

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

УДК 621.039.56:536.2

EDN NOQXES

Оригинальная статья / Original paper




Нейтронно-шумовые методы контроля поканальной скорости теплоносителя в активной зоне

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

 tymofecht@yandex.ru

Аннотация. В представленной статье, авторами обсуждаются вопросы измерения скорости теплоносителя с помощью нейтронно-шумовой технологии. Шумовой метод оценки поканальной скорости теплоносителя по флуктуациям внутризонного нейтронного потока широко применялся для чехловых ТВС ВВЭР-440. Для вычисления скорости теплоносителя необходимо оценить время запаздывания сигналов двух датчиков прямого заряда частотным методом по локальным экстремумам их функции когерентности. Выведено уравнение чистого транспорта температурных флуктуаций. Другие случаи – наличие глобального нейтронного шума, некоррелированных шумов по каждому измерительному каналу не рассматриваются. Для безчехловых ТВС реакторных установок (РУ) ВВЭР-1200 авторами учтены горизонтальные перетечки теплоносителя между соседними ТВС. Произведена оценка ошибки в определении скорости теплоносителя. Введены понятия *sink*-структур и *sink*-частот, которые являются бесконечной последовательностью, периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, возникающую из-за тригонометрических множителей или слагаемых типа $\sin(\omega\tau_0)$, $\cos(\omega\tau_0)$, $\sin\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\cos\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$. Кратко описаны отличия ТВС-5 от штатных ТВС для РУ ВВЭР-1200. Впервые произведена оценка скорости теплоносителя в ТВС-5 и произведено сравнение со скоростью в штатных ТВС для четырех моментов времени. Обоснована необходимость мониторинга поканальных расходов теплоносителя для выявления ТВС со стабильно низким и стабильно высоким расходом теплоносителя. Указанные состояния могут быть обусловлены конкретной нагрузкой активной зоны, неизменными конструктивными особенностями РУ с ВВЭР-1200, а именно, с диаметрами труб в блоке защитных труб (БЗТ) над данной ТВС, близостью выгородки активной зоны, наличием сборки внутриреакторных детекторов (СВРД) и каналов термомониторинга в данной ТВС.

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

Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля поканальной скорости теплоносителя в активной зоне. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):77-90. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

For citation: Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise control methods for channel-by-channel coolant flow rate in the core. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):77-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

Neutron noise control methods for channel-by-channel coolant flow rate in the core

Gennady V. Arkadov¹ , Mikhail T. Slepov²  

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

² Branch of the Joint-Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants» Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

Abstract. In the presented article, the authors discuss the issues of measuring the coolant flow rate using neutron noise technology. The noise method for estimating the channel-by-channel coolant flow rate based on fluctuations in the intraband neutron flux has been widely used for VVER-440 cover fuel assemblies. To calculate the coolant flow rate, it is necessary to estimate the delay time of the signals of two direct charge sensors using the frequency method based on the local extremes of their coherence function. The equation of pure transport of temperature fluctuations is derived. Other cases are the presence of global neutron noise, uncorrelated noise on each measuring channel is not considered. The authors took into account horizontal coolant overflows between neighboring fuel assemblies for shell-less fuel assemblies of VVER-1200 reactor installations. The error in determining the coolant flow rate has been estimated. The concepts of sink structures and sink frequencies are introduced, which are an infinite sequence of periodic extrema – maxima and minima – spectral functions arising from trigonometric multipliers or terms of the type $\sin(\omega\tau_0)$, $\cos(\omega\tau_0)$, $\sin \frac{\omega\tau_0}{2}$, $\cos \frac{\omega\tau_0}{2}$, $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$. The differences between the fuel assemblies -5 and the standard fuel assemblies for the VVER-1200 are briefly described. For the first time, the coolant flow rate in fuel assemblies-5 was estimated and compared with the speed in standard fuel assemblies for four time points. The necessity of monitoring channel-by-channel coolant flow rates is substantiated in order to identify fuel assemblies with consistently low and consistently high coolant flow rates. These conditions may be due to the specific loading of the core, the invariable design features of VVER-1200, namely, the diameters of the pipes in the blast furnace above this fuel assembly, the proximity of the core enclosure, the presence of an air defense system and thermal control channels in this fuel assembly.

Keywords: fifth generation fuel assembly (TVS-5), neutron noise control, spectrum, coherence, VVER-1200, direct charge sensor, spectral maxima, natural frequencies, coolant flow rate

Введение

Для исследования внутриреакторного (внутризонного) нейтронного шума используются сигналы датчиков прямого заряда (ДПЗ) из состава сборок внутриреакторных детекторов (СВРД). ДПЗ является устройством, обеспечивающим непосредственное преобразование ядерной энергии в электрическую без всяких промежуточных этапов и, в сущности, является источником тока, разность потенциалов на электродах которого создается за счет использования энергии заряженных частиц. В случае регистрации нейтронов ток ДПЗ обусловлен реакцией взаимодействия нейтронов с нейтроночувствительным элементом детектора. Практическое применение в настоящее время получили ДПЗ, использующие в качестве носителей тока электроны (подробнее в источнике [1]). Всего по активной зоне (АЗ) ВВЭР-1200 равномерно расположены 54 СВРД в трех конструктивных исполнениях. При этом каждая СВРД имеет в составе по 7 индивидуальных ДПЗ, что позволяет говорить о 378 отдельных каналах, измеряющих внутриреакторный нейтронный поток. Состав СВРД, типы и особенности конструкции описаны в руководстве по экс-

плуатации¹, а краткие сведения об использованных в эксперименте ДПЗ сведены в таблице 1. На рисунке 1 представлены временные реализации флюктуаций тока 2 ДПЗ для верха АЗ (позиция 7 в СВРД) – рисунок 1а, для низа АЗ (позиция 1 в СВРД) – рисунок 1б.

