

**ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ / NUCLEAR POWER PLANTS, FUEL CYCLE, RADIATION SAFETY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160>

**РОЛЬ ВИРТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОПТИМИЗАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА**

Научная статья

**Завадский Д.И.<sup>1,\*</sup>, Ташлыков О.Л.<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>1,2</sup> Уральский Федеральный Университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (danilezavadsky[at]gmail.com)

**Аннотация**

В данной работе рассматривается создание трехмерной виртуальной модели нескольких помещений энергоблока с реактором на быстрых нейтронах БН-600. Представленная 3D-модель используется для проведения эксперимента по обучению персонала с целью оптимизации радиационной защиты. В качестве инструментов используются комплексы для трехмерного и информационного моделирования: Autodesk Revit и Autodesk 3ds Max. В основе эксперимента лежит принцип маршрутной оптимизации. С помощью интерактивных материалов (3D-модели) производится обучение персонала, а затем замеряется время на маршрутах следования. Результатом эксперимента является сравнение продолжительности основных маршрутных операций до и после использования виртуальных технологий для обучения персонала. Таким образом, демонстрируется возможность снижения продолжительности операций в полях ионизирующего излучения, и, как следствие, снижение индивидуальной и коллективной доз персонала.

**Ключевые слова:** оптимизация радиационной защиты, 3D-моделирование, маршрутная оптимизация, дозовая нагрузка, виртуальные технологии.

**THE ROLE OF VIRTUAL TECHNOLOGIES IN OPTIMIZING RADIATION PROTECTION OF PERSONNEL**

Research article

**Zavadskii D.I.<sup>1,\*</sup>, Tashlykov O.L.<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (danilezavadsky[at]gmail.com)

**Abstract**

This paper deals with the creation of a 3D virtual model of several rooms of a BN-600 power unit. The presented 3D model is used to conduct an experiment on personnel training to optimize radiation protection. The tools used are complexes for 3D and information modeling: Autodesk Revit and Autodesk 3ds Max. The experiment is based on the principle of route optimization. With the help of interactive 3D-model, the personnel are trained and then the time on the routes is measured. The result of the experiment is a comparison of the main route operations duration before and after using virtual technologies for personnel training. Thus, the possibility of reducing the duration of operations in the ionizing radiation fields and, as a consequence, reducing individual and collective doses of personnel is demonstrated.

**Keywords:** radiation protection optimization, 3D modeling, route optimization, dose load, virtual technologies.

**Введение**

Атомная энергетика является одной из важных отраслей промышленности, которая обеспечивает значительную часть мировой потребности в электроэнергии. Однако большая часть АЭС была спроектирована и построена еще в прошлом столетии, что существенно усложняет поиск необходимых данных и увеличивает время по планированию работ на производстве, в том числе радиационно-опасных. В связи с этим в промышленности и в атомной энергетике, в частности, активно ведутся процессы виртуализации и цифровизации производства. Виртуализация позволяет создать виртуальную модель АЭС, которая может быть использована для проведения различных исследований и экспериментов, а также для обучения персонала. Цифровизация позволяет перевести все данные об АЭС в цифровой формат, что делает их более доступными и удобными для обработки [1].

Белоярская атомная станция одной из первых среди атомных станций концерна Росэнергоатом приступила к переводу архивов в «цифру».

Внедрение информационной системы планируется на девяти российских атомных электростанциях до конца 2024 года. В перспективе система может использоваться и на зарубежных АЭС российского дизайна. Создание системы является частью масштабной программы по цифровизации атомной энергетической отрасли. Система позволит осуществлять сбор данных о различных объектах, в том числе и для создания цифровых двойников оборудования. Цифровые двойники – это виртуальные модели реальных объектов, которые позволяют отслеживать их состояние и прогнозировать возможные неисправности. Кроме того, в систему будет внедрена цифровая система контроля производства. Она позволит осуществлять обходы оборудования с использованием мобильных устройств и контролировать прохождение маршрутов обхода. Это повысит эффективность и безопасность технического обслуживания и ремонта оборудования [2].

В представленной работе демонстрируется ряд экспериментов, направленных на перспективы применения виртуальных технологий в части оптимизации радиационной защиты персонала при выполнении ремонтных работ.

### Оптимизация радиационной защиты

Одним из трех главных принципов, лежащих в основе защиты от ионизирующих излучений, является принцип оптимизации радиологической защиты. Применение на практике принципа оптимизации, заключающегося в том, что предпринимаются все разумные усилия в целях снижения доз (с учетом социальных и экономических факторов), связано со значительными усилиями [3, С. 87–88].

