

**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

УДК 539.16

EDN YJDFZH

Оригинальная статья / Original paper



Методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов по условиям обеспечения радиационной безопасности

А.Г. Васяткин ✉, **А.В. Белин**, **М.А. Соснин**, **А.А. Молодцов**, **М.А. Камнев**

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

✉ dep105@okbm.nnov.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности установления эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации по мощности для критических стенов при нейтронно-физических испытаниях активных зон судовых ЯЭУ. На основе аспектного анализа показано, что в диапазоне мощностей, характерных для критическихборок, тепловой и конструкционный аспекты не определяют выбор предельной мощности, тогда как решающим становится радиационный аспект. Проанализирована связь нейтронной мощности с измеряемыми нейтронно-физическими характеристиками и показаниями ионизационных камер, а также выделены два критических с точки зрения радиационной безопасности этапа: работа критической сборки на мощности и обращение персонала с ТВС после извлечения. Показано, что при постоянной нейтронной мощности измеряемая системой радиационного контроля мощность дозы в помещении критического стенова может оставаться практически неизменной, поскольку определяется преимущественно мгновенными компонентами излучения и биологической защитой. Одновременно дозовые характеристики ТВС после завершения облучения формируются накопленной активностью продуктов деления и активации и зависят от предыстории режима. Обосновано, что предельно допустимые режимы работы целесообразно назначать как допустимые комбинации «мощность – время работы», привязанные к прогнозируемой мощности дозы от ТВС и ограничениям для транспортно-упаковочных комплектов. Для оперативного прогнозирования дозовых характеристик предложено использование цифрового двойника критической сборки, реализующего расчет мощности дозы от ТВС по истории облучения. Методика позволяет связать уставки и режимы испытаний с объективными критериями радиационной безопасности, снизить неопределенность на этапе извлечения ТВС и обеспечить требуемую точность нейтронно-физических измерений при расширении номенклатуры испытываемых активных зон.

Ключевые слова: критический стенов, ТВС, нейтронная мощность, мощность дозы, цифровой двойник

Для цитирования: Васяткин А.Г., Белин А.В., Соснин М.А., Молодцов А.А., Камнев М.А. Методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов по условиям обеспечения радиационной безопасности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):5–14. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

For citation: Vasyatkin A.G., Belin A.V., Sosnin M.A., Molodtsov A.A., Kamnev M.A. Methodical approach to setting limits and monitoring the power of critical test facility according to radiation safety conditions. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):5–14. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

Methodical approach to setting limits and monitoring the power of critical test facility according to radiation safety conditions

Anatolii G. Vasyatkin ✉, **Aleksei V. Belin**, **Mikhail A. Sosnin**, **Anton A. Molodtsov**,
Mikhail A. Kamnev

Afrikanov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ dep105@okbm.nnov.ru

Abstract. The article considers the specifics of establishing operating limits and safe operating limits in terms of power for critical test facilities during neutron-physical tests of propulsion reactor cores. Based on an aspect-oriented analysis, it is shown that within the power range typical of critical assemblies, the thermal and structural aspects do not determine the choice of the limiting power, whereas the radiation aspect becomes decisive. The relationship between neutron power, the measured neutronic characteristics, and the readings of ionization chambers is analyzed, and two stages that are critical from the standpoint of radiation safety are identified: operation of the critical assembly at power and personnel handling of fuel assemblies after their removal. It is shown that at constant neutron power, the dose rate measured by the radiation monitoring system in the critical facility room may remain nearly unchanged as it is governed primarily by prompt radiation components and biological shielding. At the same time, the dose-rate characteristics of fuel assemblies after irradiation are determined by the accumulated activity of fission products and activation products and depend on the irradiation history. It is substantiated that the maximum permissible operating conditions should be defined as allowable «power–operating time» combinations linked to the predicted dose rate from fuel assemblies and to the limits applicable to transport packages. The use of a digital twin of the critical assembly is proposed for the prompt prediction of dose-rate characteristics, which calculates the dose rate from fuel assemblies based on the irradiation history. The methodology makes it possible to relate protection setpoints and test regimes to objective radiation safety criteria, reduce uncertainty at the stage of fuel-assembly removal, and ensure the required accuracy of neutron-physical measurements when expanding the range of tested core types.