Таблица 1. Метрологические и технические характеристики датчика прямого заряда в составе СВРД (составлено по Руководству по эксплуатации¹)

Table 1. Metrological and technical characteristics of the direct charge sensor as part of the SVRD (based on the User Manual¹)

Наименование параметра		Значение параметра
Диаметр эмиттера, мм		0,5
Длина чувствительного элемента, мм		250
Начальная чувствительность к условной плотности потока нейтронов, $A \cdot m^2 \cdot c$	- полная	$3,00 \cdot 10^{-24}$
	- активационная	$2,83 \cdot 10^{-24}$
	- активационная, определяемая прямым образованием Rh^{104}	$2,60 \cdot 10^{-24}$
	- активационная, определяемая образованием Rh^{104m}	$0,23 \cdot 10^{-24}$
Изменение чувствительности за счет выгорания эмиттера, %/(A·c)		0,33
Чувствительность к мощности дозы гамма-излучения Co^{60} , A·c/Гр		$2,0 \cdot 10^{-11}$

¹ Сборки внутриреакторных детекторов. Руководство по эксплуатации. ШПИС418260.002 РЭ – ИНКОР, 2013. – 83 с. – Режим доступа: по запросу авторам.

теплоносителя (ТН), транспорт температурных флюктуаций с входа реактора со скоростью ТН) более детальную информацию можно почерпнуть из авторских монографий [2,3]. Кроме того, в сигналах ДПЗ отображаются локальные нейтронные эффекты, например, такие, как высшие АСВ. В отличие от ДПЗ, ионизационные камеры (ИК) не чувствительны к ним, так как интегрирует пространственно-мелкие нейтронно-шумовые эффекты по всему объему активной зоны.

Существование в сигналах ДПЗ двух типов нейтронно-шумовых (НШ) источников (вибрационных и теплогидравлических), зачастую находящихся в одном и том же поддиапазоне частот, заставляет рассматривать их как конкурирующие источники при решении какой-либо одной конкретной задачи.

В данной работе авторами предпринята попытка оценить скорость теплоносителя через ТВС разного исполнения с использованием возможностей нейтронно-шумового метода.

Обоснование представительности экспериментальных исследований

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Авторам неоднократно приходилось обоснованно и аргументировано доказывать обоснованность использования авторской методики измерения нейтронного шума, точность измерения частотных составляющих, оценки скорости теплоносителя и др.

Для непосредственной регистрации токовых сигналов ДПЗ были задействованы два переносных многоканальных анализатора LMS SCADAS Mobile (по 40 измерительных каналов каждый). Указанные аппаратные средства регулярно проходят метрологическую поверку и имеют действующие сертификаты утверждения типа измерений. К сожалению, в настоящее время, из-за санкционных ограничений оборудование данного класса запрещено к поставке в РФ, что резко ограничивает возможность использования данного приборного парка в России. Безусловно, реализованное авторами решение обладает рядом преимуществ: во-первых, возможность беспрепятственного подключения

любого типа первичного преобразователя, а во-вторых, еще одним безусловным достоинством, особенно в условиях санкционного давления на РФ, является гарантированная работа с компьютером на самых разных операционных системах. Связь с компьютером может осуществляться как напрямую (через Ethernet интерфейс), так и через беспроводный интерфейс (Wi-Fi или Bluetooth).

Разработанная авторами концепция, прежде всего, направлена на решение конкретных эксплуатационных задач и предполагает использование заложенных разработчиками систем унифицированных выходов необработанных аналоговых сигналов, что позволяет без значительных усилий собирать уникальные измерительные схемы. Гибкость решения позволяет производить регистрацию данных либо в кластерном исполнении, т.е. распределяя «измерительные кластеры» по оборудованию АЭС, объединяя «узлы» в единую сеть, либо достаточно компактно, но с существенным увеличением числа разнотипных каналов (более подробно про технические аспекты организации измерений в работах [4,5]).

Подводя итоги вышесказанного, оценим погрешность частоты при максимальной частоте дискретизации, реализованной в экспериментах ($f_d = 1024$ Гц). Разрешение по частоте при использовании БПФ согласно [6,7] определяется формулой (1):

$$\delta f = \frac{1}{T}, \quad (1)$$

где δf – разрешение по частоте (условно расстояние между спектральными линиями);

T – длина временной реализации, на которой и считается БПФ.

Таким образом, спектральное разрешение по частоте полностью определяется длиной временной реализации, а не частотой дискретизации АЦП. Однако частота дискретизации во временной области или по-другому время между двумя последовательными отсчетами определяет точность оценки частоты в частотной области. Исходя из формулы (1) определение частоты является косвенным результатом измерения временного интервала, для которого рассчитываются спектральные оценки. Поэтому приборная ошиб-

ка измерения частоты должна рассчитываться по формуле погрешности косвенного измерения временного интервала (2)²:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 (\Delta x_m)^2} \quad (2)$$

преобразуя формулу (2) для нашего случая, получаем приборную ошибку определения частоты в частотной области, формула (3):

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial(1/T)}{\partial T}\right)^2 (\Delta T)^2} = \sqrt{\left(-\frac{1}{T^2}\right)^2 \Delta T^2} = \frac{\Delta T}{T^2} \quad (3)$$

Исходя из формулы (3) приборная ошибка при расчете частоты определяется точностью измерения временного интервала (частота дискретизации АЦП) и длиной временного интервала, для которого рассчитывается спектр.

В конечном итоге приборная ошибка в определении частоты при использовании переносного регистратора данных LMS SCADAS Mobile составляет $\Delta f = 5 \cdot 10^{-8}$ Гц, что позволяет сделать важный вывод о том, что приборные средства, задействованные в экспериментах значимых погрешностей в конечный результат, не вносят.

