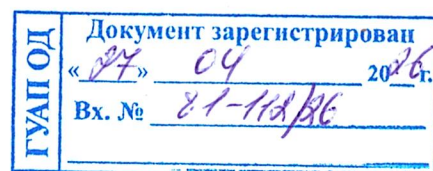


## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Тутнова Игоря Александровича  
на диссертацию Костарева Вячеслава Сергеевича  
«Модели и методики для контроля и диагностики элементов активной зоны  
ядерного реактора»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики  
материалов, изделий, веществ и природной среды»

### Актуальность темы диссертации и решаемых задач.

Гражданская атомная энергетика при решении современных проблем технической диагностики, контроля функциональной безопасности объектов использования атомной энергии, мониторинга технического состояния ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и в целом превентивного предупреждения проявления исходных событий аварий оборудования, агрегатов, конструкций и материалов атомных электрических станций сталкивается со множеством проблем – обеспечение высокого качества надежности и достоверности показаний приборов и информационно-измерительных систем для ядерной техники. Проблемы безопасной эксплуатации АЭС входят в число приоритетных актуальных задач национального уровня по обеспечению высокого качества контроля и диагностического прогнозирования ресурса безопасной и надежной эксплуатации современной техники на основе результатов неразрушающих испытаний. Поиск и решение таких задач является важным для устойчивого развития технологического потенциала страны, в том числе в особо чувствительном направлении текущего периода – импортозамещение методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды. Актуальность этих задач подчеркивается распоряжением правительства РФ от 06.10.2021 № 2816-р – Перечень инициатив социально-экономического развития РФ до 2030г. а также текущим содержанием национального проекта «Экологическое благополучие» (Постановление Правительства Российской Федерации от 14.02.2025 г. № 159). Поэтому актуальность диссертационного исследования на тему: «Модели и методики для контроля и диагностики элементов активной зоны ядерного реактора» и своевременность, полезность данного научного исследования, выполненного Костаревым В.С., не вызывает сомнений.



К текущему моменту, при всем разнообразии и глубине исследований в сфере контроля и диагностики надежности, прочностной безопасности и ресурса изделий и конструкций ЯЭУ, оценки физико-технологического качества таких конструкций и материалов, проблемы диагностического прогнозирования безопасного состояния активной зоны ядерного реактора, не имеют своего окончательного решения. В первую очередь требуют своего инженерного решения задачи методического и программного, технического, приборного обеспечения для систем внутриреакторного дозиметрического технического контроля безопасности активной зоны ядерного реактора. Дозиметрия ионизирующих излучений ядерного реактора рассматривает свойства безопасности его активной зоны, физические величины, характеризующие поле излучения и взаимодействие излучения с ядерным топливом, конструкционными материалами и другим веществом ЯЭУ. К текущему моменту для целей дозиметрии используются детекторы нейтронного потока: в формате изделий ионизационных камер (ИК), в составе чувствительных регистраторов информационно измерительной системы контроля нейтронного потока ЯЭУ, которые размещены на периферии активной зоны реактора, и датчики прямого заряда (ДПЗ), входящие в систему внутриреакторного контроля (СВРК), которые размещены непосредственно в тепловыделяющих сборках ядерного реактора. Количественное определение показателей дозиметрии радиоактивного излучения ядерного реактора, необходимо, прежде всего, для выявления, оценки и предупреждения возможной радиационной и ядерной опасности с целевой функцией - безотказной эксплуатации ЯЭУ. Для этого важно иметь верифицированные модели и методики контроля технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора, позволяющие получать качественные, количественные и достоверные результаты о состоянии ядерной и радиационной безопасности ЯЭУ в любой момент его жизненного цикла. К сожалению пока, вероятности достижения приемлемой точности прогнозирования проявления опасных событий, которые могут привести к негативным фактам радиационных и ядерных аварий ЯЭУ, недостаточно изучены специалистами в области ядерного приборостроения. В первую очередь это случилось из-за недостатка адекватных методов и инструментальных средств, приборов дозиметрического неразрушающего контроля для выполнения диагностических исследований безопасности активной зоны ядерного реактора, а также ущербности существующих нормативных лицензионных математических моделей, на основе которых могут быть определены интегральные характеристики активной зоны ядерного реактора в количественных показателях локальных коэффициентов

реактивности для условий многомерной неопределенности динамических режимов практической работы ЯЭУ.

Развитие методов и создание новых оригинальных методик для определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы ЯЭУ на основе показаний фактических дозиметрических измерений с помощью ДПЗ, а также создание и верификация вычислительных программных средств, позволяющих производить достоверный расчет локальных коэффициентов реактивности ядерного реактора на основе измерительной информации, получаемой от ДПЗ, составило главный предмет научной новизны и практической ценности диссертации Костарева В.С.