Keywords: critical test facility, fuel assembly, neutron power, dose rate, digital twin

Введение

Концептуальные технические решения судовых реакторных установок, разработанных в АО «ОКБМ Африкантов», позволили создать мощные и компактные ядерные энергетические установки (далее – ЯЭУ) с увеличенным интервалом между перезарядками [1]. Однако, ввиду необходимости постоянной готовности ввода ЯЭУ, компактности реакторной установки и отсутствия технических средств обращения с ядерным топливом на судах, активная зона относится к неремонтируемым одноразовым изделиям без возможности какого-либо вмешательства в ее характеристики в процессе эксплуатации. Эти решения накладывают ряд повышенных требований к процессам разработки и изготовления активной зоны.

Учитывая отсутствие возможности вмешательства в процесс выгорания ядерного топлива в активной зоне, многочисленные условия изменения параметров активной зоны (такие как изменение изотопного состава ядерного топлива, выгорание поглотителей, изменение эффектов реактивности) должны быть заранее спрогнозированы расчетными программными комплексами. Активные зоны перед загрузкой в реактор должны пройти всестороннюю проверку и оценку на соответствие проектным характеристикам. Для верификации расчетных комплексов и подтверждения стартовых нейтронно-физических характеристик все активные зо-

ны, разработанные в АО «ОКБМ Африкантов» и поставляющиеся на судовые ЯЭУ, проходят нейтронно-физические испытания на критических стендах [2].

В условиях критических стендов тепло-выделяющие сборки (далее – ТВС) активной зоны загружаются в экспериментальные блоки, имитирующие конфигурацию активной зоны в реакторе ЯЭУ по расположению, отражателю, замедлителю, конфигурации рабочих органов компенсации реактивности и аварийной защиты (далее – критическая сборка).

Определение нейтронно-физических характеристик активной зоны осуществляется на низких уровнях нейтронной мощности в диапазоне от 0,1 до нескольких сотен ватт, необходимых для обеспечения требуемой точности измерения нейтронно-физических характеристик, и достаточных для дальнейшей работы с ТВС после испытаний персоналу без применения дистанционных устройств и защитных камер. После испытаний на критических стендах активная зона направляется на окончательную сборку и загрузку в реактор.

При испытаниях активных зон ЯЭУ диапазон мощности критических стендов ограничен проектными значениями максимально разрешенных мощностей (пределов безопасной эксплуатации по мощности), по которым устанавливаются уставки аварийной защиты в соответствии с требованиями нор-

мативных документов^{1,2}. Однако подходы к установлению пределов и контролю мощности критических стенов отличаются от используемых в энергетических реакторах ввиду различных механизмов влияния мощности на условия обеспечения безопасности.

В статье предложен новый методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов при испытаниях активных зон ЯЭУ по условиям обеспечения радиационной безопасности.

Аспектный подход к нейтронной мощности критических стенов

Основной характеристикой существующих ядерных установок является мощность, что нашло отражение и в нормативной документации по безопасности критических стенов, также называемых реакторами нулевой мощности. В соответствии с нормативными требованиями НП-049-17² эксплуатационным пределом и пределом безопасной эксплуатации критических стенов должна быть установлена тепловая мощность.

Анализ опыта эксплуатации ядерных установок выявил 3 аспекта установления предела безопасной эксплуатации по мощности:

- мощность как источник тепловыделения (тепловой аспект);
- мощность как источник накопления флюенса в конструкционных материалах (конструкционный аспект);
- мощность как источник ионизирующего излучения (радиационный аспект).

Тепловая мощность энергетических реакторов является основным параметром, по которому определяются эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации. Ограничение мощности энергетических реакторов в первую очередь связано с теплотехнической надежностью активной зоны [3]. Превышение предела безопасной

эксплуатации по мощности может привести к расплавлению топливных элементов и нарушению барьера безопасности.