Таким образом, в случае однократной оценки частоты по рассчитанному спектру абсолютная погрешность частоты определяется только погрешностью отсчета, формула (4)³[10]:

$$\Delta f_{\text{абс}} = \alpha \cdot f_{\text{от}}, \quad (4)$$

где α – доверительная вероятность;

$f_{\text{от}}$ – погрешность отсчета частоты по линейной шкале, т.е. интервал, соответствующий случайной погрешности при использовании линейной шкалы.

Используя формулы (3) и (4), а также типовые условия для расчета спектральных характеристик:

- частоту дискретизации $f_d = 1024$ Гц;
- временной интервал $T = 100$ сек;
- погрешность отсчета частоты по линейной шкале 0,005 Гц;
- доверительную вероятность $\alpha = 95\%$, можно утверждать, что точность расчета частоты в представленных данных не хуже 0,01 Гц (3), с погрешностью не более $\pm 0,005$ Гц (4).

Краткие основы нейтронно-шумового метода контроля скорости теплоносителя

Шумовой метод вычисления поканальной скорости теплоносителя по флуктуациям внутризонного нейтронного потока широко применяется для чехловых ТВС ВВЭР-440 [8,9]. Этим методом производились измерения поканального расхода теплоносителя на всех Российских блоках с ВВЭР-440. По итогам шумовых измерений был уменьшен расход теплоносителя на блоке 2 Кольской АЭС в 2003 г. и блоке 2 АЭС Богунце в 2005 г. подрезанием колес ГЦН с целью уменьшения вибронгруженности ТВС. На блоке 4 Нововоронежской АЭС в 2006 г. рассверливанием дроссельных шайб на входе в активную зону был увеличен расход теплоносителя с целью уменьшения гидравлического сопротивления и уменьшения перепада давления теплоносителя на активной зоне. Эффективность проведенных модернизаций трактов ГЦК всякий раз подтверждались шумовыми измерениями поканальной скорости теплоносителя.

Для вычисления скорости теплоносителя необходимо оценить время запаздывания сигналов двух ДПЗ частотным методом по локальным экстремумам их функции когерентности.

Рассмотрим данное утверждение более подробно. Зададим произвольные сигналы $x(t)$ и $y(t)$, которые отличаются друг от

² Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2017. – 121 с. Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/106764?category_pk=918&ysclid=mocibch858217300218 (дата обращения: 31.03.2026); Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа; Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2020. 286 с. – Режим доступа: https://elibrary.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109 (дата обращения: 31.03.2026).

³ Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа; Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2020. 286 с. – Режим доступа: https://elibrary.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109 (дата обращения: 31.03.2026).

друга только параметром запаздывания τ_0 – временем запаздывания сигнала $x(t)$ по отношению к сигналу $y(t)$, выражения (5):

$$\begin{cases} x(t) = l(t) \\ y(t) = l(t + \tau_0) \end{cases} \quad (5)$$

где $l(t)$ – произвольный процесс, зависящий от времени t .

После Фурье-преобразования $F[\dots]$ указанных процессов имеем выражения (6):

$$\begin{cases} F[x(t)] = F[l(t)] \\ F[y(t)] = e^{j\omega\tau_0} F[x(t)] \end{cases} \quad (6)$$

или в компактной записи выражение (7):

$$F_y = e^{j\omega\tau_0} F_x. \quad (7)$$

Будем называть такое выражение чистым запаздыванием или чистым транспортом. Единственное уравнение чистого транспорта (7) в частотной области соответствует системе из двух уравнений (5) во временной области. Физически его можно трактовать, как двухканальные измерения одного и того же процесса $l(t)$ в разных точках из-за чего и возникает запаздывание τ_0 . Например, это может быть транспорт входных флуктуаций температуры теплоносителя – $\delta T_{in}(t)$ вверх по активной зоне без искажений со скоростью v и временем запаздывания $\tau_0 = \frac{H}{v}$ (рис. 2).

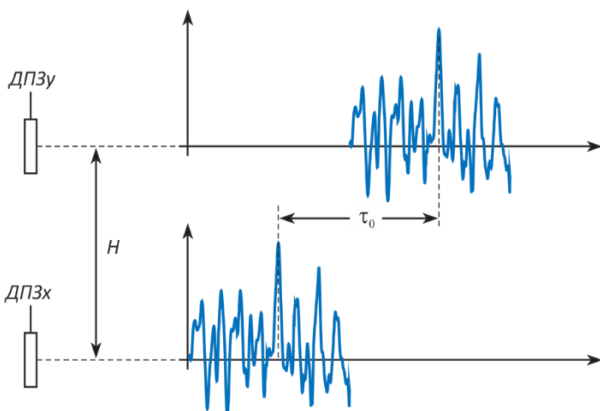


Рисунок 2. Транспорт входных флуктуаций температуры теплоносителя вверх по активной зоне
Figure 2. Transport of input fluctuations in the heat carrier temperature up the active zone

Рассмотрим два датчика прямого заряда (ДПЗ), расположенные друг от друга на расстоянии H , регистрирующие сигналы, пропорциональные δT_{in} , выражения (8) и (9):

$$\begin{cases} x(t) = \delta T_{in}(t) \\ y(t) = \delta T_{in}(t + \tau_0) \end{cases} \quad (8)$$

где и $\tau_0 = \frac{H}{v}$ и

$$F_y = e^{j\omega\frac{H}{v}} \delta T_{in}(\omega), \quad (9)$$

где $\delta T_{in}(\omega) = F[\delta T_{in}(t)]$.

Таким образом, спектр входных флуктуаций транспортируется от точки установки первого ДПЗ_х до точки установки второго ДПЗ_у и по запаздыванию τ_0 можно определить скорость ТН $v = \frac{H}{\tau_0}$.