Содержание теста и автореферата диссертации отражает соискатель - специалист междисциплинарного уровня и системного характера, в совершенстве владеет навыками неразрушающих испытаний и диагностического контроля материалов, изделий, веществ и является опытным экспертом, а представленный результат диссертации подробно поясняет пути решения сформулированных соискателем задач. Соискателем в достаточной степени представлено содержание работы, раскрыта актуальность, цель, научная новизна, практическая значимость данной диссертационной работы, представлены сведения об апробации работы, публикациях и личном вкладе автора, основные положения, выносимые на защиту.

Судя по текстам диссертации и приоритетных научных публикаций соискателя, научная новизна этой диссертации состоит в том, что: решены многие методические вопросы повышения надежности приборов, средств контроля и диагностирования безопасности ЯЭУ в процессе проектирования, эксплуатации ядерной техники и приборов на основе интеллектуального анализа измерительных данных из опыта эксплуатации ЯЭУ. В том числе впервые сформулированы и верифицированы теоритические основы разработки, испытаний и внедрения в практику методики контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора, которая позволяет повысить точность определения диагностических признаков датчика и элементов его измерительной цепи. Отдельную научную ценность представляет собой завершенная соискателем разработка оригинальных моделей и методик для контроля и диагностики элементов активной зоны ядерного реактора с

применением активационных ДПЗ и твэлов тепловыделяющей сборки (ТВС) активной зоны ядерного реактора.

Текст и автореферат диссертации Костаревым В.С. составлен достаточно логично, в соответствии с требованиями ВАК, написан понятным и хорошим научным языком. Это важный аспект диссертационного исследования хорошо показывает конечный научный результат, представленный соискателем, подробно и логично раскрывает поставленную цель, своевременность и потребную необходимость комплексной задачи исследования и ясно отражает пути исполнения сформулированных оригинальных задач диссертации.

Диссертационную работу Костарева В.С. в целом характеризует проектно-системный подход, включающий рассмотрение вопросов научной обоснованности результатов диссертации, а именно представленных к защите комплексной методики определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора на основе показаний фактических измерительных данных ДПЗ, а также математической имитационной модели для физико-феноменологического описания процессов, происходящих в ДПЗ при эксплуатации датчика. Отличительной особенностью данной модели будет логичное интегральное цифровое описание нейтронно-физических процессов и электрических процессов в измерительной цепи ДПЗ, с учетом фактора изменяющегося нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора в разные периоды его эксплуатации, в том числе под действием опасных динамических воздействий и сред. В своем исследовании автор анализирует проблемы контроля и диагностики, связанные с испытаниями качества ДПЗ, рассматривает уже существующие практики таких испытаний и, в итоге, предлагает новые логичные варианты применения комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе, что позволяет увеличить время безотказной работоспособности датчика на 30-40 % .

### **Структура и содержание работы.**

Структура и содержание диссертации находятся в логическом единстве, соответствуют поставленной цели исследования и критерию внутренней целостности. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, содержащего 123 источника и пяти приложений.

Во введении представлено обоснование значимости выбранной темы для текущего периода развития ядерного приборостроения и атомной энергетики, выделены объект и предмет исследования, сформулирована основная цель работы, а также определены ключевые направления и перспективный путь исследований, указывающие на научный фундамент и практическую направленность, логическую связь разделов диссертационной работы.

В первом разделе выполнен обзор существующих методов контроля технического состояния систем и оборудования АЭС. Особое внимание автором обращено на использование основных понятий и определений, важных для управления качеством процессов практической технической диагностики ЯЭУ. Это позволяет связать изменение показателей надежности, безотказности, работоспособности контролируемого процесса в аспектах функциональной безопасности работы ядерного реактора и безотказности функционирования измерительного диагностического изделия, датчика с изменением его структурных параметров в процессе отработки заданного ресурса, а также прогнозировать наступление его предельного состояния, что особенно важно для любых конструкций объектов использования атомной энергии.

Во втором разделе представлены разработка и сама комплексная математическая имитационная модель для правдивого описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе. Вместе с этим показана оригинальная методика контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации. Для оценки диагностических признаков надежности и противоаварийной устойчивости практической работы ДПЗ в системе СВРК современных энергоблоков АЭС, предлагаемая соискателем методика контроля обеспечивает получение важной информации для разных условий стационарных и динамических режимов работы активной зоны ядерного реактора.

В третьем разделе представлена методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ. Данный раздел имеет самостоятельное значение для разработки методологий внутрореакторного контроля и прогнозирования функциональной ядерной безопасности и в целом работоспособности и запаса ресурса изделий ядерного приборостроения и конструктивных элементов активной зоны ЯЭУ. Междисциплинарных характер абстрактного описания динамических

режимов работы активной зоны ЯЭУ, в данном случае представляется оправданным. Он в целом имеет вектор на оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, процессов в активной зоне ядерного реактора по критерию их потребительского качества. Это способствует эффективному повышению надёжности в показателях противоаварийной устойчивости процессов использования атомной энергии и качеству экологической безопасности окружающей среды.