Другим фактором, ограничивающим мощность энергетических реакторов, является накопление флюенса ионизирующего излучения в конструкционных материалах. Воздействие высоких флюенсов ионизирующего излучения приводит к радиационно-стимулированному изменению структуры, а также элементного и фазового состава конструкционного материала и, как следствие, значительному изменению физических и механических свойств [4]. Это может привести к потере достаточной механической прочности, изменению конструктивной компоновки и потере физико-химических свойств основных узлов реактора. При достигнутых физико-механических свойствах конструкционных материалов большая мощность реактора может значительно ограничить ресурс важных элементов и привести к их отказу.

Ядерный реактор, работающий на мощности, является источником ионизирующего излучения. Поэтому особое внимание уделяется проектированию защиты от излучения активной зоны для обеспечения требований радиационной безопасности. Но, как правило, материалы и компоновка радиационной защиты подбираются под максимальную мощность реакторной установки, установленной с учетом теплового аспекта и проектных аварий [5]. То есть радиационный аспект для ЯЭУ является вторичным.

Особенностью критических стенов является малый уровень мощности (в диапазоне от 1 Вт до 5000 Вт по базе данных МАГАТЭ³), необходимый для проведения испытаний или исследований. Целями и задачами использования критических стенов, в соответствии с федеральными нормами и правилами НП-033-11⁴, являются исследования нейтронно-физических характеристик,

¹ НП-008-16. Правила ядерной безопасности критических стенов. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 36 с. – Режим доступа: <https://u.to/ONV2lg> (дата обращения: 30.09.2025).

² НП-049-17. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности исследовательских ядерных установок. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2017. – 47 с. – Режим доступа: <https://u.to/R9V2lg> (дата обращения 30.09.2025).

³ The IAEA Research Reactor Database (RRDB). – Режим доступа: <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home> (дата обращения: 30.09.2025).

⁴ НП-033-11. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011. – 43 с. – Режим доступа: https://docs.secncrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-033-11/%D0%9D%D0%9F-033-11_conv.pdf (дата обращения 30.09.2025).

размножающих нейтроны среды на мощности, не требующей принудительного охлаждения среды и не оказывающей влияние на ее нейтронно-физические характеристики.

Малый уровень мощности позволяет эксплуатировать критические стенды без сложнейших систем теплоотвода и радиационной защиты, присущих ЯЭУ. А также дает возможность работать персоналу с ТВС, без технических средств радиационной защиты. Из самого определения критического стенда следует, что тепловой и конструкционный аспекты мощности не оказывают влияния на выбор предела безопасной эксплуатации по мощности. Поэтому из рассмотренных аспектов мощности ядерных установок на установление предела безопасной эксплуатации по мощности критических стендов, определяющее влияние оказывает радиационный аспект и необходимость обеспечения радиационной безопасности. Причем обеспечение радиационной безопасности требуется не только на этапах эксплуатации критической сборки на мощности, но также на этапах обращения с ТВС вне критической сборки после работы на мощности.

Разнообразие критических стендов по назначению, конструкционным особенностям и технологическим процессам обращения с ТВС требует индивидуального подхода к установлению пределов и контролю мощности по условиям обеспечения радиационной безопасности.

Нейтронная мощность и измеряемые характеристики активных зон

Прежде чем рассмотреть радиационный аспект установления пределов по мощности критических стендов, рассмотрим взаимосвязь нейтронной мощности и измеряемых нейтронно-физических характеристик активных зон.

Определение нейтронно-физических характеристик активных зон на критических стендах, таких как эффективность РО АЗ, дифференциальная эффективность РО КГ и т.д., осуществляется дифференциальными методами с использованием реактиметра. Реактиметр – средство измерения, на вход которого поступают сигналы от одного или нескольких нейтронных детекторов (как

правило, это ток от ионизационных камер), и обрабатываются по алгоритму, реализующему непрерывное синхронное решение обращенного уравнения кинетики в точечной модели. Ионизационные камеры регистрируют нейтроны утечки, количество которых зависит не только от нейтронной мощности, но и от пространственного распределения потока нейтронов в критической сборке.