В случае, если процесс $l(t)$ – детерминированный и нет необходимости в усреднениях (в операции математического ожидания – $M[\dots]$), то в целях оценивания параметра τ_0 следует оперировать Фурье-преобразованиями (спектрами), выражение (10):

$$F_y = e^{j\omega\tau_0} F_x, \quad (10)$$

или их мнимой и действительной частью, не переходя к спектральным плотностям, выражения (11):

$$\begin{cases} Im[F_y(\omega)] = \sin(\omega\tau_0) F_x(\omega), \\ Re[F_y(\omega)] = \cos(\omega\tau_0) F_x(\omega). \end{cases} \quad (11)$$

В данных выражениях синусоидальная функция с аргументом $\omega\tau_0$ модулирует спектр $F_x(\omega)$, и по периодическим экстремумам, например, нулям на частотной оси, например, функции $\sin(\omega\tau_0)$, отыскивается параметр $\tau_0 = \frac{k}{2f_0}$, $k=1,2,3,\dots$

Введем понятия *sink*-структур и *sink*-частот, которые далее будут применяться в различных нейтронно-шумовых моделях. Последовательность, вообще говоря, бесконечную, периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, возникающую из-за тригонометрических сомножителей или слагаемых типа

$\sin(\omega\tau_0)$, $\cos(\omega\tau_0)$, $\sin\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\cos\frac{\omega\tau_0}{2}$, $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$ и т.д. будем называть *sink*-структурой, а собственно частоты экстремумов *sink*-структуры будем называть *sink*-частотами. Частоты, на которых достигаются локальные минимумы спектральной функции, будем обозначать f_{sink}^{min} , например, выражение (12):

$$f_{sink}^{min} = \frac{1}{2\tau_0}, \frac{3}{2\tau_0}, \frac{5}{2\tau_0}, \dots, \frac{n-1/2}{\tau_0}, \dots \quad (12)$$

Приведенный выше пример достаточно условен и дает самое общее представление о расчете *sink*-частот. В случае наличие глобального нейтронного шума, и некоррелированных шумов по каждому измерительному каналу расчет *sink*-частот целесообразно осуществлять не по спектральным характеристикам, а по функции когерентности пар ДПЗ (более подробная информация в источнике [10]).

Для ВВЭР-1200 характерна особая гидродинамикой потока теплоносителя в активной зоне. Если для ВВЭР-440 чехлы ТВС сохраняют плотностные структуры теплоносителя, образовавшиеся на входе в активную зону, то в активной зоне ВВЭР-1200 (ВВЭР-1000) происходит его поперечное перемешивание. Плотностные пространственные структуры теплоносителя на входе в активную зону «размываются» по мере их движения вверх из-за процессов генерирования энергии в активной зоне, возможных процессов парообразования и поперечных перетечек. Поэтому среди всевозможных пар сигналов «ДПЗ-ДПЗ» одного СВРД (21 штука) пара «ДПЗ1-ДПЗ7» обладает наименьшей когерентностью. В этом есть свои преимущества и недостатки. Во-первых, высокая когерентность сигналов близких пар ДПЗ может быть обусловлена глобальным компонентом, который является маскирующим для выявления эффекта переноса плотностных неоднородностей. Во-вторых, на входе в активную зону, где отсутствуют эффекты парообразования в теплоносителе, задается эталон однофазной плотностной структуры и по нему отыскиваются взаимосвязи на выходе активной зоны. Тогда, если будет обнаружен, так называемый, транс-

портный эффект (эффект переноса), то он будет обусловлен перемещением только жидкой (а не парообразной) фазы теплоносителя вверх по активной зоне.

Особенности конструкции тепловыделяющей сборки V-поколения (ТВС-5)

Тепловыделяющая сборка ТВС-5 без крепления тепловыделяющих элементов в нижней решетке разработана для обеспечения безлаковой дистанционной сборки высокофонового уран-плутониевого топлива на заводе-изготовителе и обеспечения возможности замены дефектных твэлов при выполнении ремонта в условиях АЭС. Конструкция ТВС-5 разработана на основе материалов технического проекта ТВС-2М и ТВС-2006, имеющих конструктивные и технологические особенности (цанговое крепление твэла в нижней решетке и сборка пучка с лаковым покрытием твэлов), которые делают их малопригодными для дистанционного изготовления и имеющие ограниченную ремонтпригодность. Вопросы необходимости разработки нового топлива частично раскрыты в работе [10].

При проектировании ТВС-5 для обеспечения ее дистанционной сборки и ремонтпригодности приняты решения:

- об использовании в конструкции твэлов без крепления в нижней решетке;
- об изменении конструкции твэлов и нижней решетки;
- об оптимизации конструкции дистанционирующих решеток, их расположения и количества.

Разработка новой конструкции ТВС-5 на основе ТВС-2М обусловлена перспективой использования в будущем, более совершенного уран-плутониевого топлива. Цель создания ТВС-5 – минимизировать радиационное воздействие на персонал завода-изготовителя во время производственных и контрольных операций с топливными сборками.

Кроме того, новая конструкция ТВС призвана предотвратить образование жидких радиоактивных отходов в процессе производства. Это достигается за счет исключения технологических операций по лакированию и смазыванию тепловыделяющих элементов

(ТВЭлов), а также последующей промывки собранной ТВС от остатков лака и смазки.

Исходя из этого, ключевым требованием к конструкции ТВС-5 является возможность дистанционной сборки на заводе-изготовителе с минимальным количеством дефектов оболочек ТВЭлов, которые могут возникнуть в процессе сборки. При этом сборка должна осуществляться без использования лаков и смазывающих составов.

Соблюдение этих требований в новой конструкции тепловыделяющей сборки (ТВС) позволит осуществлять ее дистанционный монтаж, демонтаж и ремонт как на заводе-производителе, так и на атомной электростанции с использованием стэнда для проверки и ремонта ТВС. Разрабатываемая конструкция ТВС должна быть максимально унифицирована в рамках технологии ВВЭР. Это позволит использовать ее с минимальными изменениями, учитывающими особенности конструкций оборудования различных типов реакторов ВВЭР, на всех современных мощных реакторных установках (РУ) ВВЭР – ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-1300 (ВВЭР ТОИ).