В четвертом разделе демонстрируется практическое применение авторской методики определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) ядерного реактора в динамических режимах работы ЯЭУ на основе показаний ДПЗ. Методика была применена для обработки измерительной информации, полученной из СВРК ядерного реактора ВВЭР-1200 ЛАЭС-2 в двух переходных режимах работы активной зоны. В этом варианте натурального эксперимента происходило перемещение органов регулирования реактора и его стрежней управления аварией защитой. Для целей верификации методики данный научный эксперимент сопровождался внесением дополнительных динамических воздействий на состояние реактивности активной зоны реактора. Полученные при этом результаты являются существенными для наполнения базы знаний в области ядерного приборостроения и соответственно для подготовки будущего кадрового резерва для атомной отрасли.

В заключении текста диссертации кратко приведены основные результаты, полученные в ходе выполненного научного исследования, и представлены перспективы их дальнейшего практического использования.

Все разделы диссертации содержат важные результаты научных исследований автора и сопровождаются четкими и интуитивно ясными логическими выводами. Эти результаты создают научные предпосылки для совершенствования методической и нормативной баз знаний, и следует ожидать, что на основе вновь полученных результатов исследований автора в будущем будут валидированы стандартизированные методики для новых измерительных изделий активной зоны ядерного реактора. Создание таких научно обоснованных и экономически эффективных методик является важной научно-технической задачей национального уровня значимости для безопасности атомной энергетики мира.

#### **Достоверность результатов проведенных исследований.**

Достоверность результатов диссертационной работы, выдвинутых автором научных положений и выводов подтверждается логичностью плана

выполненных исследований, корректностью применяемого математического аппарата, непротиворечивостью ранее известным положениям, совпадением с экспериментальными результатами измерений, выполненными другими измерительными средствами и авторами, а также результатами практической апробации. Правильность и обоснованность сделанных соискателем выводов подтверждается использованием верифицированных аналитических методов для оценки погрешностей измерений, применением стандартных методик для выполнения лабораторных исследований, аттестованных метрологическими поверками сертифицированных измерительных приборов и исправного лабораторного оборудования, а также достаточной сходимостью впервые полученных данных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертационной работы соискателя получили достаточную апробацию на 7 международных конференциях и иных форумах. Результаты его исследовательской работы уже внедрены в деятельность АО «Атомэнергопроект», а также используются в учебном процессе ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого в г. Санкт-Петербурге при подготовке студентов в Высшей школе атомной и тепловой энергетики, что подтверждается соответствующими актами.

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них: 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 4 по специальности 2.2.8, в том числе 2 публикации без соавторов), 1 патент на изобретение РФ, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ, 6 работ в сборниках научных трудов и материалах международных, всероссийских конференций.

### **Научная новизна.**

Научную новизну диссертационного исследования определяют следующие впервые полученные автором результаты.

1. Комплексная математическая модель описания процессов, происходящих в ДПЗ при работе ЯЭУ. Отличительным и существенным признаком данной модели является, что на ее основе определяются диагностические признаки качества ДПЗ в показателях электрических параметров измерительной цепи. На практике, это позволяет уточнить значение нейтронного потока вблизи поверхности ДПЗ на момент выгорания топлива активной зоны реактора, как следствие, повысить точность и чувствительность датчика в период топливной кампании ЯЭУ.

2. Методика контроля технического состояния ДПЗ. Отличительной особенностью и оригинальностью данной методики является учет дополнительной измерительной информации о количественных показателях

качества ДПЗ, полученной в стационарных и динамических режимах и периодах работы активной зоны ядерного реактора.

3. Методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы ЯЭУ на основе показаний ДПЗ. Данная методика обеспечивает процедуру создания цифровых двойников нейтронных и полей энерговыделения активной зоны ядерного реактора путем решения уравнения кинетики ядерного реактора по откорректированным токовым сигналам ДПЗ, с учетом фактора погрешностей измерений.

### **Практическая значимость работы.**

Применение комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе, позволяет увеличить время работоспособности датчика СВРК современных энергоблоков АЭС на 30-40% путем расширения диапазона использования датчика по величине сопротивления изоляции измерительного кабеля на 3-4 порядка в сторону ее уменьшения. Методика контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора, позволяет повысить точность определения диагностических признаков состояния и надежности ДПЗ более чем в 2 раза. Методика определения размножающих свойств активной зоны на основе локальных коэффициентов реактивности, вычисленных по показаниям ДПЗ в динамических режимах работы активной зоны реактора позволяет обеспечить дополнительный контроль реактивности ЯЭУ. Это особенно важно для безопасной эксплуатации ЯЭУ при изменении положения органов регулирования системы управления и защиты энергоблока АЭС Улучшения состояния функциональной безопасности ЯЭУ в этом случае достигается путем использования фактически измеренных показаний ДПЗ, как датчиков, размещаемых независимо от ионизационных камер системы управления и защиты ядерного реактора.