Испытания активной зоны на критическом стенде предполагают анализ различных ее конфигураций, характеризующихся существенным различием в распределении плотности потока нейтронов. Для обеспечения сопоставимой точности измерений реактивности критически важно поддерживать идентичный диапазон изменений тока в ионизационных камерах во всех исследуемых конфигурациях. Следует отметить, что при одинаковых показаниях ионизационных камер различные конфигурации активной зоны могут генерировать неодинаковую нейтронную мощность. Это наглядно демонстрируется на рисунке 1, где представлено относительное изменение нейтронной мощности критической сборки с активной зоной судовой ЯЭУ для 18 различных конфигураций.

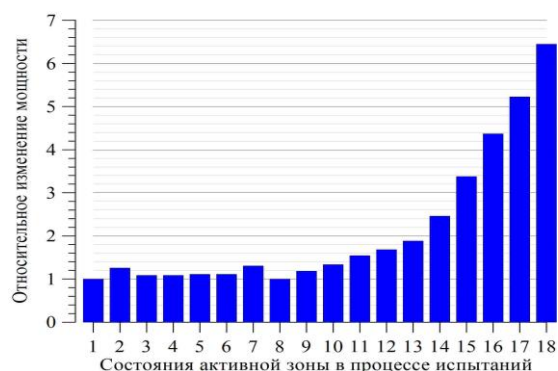


Рисунок 1. Относительное изменение мощности критической сборки в различных конфигурациях активной зоны при одинаковом токе ионизационных камер

Figure 1. Relative change in the power of the critical assembly in different configurations with the same current of the ionization chambers

Указанные конфигурации отличаются как положением рабочих органов СУЗ, так и количеством ТВС в критической сборке.

Минимальный ток ионизационных камер ограничен наличием внутренних источников нейтронов, не связанных с делением ядерного

топлива, и фоновыми составляющими тока ионизационных камер, вносящих существенный вклад в погрешность вычисления реактивности. Так, для измерения реактивности с погрешностью не более $\pm 0,005 \beta$ с использованием 6-ти ионизационных камер КНК-56М и реактиметра ЦВР-11, используемых на критических стендах АО «ОКБМ Африкантов», минимальный ток измерения реактивности должен быть не ниже 10^{-8} А. Максимальный ток ионизационных камер для измерений должен быть достаточным для проведения дифференциальных экспериментов и, как правило, составлять около $5 \cdot 10^{-7}$ А. Фактически максимальный ток ограничен уставками аварийной защиты по мощности.

На первый взгляд уставки аварийной защиты по мощности следует устанавливать по максимально реализуемой мощности в процессе испытаний. Однако применение такого подхода без ограничения времени работы на мощности может привести к значительному превышению контролируемых параметров радиационной безопасности. Поэтому в процессе испытаний активной зоны целесообразно контролировать не столько нейтронную мощность, сколько параметры радиационной безопасности, поскольку они являются более информативными для персонала и объективными для оценки соблюдения требований радиационной безопасности.

Радиационный аспект при испытаниях активных зон ЯЭУ на критических стендах

Основным фактором, ограничивающим сверху мощность критической сборки при нейтронно-физических испытаниях, является ограничение радиационного воздействия на работников (персонал), население и окружающую среду установленными пределами в соответствии с нормативным документом НРБ-99/2009⁵.

С точки зрения радиационного воздействия на персонал, можно выделить 2 вида работ на критических стендах:

- 1) обращение персонала с ТВС;
- 2) режим пуска и работы на мощности критической сборки.

При обращении персонала с ТВС производится распаковка ТВС из ТУК, в которых они прибыли из завода изготовителя активной зоны, и расстановка ТВС в хранилища. После распаковки ТВС загружаются в критическую сборку. После окончания экспериментов с активной зоной в режимах пуска и работы на мощности, ТВС извлекаются из критической сборки и устанавливаются в хранилища. Далее ТВС подготавливаются к упаковке в ТУК путем их промывки и осушки. И окончательной операцией обращения с ТВС является их упаковка в те же ТУК, в которых они прибыли на испытания. Все операции с ТВС производятся персоналом вручную, поэтому радиационное воздействие на персонал определяется ионизирующим излучением от ТВС.