ТВС-5 обладает жесткой конструкцией, что исключает возможность деформации кассеты в процессе эксплуатации. Это достигается благодаря тому, что к 18 направляющим каналам (НК) привариваются дистанционирующие решетки (ДР). В нижней части сборки установлена антивибрационная решетка, которая снижает вибрационные нагрузки на элементы ТВС в зоне хвостовика.

Для достижения совместимости ТВС-5 с ТВС-2006, обе ТВС имеют полностью аналогичную конструкцию, в том числе целью унификации с другими ТВС ВВЭР в конструкции ТВС-5 применена головка ТВС-2006.

Различия в конструкции заключается:

- в новой дистанцирующей решетке, обеспечивающая установку ТВЭлов в каркас со сниженным усилием при том же натяге в паре ячейка-ТВЭл относительно прототипа;

- в использовании цангового крепления ТВЭла и ТВЭга в нижней решетке заменено на крепление нижней заглушки в АВР с опорой ТВЭла и ТВЭга на нижнюю решетку (рис. 3а);

- изменении шага дистанционирующих решеток 12, 13, 14 (подробнее – в пояснительной записке «ТВС-5. ТВС для дистанционного изготовления»⁴;

- увеличении длины ТВЭл/ТВЭг на 27 мм (4058 мм вместо 4031 мм)⁵.

Расположение ТВС-5 в активной зоне седьмой топливной загрузки представлено на рисунке 4 (ТВС-5 выделены красным цветом). 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 состояния ТВС-5 по нейтронно-шумовым сигналам будет произведен только для двух ТВС-5, оснащенных каналами ДПЗ.

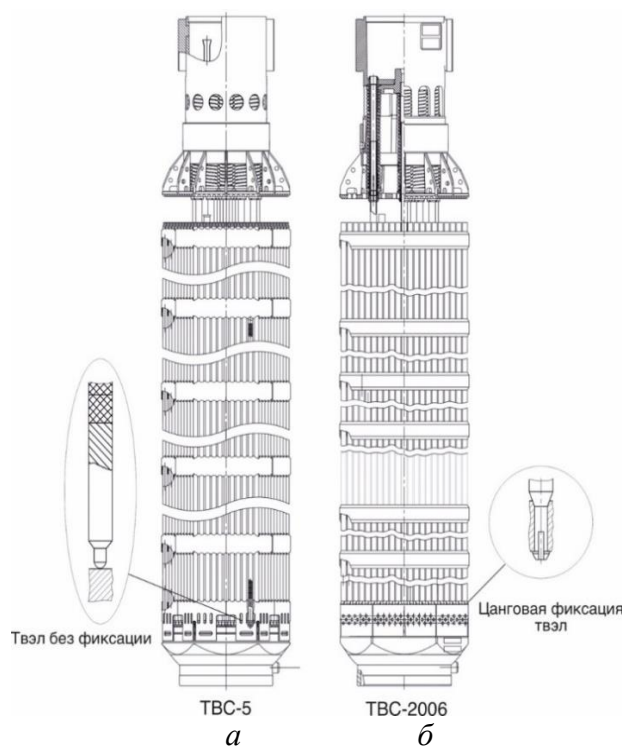


Рисунок 3. Конструктивные особенности:

а – ТВС-5; б – ТВС-2006

Figure 3. Design features:

а – TVS-5; б – TVS-2006

⁴ ТВС-5. ТВС для дистанционного изготовления. Пояснительная записка. 545 ПЗ. Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 2023. – Режим доступа: по запросу авторам;

⁵ Предварительный отчет по обоснованию безопасности. Глава 4. – ФГУП «Атомэнергопроект», 2007. – Режим доступа: по запросу авторам.

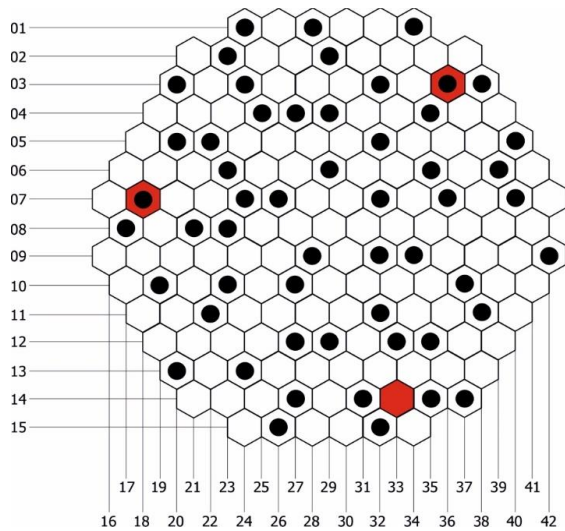


Рисунок 4. Картограмма седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2: ТВС-5 выделены красным цветом, ТВС со сборками ДПЗ отмечены черным кругом

Figure 4. Map of the seventh fuel load of Unit 1 at NVNPP-2: TVS-5 is highlighted in red, and TVS with DPP assemblies are marked with a black circle

Скорость теплоносителя в ТВС и в ТВС-5

Семь сигналов одного СВРД дают 21 комбинацию функций когерентности. Это так называемый полный перебор пар сигналов. В идеальном цилиндрическом реакторе с неизменными теплофизическими параметрами теплоносителя функции когерентности, построенные по признаку равенства рассто-

ятий между двумя ДПЗ, должны быть тождественными между собой. Реальный теплоноситель, в котором монотонно уменьшается его плотность с увеличением аксиальной координаты, а также изменяется его агрегатное состояние, порождает разные функции когерентности внутри одного семейства. Покажем это на примере ТВС 04-35 при измерении 27.08.2025 (рис. 5).

