложенные в расчетный код данные не являются корректными и не соответствуют экспериментальным данным. Но учитывая фактически полную идентичность вибрационного состояния ТВС-5 и штатных ТВС в низкочастотной области, авторы полагают,

что указанная неточность в оценке не критична, т.к. штатные ТВС для РУ ВВЭР-1200 работают надежно и длительное время, несмотря на то, что расчет НДС проводился с такими же исходными данными по частотным составляющим. В дальнейшем, целесообразно использовать реальные экспериментальные данные.

Наличие в спектрах ДПЗ горизонта 1 резонанса на частоте 6,1 Гц свидетельствует как в ТВС-5, так и в штатных ТВС о вибрации ТВС на первой изгибной частоте, а отсутствие тренда частоты в низкочастотную область о надежной фиксации ТВС в АЗ.

За три последовательных измерения не выявлено смещения резонансов, что говорит о стабильности и неизменности вибрационных состояний ТВС. Необходимо отслеживать как изменение частоты спектральных максимумов, так и их амплитудных значений. Отклонение частоты резонанса в большую или меньшую сторону характеризует изменение массы или жесткости динамической системы (подробнее – работы [8,10]). В предположении, что масса ТВС измениться не может, то логично связать дрейф частоты с трансформацией жесткости, а это, в свою очередь, сигнализирует о модификации условий закрепления.

В представленной работе впервые произведен анализ высокочастотных колебаний ТВС-5 и произведено сравнение с вибрационным состоянием штатных ТВС при совместных измерениях нейтронно-шумовых параметров. Из полученных данных следует, что в спектрах ТВС-5 и штатных ТВС имеются общие частотные максимумы: 139,3 Гц и 166,1 Гц. В тоже время в спектрах штатных ТВС есть резонансы: 113,9 Гц и 120,7 Гц, которые отсутствуют в спектрах ТВС-5. С достаточной степенью уверенности интерпретировать данные максимумы пока не представляется возможным.

Не смотря на кажущуюся глобальность исследования и большой объем данных, начатую работу необходимо продолжать. Необходимо скрупулезно и последовательно отслеживать любые изменения спектрального состава ДПЗ как для ТВС пятого поколения, так и штатных ТВС. Если низкочастотный диапазон изучен достаточно хорошо, то

высокочастотный только в самом начале освоения. Резонансы в указанном интервале несут информацию о вибрации ТВЭЛ и эле-

ментов ТВЭЛ (между ДС), что критично по отношению именно к ТВС-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Литвинов И.И. Фабрикация МОКС-топлива с минорными актинидами. Новая технологическая платформа атомной энергетики: Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Сибирского химического комбината. Северск, 23–25 апреля 2024 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С. 15. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69113383&ysclid=midamhkcmsg546763372> (дата обращения: 26.08.2025).

Litvinov I.I. Fabrication of MOX fuel with minor actinides. New technological platform of nuclear energy: Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of the Siberian Chemical Plant. Seversk, April 23–25, 2024. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2024. P. 15. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69113383&ysclid=midamhkcmsg546763372> (accessed: 26.08.2025).

2. Брянский М.Н., Дружинин Р.И., Лаптев С.К. Разрешение кризиса развития современной ядерной энергетики за счет эксплуатации ЧНУП топлива. Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: Отраслевая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 60-летию СТИ НИЯУ МИФИ в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 09–13 декабря 2019 года. Северск: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2019. С. 18. Режим доступа: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (дата обращения: 26.08.2025).

Bryansky M.N., Druzhinin R.I., Laptev S.K. Resolving the crisis of modern nuclear energy development through the use of SNUF fuel. Innovations in the Nuclear Industry: Challenges and Solutions: Industry-Specific Scientific and Practical Conference for Students, Postgraduate Students, and Young Scientists Dedicated to the 60th Anniversary of the СТИ НИЯУ МИФИ as Part of the Scientific Session at NRC MEPhI, Seversk, December 9–13, 2019. Seversk: National Research Nuclear University MEPhI, 2019. P. 18. (In Russ.). Available at: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (accessed: 26.08.2025).

3. Фам В.Х., Терехова А.М., Сахаува Р.М., Тишина И.А. Обоснование возможности использования ТВС с РЕМИКС топливом в активной зоне реакторов ВВЭР. Будущее атомной энергетики: Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции, Обнинск, 29–30 ноября 2018 года. Часть 1. Обнинск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. С. 71–72. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=cewoww&ysclid=midb8fec53452735993> (дата обращения: 26.08.2025).

Fam V.Kh., Terekhova A.M., Sakhauva R.M., Tishina I.A. Justification of the possibility of using TVS with REMIX fuel in the core of VVER reactors. The future of nuclear power: Abstracts of the 14th International scientific and practical conference, Obninsk, November 29–30, 2018. Part 1. Obninsk: National Research Nuclear University MEPhI, 2019. P. 71–72. (In Russ.). Available at: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (accessed: 26.08.2025).

4. Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н. Проблемы и решения по разработке и внедрению конструкции ТВС-2М с увеличенной загрузкой топлива для перспективных топливных циклов с удлиненными кампаниями. Сборник трудов ОКБ «Гидропресс». Выпуск 7, Часть 3. Подольск: Гидропресс, 2007. С. 631–638. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20360104&pff=1> (дата обращения: 26.08.2025).

Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B., Vasilchenko I.N., Kobelev S.N. Problems and solutions in the development and implementation of the TVS-2M design with increased fuel loading for advanced fuel cycles with extended campaigns. Collection of Works by the Hidropress experimental design bureau. Issue 7, Part 3. Podolsk: Hidropress, 2007. P. 631–638. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20360104&pff=1> (accessed: 26.08.2025).

5. 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>

Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron-noise methods of monitoring VVER active zones. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

6. 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 VVER dynamic processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2023;4:19–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

7. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого зрада на маневренных режимах ВВЭР. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2023;4(143):51–61. doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](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 VVER manoeuvring modes. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2023;4(143):51-61. (In Russ.). doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51)

8. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2018. 472 с. ISBN 978-5-02-040138-9. Режим доступа: https://elbib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p2/ (дата обращения: 08.09.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9. (In Russ.). Available at: https://elbib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (accessed: 08.09.2025).

9. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2021. Ч.1. 222 с. ISBN 978-5-02-040869-2. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (дата обращения: 08.09.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. (Library of technical diagnostics of nuclear power plants). Moscow: Nauka, 2021. Part 1. 216 p. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (accessed: 08.09.2025).

10. Слепов М.Т. Методология комплексного шумового контроля оборудования ВВЭР-1200: Диссертация доктора технических наук по специальности 2.4.9. Москва, 2025. 307 с. Режим доступа: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1cdeda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (дата обращения: 08.09.2025).

Slepov M.T. Methodology of comprehensive noise control of VVER-1200 equipment: Doctor of technical sciences dissertation speciality 2.4.9. Moscow, 2025. 307 p. (In Russ.). Available at: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1cdeda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (accessed: 08.09.2025).

11. 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 вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairetdinov V.U. Experience of conducting complex measurements using heterogeneous systems at various stages of starting up the VVER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

12. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Под ред. А.А. Абагян. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. ISBN 5-283-00787-1. Режим доступа: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (дата обращения: 08.09.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. VVER Vibronoise diagnostics. Edited by A.A. Abagyan. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. ISBN 5-283-00787-1. (In Russ.). Available at: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (accessed: 08.09.2025).

13. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Практические возможности и перспективы развития нейтронно-шумовой диагностики активных зон ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-реакторные константы»*. 2022;1:74–82. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (дата обращения: 08.09.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Practical possibilities and prospects for the development of neutron-noise diagnostics of VVER active zones. *Issues of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Reactor Constants»*. 2022;1:74–82. (In Russ.). Available at: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (accessed: 08.09.2025).

14. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2022;1(136):54–67. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_54.

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration condition of the vessel and in-vessel devices of the VVER-1200 reactor unit. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2022;1(136):54–67. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_54

15. Поваров В.П., Голубев Е.И., Жук М.М. Физика реактора ВВЭР-1200 и эксплуатационные вопросы: Научно-практическое пособие. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», 2025. Белгород: Константа, 2025. 332 с. ISBN 978-5-907903-23-4. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (дата обращения: 29.08.2025).

Povarov V.P., Golubev E.I., Zhuk M.M. Physics of the VVER-1200 reactor and operational issues: Scientific and practical guide. Novovoronezh Nuclear Power Plant Branch of Rosenergoatom Concern, 2025; Belgorod: Konstanta, 2025. 332 p. ISBN 978-5-907903-23-4. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (accessed: 29.08.2025).

16. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР. Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 29 мая – 1 июня 2007 г., ОКБ «Гидропресс», Подольск. Т. 2. С. 356–375. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1181595/ (дата обращения: 29.08.2025).

Dragunov Yu.G., Dranchenko B.N., Abramov V.V., Khayretdinov V.U. Vibration-dynamic studies to support design decisions for VVER reactors. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of VVER Nuclear Power Plants», May 29-June 1, 2007, OKB Gidropress, Podolsk. Vol. 2, P. 356–375. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1181595/ (accessed: 29.08.2025).

17. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;4:110–121. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., 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>

18. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Поле акустических стоячих волн в контурах циркуляции ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2025;4:51–63. <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

Arkadov G.V., Slepov M.T. The field of acoustic standing waves in VVER circulation loops. *Thermal power engineering*. 2025;4:51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

19. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Оценка вибраций ГЦНА при совместном использовании диагностических систем. *Новое в российской электроэнергетике*. 2022;6:33–40. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48728937> (дата обращения: 29.08.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Assessment of GCNA Vibrations Using Diagnostic Systems. *New in Russian power engineering*. 2022;6:33–40. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48728937> (accessed: 29.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Аркадов Г.В. – обработка результатов исследования, разработка алгоритмов обработки, проведение расчетов;

Слепов М.Т. – формулировка идеи и целей исследования, проведение исследований на АЭС, визуализация экспериментальных данных, разработка направлений исследований, выявление закономерностей.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

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 – доктор технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация.

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

e-mail: tymofeech@yandex.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Arkadov G.V. – processing of research results, development of processing algorithms, identification of patterns, carrying out calculations;

Slepov M.T. – formulation of the idea and objectives of the research, conducting research at nuclear power plants, visualization of experimental data, development of research directions.

FUNDING:

The work is carried out without using external sources of financing.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Gennady V. Arkadov – Cand. Sci. (Engin), Director General, «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: arkgen47@gmail.com

Mikhail T. Slepov – Dr. Sci. (Engin.), Head of the Department of Novovoronezh NPP the Branch of JSC Concern Rosenergoatom, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.

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

e-mail: tymofeech@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 29.09.2025

После доработки / Revision 25.11.2025

Принята к публикации / Accepted 02.12.2025