### **Замечания, пожелания и вопросы по диссертационной работе Костарева В.С.**

1. В настоящее время преждевременно говорить о создании комплексной методологии обработки показаний дозиметрических измерений детекторов типа ДПЗ, включающей не только использование апробированных методов и экспериментальной измерительной информации для контроля фактического технического состояния активной зоны ЯЭУ, но и получение дополнительной информации для контроля надежности и

достигаемой точности измерений детекторами нейтронного потока. Для этого еще предстоит создать соответствующее программное обеспечение, в первую очередь необходимого для автоматических вычислений в СВРК и экспертных системах в формате советчика оператора на современных энергоблоках АЭС. Желательно в будущем в отдельной научной публикации соискателя отразить те ограничения на границы допустимого применения предлагаемых соискателем методик, о которых он умолчал в тексте своей диссертации.

2. В тексте диссертации указано, что родиевые ДПЗ обладают инерционностью (запаздыванием токового сигнала). В этой связи, без смягчения этого недостатка в части инерционности датчика, возможность их использования в переходных режимах работы энергоблоков с ВВЭР будет явно ограничена. В тексте диссертации было бы полезно для общности пояснить, с чем связана такая инерционность и каков порядок времени запаздывания токового сигнала ДПЗ? Рекомендуются соискателю обратить внимание на этот факт в своем докладе при защите диссертации.

3. В разделах 2 и 3 автор описывает созданные им расчетные программы, однако, он не поясняет - аттестованы ли эти программные продукты Ростехнадзором для практического использования в задачах лицензирования безопасной деятельности АЭС.

#### Замечание по автореферату.

По тексту автореферата, создается впечатление, что автор мало уделил внимание описанию имитационных моделей, методам для определения вероятности обнаружения и дальнейшего развития опасностей для функционирования активной зоны ядерного реактора за счет процедуры диагностического обнаружения дефектов технологии изготовления и эксплуатации ДПЗ средствами неразрушающего контроля, а также моделям диагностики для вероятностного прогнозирования опасности выявленных предвестников отказов ДПЗ. В автореферате нет информации, каким образом и кем верифицирован принятый в расчетах набор и состав исходных данных, для моделирования, что является важным для оценки качества расчетов и адекватности построенных моделей.

#### Заключение.

В целом, на основе анализа текста диссертации, ее автореферата, публикаций соискателя можно прийти к заключению, что диссертационное исследование Костарева Вячеслава Сергеевича отвечает общепринятым требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание

ученой степени кандидата наук. В диссертации Костарева В. С. достаточно логично изложено новое научно обоснованное техническое решение в аспектах повышения точности контроля технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора. Данное техническое решение реализуется на практике путем создания моделей и методик контроля технического состояния детекторов нейтронного потока в виде активационных ДПЗ.

Диссертационная работа Костарева В. С. по своему содержанию четко соответствует паспорту научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по следующим пунктам. П. 1 - «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды». П.3 - «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды». П. 6 «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии». Диссертация Костарева В. С. является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой автора, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, креативные инженерные разработки, имеющие существенное значение для развития инженерно-экономического потенциала страны. Работа является актуальной, полученные результаты обладают достаточной новизной, подробно обоснованы на современном научном уровне, описывают законченный этап исследований. Достоверность изложенных в диссертации результатов подтверждается использованием современных методик исследования, и внедрением результатов исследования в деятельность эксплуатирующих АЭС и иных организаций.

Все перечисленное дает основание считать, что представленная диссертационная работа Костарева В.С. соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции), а ее автор Костарев Вячеслав Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики

материалов, изделий, веществ и природной среды» за развития базы знаний в области научного обоснования методов повышения качества надежности приборов ядерного приборостроения и программно-аппаратных средств контроля диагностирования безопасности ядерной техники на основе анализа данных.

Заместитель председателя диссертационного совета  
ДС201.022.01 в НИЦ «Курчатовский институт»,  
д.т.н., профессор, лауреат государственной премии

 И.А. Тутнов

17 . 04 .2026 г.

Тутнов Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории исследования и продления ресурса ЯЭУ, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1, телефон: 8(499)196-97-97, e-mail: andt@mail.ru

Подпись Тутнова И.А. заверяю:

Заместитель директора –  
главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»

 О.А. Алексеева