У всех функций когерентности наблюдаются коллективные свойства:

- резонанс АСВ1к вблизи частоты 8.75 Гц;
- локальный минимум в поддиапазоне частот [1.2–1.6] Гц;
- абсолютный минимум в поддиапазоне частот [7.48–7.52] Гц.

При неизменных условиях транспорта нейтронно-шумовых неоднородностей по вертикали АЗ, представленные на рисунке 5 семейства когерентностей должны иметь вид так называемых «жгутов». То есть кривые должны совпадать друг с другом в пределах точности их оценивания, чего на практике не наблюдается. А наблюдается общая тенденция для всех СВРД, состоящая в том, что по мере движения вверх, когерентность внутри одного семейства нарастает.

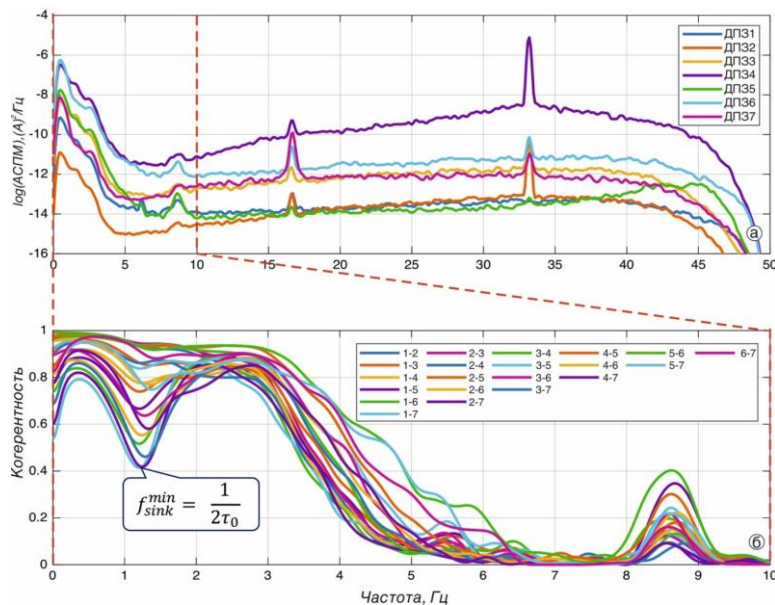


Рисунок 5. Автоспектральная плотность мощности датчиков прямого заряда для ТВС 04-35 для полосы частот 0 – 50 Гц (а), набор функций когерентности, рассчитанный для всевозможных пар датчиков прямого заряда сборки 04-35 для полосы частот 0 – 10 Гц (б), дата 27.08.2025

Figure 5. Autospectral power density of direct charge sensors for TVS 04-35 for the frequency band 0 – 50 Hz (a), set of coherence functions calculated for all possible pairs of direct charge sensors of the 04-35 assembly for the frequency band 0 – 10 Hz (b), 27.08.2025

Абсолютный минимум достигается на значениях функции когерентности, весьма близких к нулю. Если одним из сигналов функции когерентности является сигнал нижних ДПЗ (ДПЗ1 или ДПЗ2), то наблюдается *sink*-частота в пределах [4.15–4.65] Гц. Перечисленные выше два поддиапазона минимумов принадлежат одной и той же глобальной *sink*-структуре, так как положение минимума в поддиапазоне [7.48–7.52] практически неизменно для всех пар ДПЗ, а на местоположение локального минимума в поддиапазоне [4.15–4.65] Гц воздействует соседний слева глобальный компонент. Данная *sink*-структура присутствует во всех семействах функций когерентности с шагом более трех: (1–5, 2–6, 3–7), (1–6, 2–7), (1–7), что подтверждает ее глобальность. В других семействах на нее оказывают воздействие локальные источники НШ. Когерентности удаленных ДПЗ, принадлежащие разным семействам (1–7), (2–7), (2–6), практически совпадают друг с другом, что свидетельствует о тождественном теплофизическом состоянии ТН в горизонте ДПЗ6 и в горизонте ДПЗ7, а также горизонты ДПЗ1 и ДПЗ2 имеют свои тождественные состояния ТН.

Параметры этой глобальной *sink*-структуры необходимо связывать с общеконтурными параметрами, например с общеконтурным расходом ТН. Частоты минимума из широкого поддиапазона [4.15–4.65] Гц являются смещенными, а вот поддиапазон [7.48–7.52] весьма узкий и более всего подходит для оценки общеконтурного расхода ТН. Погрешность такой оценки будет тем меньше, чем ближе к нулю в точке минимума функция когерентности ДПЗ-ДПЗ одного СВРД. Чаще всего абсолютный минимум достигается на паре удаленных ДПЗ1-ДПЗ7.

С увеличением расстояния между двумя ДПЗ не наблюдается кратного увеличения числа локальных экстремумов, как это наблюдается для когерентностей ДПЗ в ВВЭР-440. Рассматриваемые когерентности для ВВЭР-1200 качественно близки к соответствующим когерентностям ВВЭР-1000, но различаются частотами локальных минимумов. Главная причина такого различия когерентностей состоит в отли-

чий объема паровой фазы теплоносителя в ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000. Отсутствие кратных *sink*-структур как в ВВЭР-1000, так и в ВВЭР-1200 обусловлено наличием поперечных перетечек теплоносителя.