В режимах пуска и работы на мощности критическая сборка с полностью загруженной активной зоной выводится в первое критическое состояние. Далее проводятся эксперименты по определению нейтронно-физических характеристик активной зоны. При работе критической сборки на мощности, персонал находится в пультовом помещении, огражденном от критической сборки биологической защитой. Радиационное воздействие на персонал определяется ионизирующим излучением от критической сборки.

Соответственно основными критериями безопасности проведения нейтронно-физических испытаний будут являться:

- 1) радиационная обстановка вокруг критической сборки в процессе режима работы на мощности;
- 2) дозовые характеристики ТВС при обращении с ними вне критической сборки после испытаний.

Первый критерий безопасности можно обеспечить соответствующей биологической защитой и ограничением нейтронной мощности, а контроль радиационной обстановки можно оперативно осуществлять средствами дозиметрического контроля. Определяющий

⁵ Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009». Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47. – Москва, 2009. – Режим доступа: <https://u.to/ViV2Ig> (дата обращения: 30.09.2025).

вклад в радиационную обстановку вносят мгновенные нейтроны деления, мгновенные фотоны, захватное γ -излучение и γ -излучение при неупругом рассеянии быстрых нейтронов, которые пропорциональны мощности критической сборки в рассматриваемый период. Запаздывающие фотоны, интенсивность которых зависит не только от мощности, но и от режимов работы критической сборки в предыдущие периоды, вклада в радиационную обстановку не вносят и средствами дозиметрического контроля не обнаруживаются.

Для иллюстрации этого на рисунке 2 представлены результаты измерения мощности дозы γ -излучения при испытаниях активной зоны в режиме активации на критическом стенде на максимально разрешенной мощности ~ 600 Вт в течение 10 минут.

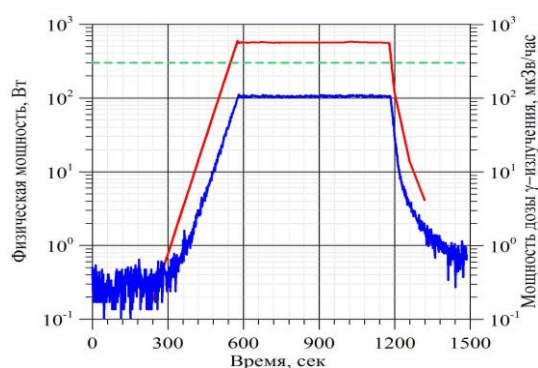


Рисунок 2. Измеренные значения нейтронной мощности и мощности дозы γ -излучения в режиме активации на критическом стенде при испытаниях активной зоны: — нейтронная мощность; — мощность дозы γ -излучения в боксе критического стенда; — контрольный уровень по мощности дозы γ -излучения в боксе критического стенда

Figure 2. Measured values of neutron power and dose rate of γ – radiation in the activation mode at the critical test facility during core tests: — neutron power; — γ -radiation dose rate in the critical test facility box; — reference level by γ -radiation dose rate in the critical test facility box

Как видно из рисунка 2, на протяжении всего времени активации при постоянной нейтронной мощности измеряемые системой радиационного контроля мощности доз γ -излучения оставались постоянными. Это объясняется более высокой средней энергией мгновенных фотонов, способных пройти через конструкционные материалы критической сборки и строительные сооружения.

Запаздывающие фотоны, испускаемые продуктами деления, имеют меньшую среднюю энергию и в основном поглощаются в конструкционных материалах критической сборки [5]. Также из рисунка 2 видно, что измеренные мощности дозы были меньше установленных контрольных уровней в три раза, что говорит о достаточном запасе защиты от ионизирующего излучения и о практической возможности увеличить нейтронную мощность без ухудшения радиационной обстановки вокруг критической сборки.

Второй критерий безопасности будет обуславливаться только запаздывающим фотонным излучением и активационным γ -излучением, зависящими от концентрации радиоактивных изотопов, накопленных за предысторию работы критической сборки на мощности. Момент извлечения ТВС после работы критической сборки на мощности является критически важным с точки зрения радиационной безопасности. Именно в этот момент присутствует фактор неопределенности в мощности дозы от ТВС, так как проконтролировать ее с использованием измерительных средств физически невозможно до момента извлечения ТВС из критической сборки. Кроме того, имеются ограничения мощности дозы γ -излучения от транспортных упаковочных комплектов, в которые ТВС упаковываются после испытаний для отправки на завод-изготовитель. Для транспортирования ТВС используются транспортные упаковочные комплекты, относящиеся в соответствии с требованиями ⁶ к упаковкам типа А с делящимися материалами, не относящимися к особому виду. В соответствии с требованиями НП-053-16 на ТУК устанавливаются требования по ограничению мощности дозы от поверхности упаковки. Конструктив ТУК не имеет биологической защиты, поэтому требования по ограничению мощности дозы должны обеспечиваться дозовыми характеристиками ТВС после испытаний.

⁶ НП-053-16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 111 с. – Режим доступа: <https://clc.li/jrqgS> (дата обращения 30.09.2025).

Обеспечить второй критерий безопасности возможно только ограничениями нейтронной мощности, ограничением времени работы на мощности критической сборки и выдержкой ТВС в критической сборке в подкритическом состоянии для спада активности в ТВС. Превышение допустимых значений мощности дозы от ТВС может потребовать дополнительной выдержки ТВС перед транспортировкой, что способно повлиять на график испытаний.

Таким образом, обеспечение радиационной безопасности при обращении с ТВС после испытаний на критических стендах требует не только ограничения мощности и времени работы критической сборки, но и оперативного прогноза дозовых характеристик ТВС на различных этапах испытаний. Решить эту задачу на основе измерений средствами дозиметрического контроля невозможно, поскольку наиболее критический с точки зрения безопасности момент – извлечение ТВС из критической сборки персоналом – связан с отсутствием априорной информации о мощности дозы от ТВС. Это обуславливает необходимость использования цифрового двойника критической сборки, позволяющего по истории работы критической сборки на мощности прогнозировать дозовые характеристики ТВС с требуемой точностью.

Методическая реализация цифрового двойника критической сборки и назначение предельно допустимой мощности

В целях практической реализации изложенного подхода к установлению пределов мощности по условиям радиационной безопасности и прогнозирования мощности дозы от ТВС в АО «ОКБМ Африкантов» разработан алгоритм цифрового двойника критической сборки. Цифровой двойник в данном случае представляет собой совокупность взаимосвязанных расчетных моделей и программных модулей. Расчетные модели воспроизводят геометрию критической сборки и ТВС конкретной активной зоны, режимы работы на мощности и последующий распад (или накопление) продуктов деления и активации в материалах ТВС. Программные модули обеспечивают сбор и об-

работку данных с детекторов критической сборки на основе расчетных моделей и выдают персоналу прогноз дозовых характеристик ТВС.

Прогноз дозовых характеристик ТВС персонал должен получать в режиме реального времени, поэтому в цифровом двойнике используются готовые результаты расчетов математических моделей критической сборки и ТВС с использованием аттестованных программных средств, расчет по которым занимает значительное время. Результатами таких расчетов являются следующие функционалы потока нейтронов и фотонов:

- 1) функции Грина для фотонного излучения от дискретных областей ТВС в точках контроля мощности дозы, которые используются для расчетов плотности потока фотонов от ТВС в контролируемых точках;
- 2) нормированные спектры нейтронов в ТВС, которые используются в программе нуклидной кинетики для расчетов источников фотонов;
- 3) относительные коэффициенты пропорциональности между показаниями ионизационных камер и мощности критической сборки и распределения нейтронного потока и скорости реакции деления ядерного топлива в ТВС для всех планируемых режимов испытаний, отличающихся положениями органов СУЗ, количеством ТВС или параметрами замедлителя, которые используются для формирования истории облучения ТВС.

Входными данными цифрового двойника являются конфигурация активной зоны (количество ТВС, положение органов СУЗ, параметры замедлителя), показания нейтронных детекторов, исходный изотопный состав топлива и конструкционных материалов ТВС. По этим данным с использованием результатов предварительно рассчитанных функционалов нейтронного потока формируются истории облучения ТВС, на основании которых в программе нуклидной кинетики рассчитываются временные зависимости интенсивностей источников фотонов в каждой ТВС.