Таким образом, из запаздывания сигнала ДПЗ7 по отношению к сигналу ДПЗ1 может быть вычислена поканальная скорость (расход) теплоносителя по жидкой фазе. Однако, для ВВЭР-1200 ввиду увеличения длины ТВС по сравнению с ТВС ВВЭР-1000 наилучшими парами для расчета скорости (расхода) теплоносителя являются пары ДПЗ1-ДПЗ6 и ДПЗ2-ДПЗ7. Значения f_{sink}^{min} для случая, представленного на рисунке 5, сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Значение минимальной частоты *sink*-структур, выделенных в функциях когерентности в сигналах ДПЗ для ТВС 04-35 (27.08.2025)⁶

Table 2. Value of minimum frequency of sink structures allocated in coherence functions in DCS signals for FA 04-35 (27.08.2025)

№ ДПЗ	Частота (f), Гц						Расстояние (l), м
	2	3	4	5	6	7	
1	-	1,36	1,24	1,20	1,20	1,20	
2		1,33	1,22	1,21	1,24	1,25	3,198
3			1,24	1,22	1,28	1,29	2,655
4				1,32	1,34	1,33	2,132
5					1,42	1,38	1,599
6						1,45	1,066
							0,533

Из данных таблицы 2 видно, что значение f_{sink}^{min} для пар ДПЗ1-ДПЗ6 и ДПЗ2-ДПЗ7 (расстояние между центрами указанных пар преобразователей составляет 2,655 м), в одном случае составляет величину 1,20 Гц, а в другом – 1,25 Гц. Таким образом, имеется «верхняя» и «нижняя» оценка скорости теплоносителя, усреднив которые можно получить величину близкую к истинной скорости.

Скорость теплоносителя определяется как:

$$v = 2lf, \quad (13)$$

где v – скорость теплоносителя, м/с;

⁶ Обоснование точности расчета частоты изложено в работе [5]

l – расстояние между центрами пары ДПЗ, м;

f – частота f_{sink}^{min} , Гц.

Используя формулу (9), получаем соответствующие оценки скорости 6,37 м/с и 6,64 м/с или среднюю скорость – 6,51 м/с.

Для обоснования точности оценки скорости необходимо рассчитать ошибку. Однако бездумное использование предлагаемых методик оценки может привести к неверному результату. Действительно, согласно источникам⁷, ошибка оценки скорости теплоносителя, рассчитанной по формуле (13), составит:

$$\Delta v = \sqrt{2f(\Delta l)^2 + 2l(\Delta f)^2}, \quad (14)$$

где Δv – ошибка в определении скорости теплоносителя, м/с;

Δl – ошибка в определении расстояния между центрами ДПЗ, м;

Δf – ошибка в определении частоты, Гц.

Если использовать «паспортные» значения $\Delta l = 0,01$ м (точность установки ДПЗ в сборке СВРД) и $\Delta f = 0,01$ Гц, то используя формулу (10) можно говорить об ошибке в определении скорости на уровне $\Delta v \sim 0,01$ м/с, что явно не соответствует возможностям описываемого метода. Следует учитывать, что ДПЗ представляет собой протяженный элемент (длина 0,25 м), а не «материальную точку», поэтому регистрация флуктуаций теплоносителя осуществляется по всей его длине. Поэтому, целесообразно оценивать ошибку в определении расстояния в половину длины ДПЗ, т.к. единичная флюктуация может оказаться либо ниже центра ДПЗ, либо выше, что и составляет неопределенность в определении длины равной 0,125 м на один ДПЗ (на пару 0,25 м). Таким образом, введя допущение,

что $\Delta l = 0,25$ м, можем оценить величину ошибки как $\Delta v = 0,35$ м/с для частоты $f = 1$ Гц и $\Delta v = 0,42$ м/с для частоты $f = 1,4$ Гц (данные из табл. 1). Таким образом, ошибка определения скорости теплоносителя нейтронно-шумовым методом не превышает $\Delta v = 0,4$ м/с, что дает возможность оценки скорости теплоносителя в ТВС 04-35 на 27.08.2025 величиной $v = 6,5 \pm 0,4$ м/с.

По изложенному выше алгоритму был произведен расчет скорости теплоносителя для всех задействованных в экспериментах ТВС (данные сведены в табл. 3). К сожалению, из-за ошибки оператора при регистрации данных 24.06.2025 и 23.07.2025 не были выключены низкочастотные фильтры, что делает невозможным использование нейтронно-шумового метода для оценки скорости теплоносителя. Поэтому в таблице 3 только 4 оценки скорости для каждой ТВС из 6 зарегистрированных наборов данных.

Таблица 3. Нейтронно-шумовая оценка скорости⁸ теплоносителя в ТВС за разные периоды времени
Table 3. Neutron noise estimation of the coolant flow rate [1] in a fuel assembly over different time periods

Координаты ТВС	Скорость теплоносителя, м/с			
	27.08.2025	24.09.2025	14.11.2025	21.01.2026
03-36 (ТВС-5)	6,3	6,2	5,9	6,3
02-29	6,2	6,3	6,4	5,9
04-35	6,5	5,8	6,1	6,2
07-18 (ТВС-5)	6,2	6,2	6,1	6,5
08-21	7,3	7,2	6,9	6,5

Кратко подводя итоги проделанной работы по определению расходов теплоносителя через штатные ТВС и ТВС-5 можно с уверенностью сказать, что ТВС-5 не выделяется по указанному параметру относительно ТВС-2006. Так, например, расположенные рядом ТВС-5 (03-36) и штатная ТВС (04-35) имеют одинаковый расход (с точностью $\Delta v = 0,4$ м/с).

⁷ Пономарев В.Б., Лошкарёв А.Б. Математическая обработка результатов инженерного эксперимента: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского федерального университета, 2019. – 104 с. Режим доступа: <https://elar.uafu.ru/handle/10995/78092?ysclid=mocj463ugi111837766> (дата обращения: 31.03.2026); Аксенова Е.Н., Гасников Н.К., Калашников Н.П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума: учебно-методическое пособие. М.: МИФИ, 2009. 24 с. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/414791/> (дата обращения: 31.03.2026).