Следующим шагом является свертка интенсивностей источников фотонов, функций Грина и коэффициентов перехода от плотно-

сти потока фотонов к мощности дозы, по результатам которой получают временные зависимости мощности дозы от ТВС в контролируемых точках. Время расчета временных зависимостей мощности дозы от ТВС составляет не более 2 минут.

Таким образом, цифровой двойник обеспечивает оперативную оценку дозовых характеристик ТВС на любой момент испытаний активной зоны. Более подробная методология и результаты первичной апробации алгоритма были представлены на конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-24)» [6].

Процедура назначения предельно допустимой мощности критической сборки по условиям радиационной безопасности основывается на сопоставлении расчетных дозовых характеристик с установленными нормативными ограничениями. Задавая на вход цифрового двойника вместо реальных показаний нейтронных детекторов требуемые для точности измерений показания тока реактиметра во всех режимах испытаний, можно оценивать мощность дозы от ТВС и подбирать необходимые мощности работы критической сборки и время работы на такой мощности. На основе анализа устанавливается предельно допустимая комбинация «мощность – время работы» для конкретного типа активной зоны и программы испытаний. При этом цифровой двойник позволяет, при необходимости, подобрать эквивалентные по дозовой нагрузке сочетания мощности и времени облучения, оптимизируя режимы испытаний, что особенно актуально для активационных испытаний, когда критическая сборка выводится на повышенный уровень мощности.

Представленный методический подход обеспечивает прямую привязку предельно допустимой мощности критического стенда к контролируемым дозовым характеристикам ТВС и позволяет обеспечить требования радиационной безопасности. При этом назначение эксплуатационных ограничений по мощности приобретает расчетно обоснованный динамический характер и непосредственно привязывается к типу испытываемой активной зоны.

ванный динамический характер и непосредственно привязывается к типу испытываемой активной зоны.

Заключение

Расширение номенклатуры испытываемых типов активных зон судовых ЯЭУ на критических стендах АО «ОКБМ Африкантов» сопровождается рядом неопределенностей в диапазонах мощности, необходимых для определения нейтронно-физических характеристик, и в оценке дозовых характеристик ТВС после завершения испытаний.

Максимально допустимая мощность критического стенда, определяемая с учетом биологической защиты сооружений, может использоваться в качестве паспортной характеристики. Однако, работа на такой мощности, без учета увеличения дозовых характеристик ТВС, может повлечь превышение контролируемых параметров радиационной безопасности по мощности дозы от ТВС после их извлечения из критической сборки. Поэтому установление пределов по мощности должно основываться на прогнозируемых дозовых характеристиках ТВС. Контроль мощности необходимо сопровождать оценкой и прогнозированием дозовых характеристик ТВС на любой момент испытаний активных зон. Таким образом, контроль мощности критических стендов должен основываться не только на фиксированных проектных ограничениях, но и на динамической оценке радиационных параметров, что способствует обеспечению точности измерений нейтронно-физических характеристик и безопасности персонала при обращении с ТВС.

Эффективным решением устранения вышеуказанных неопределенностей является использование цифровых двойников, позволяющих учитывать индивидуальные особенности конкретной активной зоны, оперативно корректировать режимы испытаний и обеспечивать необходимый уровень радиационной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Двойнишников Е.А., Макаров В.И., Промохов А.Г., Самойлов О.Б., Морозов О.А., Алексеев В.И., Силаев В.Ю. Концептуальные решения и нейтронно-физические характеристики активных зон атомных ледоколов. *Атомная энергия*. 2019;126(1):19-26. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2518> (дата обращения: 26.09.2025).

Dvoinishnikov E.A., Makarov V.I., Promokhov A.G., Samoilo O.B., Morozov O.A., Alekseev V.I., Silaev V.Yu. Conceptual solutions and neutron-physical characteristics of active zones of nuclear icebreakers. *Atomic Energy*. 2019;126(1):19-26. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2518> (accessed: 26.09.2025).

2. Виноградов М.К., Федупин В.Н. Исследовательские ядерные установки государств-участников Содружества Независимых Государств. Москва: Гелиос АРВ, 2016. 480 с. Режим доступа: https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear_Facilities/Cover.pdf (дата обращения: 26.09.2025).