⁸ Ошибка в определении скорости теплоносителя не превышает величину $\Delta v = 0,4$ м/с для всех значений в таблице

Выводы

Мониторинг поканальных расходов позволяет выявить ТВС со стабильно низким и стабильно высоким расходом ТН. Фактор стабильности может быть обусловлен конкретной загрузкой активной зоны, и тогда стабильность должна сохраняться в течение одной топливной кампании. Долгосрочная стабильность связана с неизменными конструктивными особенностями РУ с ВВЭР-1200, а именно, с диаметрами труб в БЗТ над данной ТВС, близостью выгородки активной зоны, наличием СВРД и каналов термоконтроля в данной ТВС. Переменная конструктивная особенность связана с движением органов регулирования (ОР СУЗ) в направляющих каналах (НК) ТВС, которое незначительно, но изменяет гидравлическое сопротивление ТВС в целом.

Энерговыделение, как функция пространственных координат активной зоны, также является фактором нестабильности расхода

теплоносителя. Энерговыделение зависит не только от срока эксплуатации ТВС, ее обогащения, от положения ОР СУЗ и концентрации борной кислоты, но и от «медленных» процессов, связанных с выгоранием топлива и выгорающих поглотителей (подробнее источники [12,13]). Эти процессы, вообще говоря, имеют индивидуальные для каждой ТВС скорости. То есть, шесть ТВС из ближайшего окружения данной ТВС, в первом приближении, также влияют на поканальный расход теплоносителя.

К фактору нестабильности поканального расхода через ТВС следует отнести изменение поля скоростей на входе в активную зону из-за подключения/отключения дополнительных контуров циркуляции теплоносителя. Также изменяется поле плотностей теплоносителя на входе в активную зону при включении/отключении контуров борного регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мительман М.Г., Розенблум Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. Москва: Энергоиздат, 1982. 77 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1108163/ (дата обращения: 31.03.2026).
Mitelman M.G., Rosenblum N.D. Charge detectors of ionizing radiation. Moscow. Energoizdat, 1982. 77 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1108163/ (accessed: 31.03.2026).
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Москва: Наука, 2018. 469 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (дата обращения: 31.03.2026).
Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor plant. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (accessed: 31.03.2026).
3. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография. Ч.1. Москва: Наука, 2021. 222 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoy-monitoring_2021/p0/ (дата обращения: 31.03.2026).
Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor plant. Monograph. Moscow: Nauka, 2021. Part 1. 222 p. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoy-monitoring_2021/p0/ (accessed: 31.03.2026).
4. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2016;4:44-54. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2016/04/05.pdf> (дата обращения: 31.03.2026).
Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. The experience of conducting complex measurements using heterogeneous systems at various stages of the VVER-1200 power unit start-up. *Izvestia of Higher Educational institutions. Nuclear power engineering*. 2016;4:44-54. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2016/04/05.pdf> (accessed: 31.03.2026).
5. Слепов М.Т. Методология комплексного шумового контроля оборудования ВВЭР-1200. Диссертация доктора технических наук (спец. 2.4.9). Москва, 2025. 307 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711 (дата обращения: 30.03.2026).

Slepov M.T. Methodology of integrated noise control of VVER-1200 equipment. Dissertation of the Doctor of Technical Sciences (spec. 2.4.9). Moscow, 2025. 307 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711 (accessed: 30.03.2026).

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 756 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=moci2cxrwc874923697> (дата обращения: 31.03.2026).

Sergienko A.B. Digital signal processing: 3rd edition. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 756с., ISBN 978-5-9775-0606-9. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=moci2cxrwc874923697> (accessed: 31.03.2026).

7. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_401958/?ysclid=moci4m3286747370887 (дата обращения: 31.03.2026).

Zalmanzon L.A. Fourier, Walsh, Haar transformations and their application in management, communications and other fields. Moscow: Nauka, 1989. 496 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_401958/?ysclid=moci4m3286747370887 (accessed: 31.03.2026).

8. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=637017&ysclid=mocinpijux170772173> (дата обращения: 30.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibration-noise diagnostics of VVER. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. (In Russ.). Available at: <https://reallib.org/reader?file=637017&ysclid=mocinpijux170772173> (accessed: 30.03.2026).

9. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. Москва: Наука, 2019. 398 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156 (дата обращения: 30.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. VVER diagnostic systems. Moscow: Nauka, 2019. 398 с. ISBN 978-5-02-040184-6. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156 (accessed: 30.03.2026).

10. Павелко В.И. Новые спектральные методы оценки времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях. *Атомная энергия*. 1987;63(4):266-288. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t63-4_1987/p0/ (дата обращения: 30.03.2026).

Pavelko V.I. New spectral methods for estimating the delay time in reactor noise studies. *Nuclear energy*. 1987;63(4):266-288. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t63-4_1987/p0/ (accessed: 30.03.2026).

11. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):64-77. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>.

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

12. 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://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=175cb837cf043602b5c4caa752274887&irbDb=ESVODT> (дата обращения: 31.03.2026).

Povarov V.P., Golubev E.I., Zhuk M.M. Physics of the VVER-1200 reactor and operational issues: a scientific and practical guide. Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant, 2025; Belgorod: CONSTANT, 2025. 332 p. ISBN 978-5-907903-23-4. (In Russ.). Available at: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=175cb837cf043602b5c4caa752274887&irbDb=ESVODT> (accessed: 31.03.2026).

13. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексея. 2023;4(143):51-61. Режим доступа: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2023/04/051-061.pdf?ysclid=mocjpwawap650957813> (дата обращения: 31.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. *Proceedings of the NSTU named after R.E. Alekseev*. 2023;4(143):51-61. (In Russ.). Available at: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2023/04/051-061.pdf?ysclid=mocjpwawap650957813> (accessed: 31.03.2026).

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:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

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

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

e-mail: arkgen47@gmail.com

Михаил Тимофеевич Слепов, доктор технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: tymofeecht@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 authors declare no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare that there is no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

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

e-mail: arkgen47@gmail.com

Mikhail T. Slepov, 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 04.04.2026

После доработки / Revision 28.05.2026

Принята к публикации / Accepted 02.06.2026