Vinogradov M. K., Fedulin V. N. Research nuclear installations of the Commonwealth of Independent States member states. Moscow: Helios ARV. 2016. 480 p. (In Russ.). Available at: https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear_Facilities/Cover.pdf (accessed: 26.09.2025).

3. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов. *Атомная энергия*. 2016;120(1):270-276. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/508> (дата обращения: 26.09.2025).

Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Samoilo O.B. Methods of substantiation of thermal reliability of the core of thermal water reactors. *Atomic Energy*. 2016;120(1):270-276. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/508> (accessed: 26.09.2025).

4. Margolin B.Z., Yurchenko E.V., Morozov A.M. et al. Analysis of relationship between the radiation embrittlement mechanisms and the influence of neutron flux in respect of VVER reactor pressure vessel materials. *Strength of Materials*. 2013;45:406-423. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9473-y>

5. Гусев Н.Г., Ковалев Е.Е., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т.2 Защита от излучений ядерно-технических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001550413?ysclid=mix5ypo831331576284> (дата обращения: 26.09.2025).

Gusev N.G., Kovalev E.E., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. Protection against ionizing radiation: In 2 volumes V.2 Protection against radiation of nuclear technical installations. Moscow: Energoatomizdat. 1990. 352 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001550413?ysclid=mix5ypo831331576284> (accessed: 26.09.2025).

6. Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. 28-31 мая 2024 г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. 2024. 142 с. Режим доступа: https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (дата обращения: 26.09.2025).

Neutron-physical problems of nuclear energy: Collection of abstracts of reports of the scientific and technical conference. May 28-31, 2024, Obninsk, SSC RF – IPPE JSC. 2024. 142 p. (In Russ.). Available at: https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (accessed: 26.09.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Васяткин А.Г. – изучение литературных источников по теме статьи, разработка методического подхода, написание текста статьи;

Белин А.В. – анализ предметной области и результатов экспериментов, редактирование текста статьи;

Соснин М.А. – анализ предметной области и результатов экспериментов, редактирование текста статьи;

Молодцов А.А. – постановка задачи, проверка результатов, редактирование текста статьи;

Камнев М.А. – окончательное редактирование и одобрение варианта статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Vasyatkin A.G. – studying references on the topic of the article, developing a methodological approach, writing the article text;

Belin A.V. – analyzing the subject area and experiment results, editing the text of the article text;

Sosnin M.A. – analyzing the subject area and experiment results, editing the text of the article text;

Molodtsov A.A. – setting the objective, checking the results, editing the text of the article text;

Kamnev M.A. – final editing and approval of the article version.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The authors declare no funding sources.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Анатолий Геннадьевич Васяткин, заместитель начальника лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: a.g.vasyatkin@yandex.ru

Алексей Владимирович Белин, начальник службы СУЗ лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: rk3tj@yandex.ru

Михаил Александрович Соснин, начальник бюро СУЗ и электрооборудования лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: m.a.sosnin@okbm.nnov.ru

Антон Анатольевич Молодцов, кандидат технических наук, заместитель начальника НИИК по научным исследованиям и безопасности АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: dep105@okbm.nnov.ru

Михаил Анатольевич Камнев, кандидат технических наук, начальник НИИК АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: kamnev@okbm.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anatolii G. Vasyatkin, Deputy Head of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: a.g.vasyatkin@yandex.ru

Aleksei V. Belin, Head of the CPS Service of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: rk3tj@yandex.ru

Mikhail A. Sosnin, Head of the CPS and Electrical Equipment Group of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: m.a.sosnin@okbm.nnov.ru

Anton A. Molodtsov, Can. Sci. (Engin.), Deputy Head of the Scientific Research and Testing Complex for Scientific Researches and Safety of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: dep105@okbm.nnov.ru

Mikhail A. Kamnev, Can. Sci. (Engin.), Head of the Scientific Research and Testing Complex of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: kamnev@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию / Received 27.10.2025

После доработки / Revision 09.02.2026

Принята к публикации / Accepted 12.02.2026