Возможностью реализации данного принципа является оптимизация состава композитных радиационно-защитных материалов (РЗМ) применительно к планируемым условиям облучения. Зависимость поглощающей способности защитных материалов от энергии гамма-квантов, испускаемых изотопами, входящими в состав радиоактивных загрязнений, определяет возможность реализации принципа оптимизации при проектировании состава однородных РЗМ. В свою очередь, радиоизотопный состав зависит от многих факторов, таких как тип реакторной установки, режимы эксплуатации, время, прошедшее с момента остановки реактора [4, С. 53]. Кроме оптимизации состава РЗМ, существуют и другие способы реализации принципа оптимизации в радиационной безопасности. Одним из них является сокращение времени пребывания персонала в радиационных полях. Это может быть достигнуто за счет проведения тренировок на тренажерах и в виртуальной реальности, создания виртуальных моделей и обучающих материалов на их основе, а также размещения различных схем, указателей, подсказок и т.д. непосредственно на объекте. Реализация принципа оптимизации в радиационной безопасности позволяет снизить риск облучения персонала и населения, а также обеспечить более безопасные условия работы в полях ионизирующего излучения [5, С. 44].

Виртуальная модель позволит моделировать различные режимы работы АЭС и оптимизировать их для повышения экономической эффективности, в том числе в части выполнения ремонтных работ в полях ионизирующего излучения [6, С. 3].

В процессе оптимизации радиационной защиты, помимо технических мероприятий, значительную роль играют также организационные. Они тесно взаимосвязаны между собой и являют собой систему распределения обязанностей в части планирования радиационной защиты. Структура представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

Критерий ALARA (англ. As Low As Reasonably Achievable – настолько низко насколько это достижимо), включает в себя определенные цели по оптимизации радиационной защиты. Эти цели могут быть установлены, например, в виде максимальных индивидуальных доз и целевых уровней коллективных доз [7].

Работа сотрудников на АС связана со взаимодействием со сложным или опасным оборудованием, с вредными и опасными производственными факторами, а также с работой в полях ИИ. Следовательно, персонал подвержен риску. Поэтому необходимы навыки для работы в такого рода условиях, а также следования принципам и критериям радиационной защиты. О возможности сокращения рисков и ущерба при помощи цифровых технологий виртуального моделирования речь пойдет далее.



Рисунок 1 - Структурная схема процессов по оптимизации радиационной защиты

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.1>

### Методы и инструменты исследования

Используемый в данной статье тип объемного моделирования можно отнести к трехмерному BIM моделированию (англ. Building Information Model – информационная модель здания). Трехмерное BIM-моделирование – это один из

видов объемного моделирования, который используется для создания информационной модели здания. В отличие от традиционного двумерного черчения, BIM-моделирование позволяет проектировщикам создавать реалистичные трехмерные модели зданий, которые точно отображают их геометрию, структуру и свойства материалов. Это упрощает процесс проектирования и позволяет выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях, что экономит время и деньги. BIM используется не только для проектирования зданий, но и для строительства и эксплуатации. Подрядчики могут использовать BIM-модели для планирования строительства, управления строительными работами и отслеживания прогресса строительства. Эксплуатационники могут использовать BIM-модели для управления зданием, мониторинга его состояния и планирования технического обслуживания. BIM – технология относительно новая, но она быстро развивается и становится все более популярной. Уже сейчас данный тип моделирования играет большую роль в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий, поскольку позволяет улучшить качество и эффективность этих процессов.

Реализация трехмерных информационных моделей для эксперимента производилась при помощи программного обеспечения компании Autodesk: 3dsMax и Revit.

*Использовались студенческие версии программ, до того, как компания Autodesk ограничила поддержку пользователей из России.*

Разработанное компанией Autodesk, 3ds Max предоставляет мощные инструменты для создания высококачественных трехмерных моделей, анимаций и фотореалистичных изображений. Одной из ключевых особенностей 3ds Max является обширный инструментарий, который позволяет пользователям создавать любые необходимые анимации – от простейших (обход, обзор помещений) до сложных, демонстрирующих работу узлов оборудования. Программа также позволяет импортировать модели из других программ, таких как Revit, и полностью совместима с ними, что позволяет легко интегрировать данные из различных источников. 3ds Max также славится своими возможностями визуализации. Важным преимуществом 3ds Max является его способность работать с большими структурами. Благодаря встроенным инструментариям, таким как оптимизация сцены и использование прокси-объектов, программа позволяет эффективно моделировать и визуализировать даже самые сложные объекты. Благодаря своим обширным возможностям моделирования, анимации и визуализации программа широко используется в различных отраслях и является одним из ведущих решений в области 3D-графики [8, С. 10].

Autodesk Revit представляет собой передовое программное обеспечение для автоматизированного проектирования, предназначенное для архитекторов, конструкторов и инженеров-проектировщиков. Применяя принцип информационного моделирования зданий, Revit позволяет создавать и редактировать виртуальные трехмерные модели объектов в режиме реального времени. Одной из ключевых особенностей является ориентированность на совместную работу над проектом. Используя общие рабочие наборы, пользователи могут одновременно вносить изменения в модель, повышая эффективность и скорость проектирования. Программа отслеживает все изменения и автоматически обновляет чертежи, спецификации и другие связанные документы в соответствии с внесенными изменениями. Revit поддерживает широкий спектр элементов строительства, включая стены, перекрытия, фундаменты, окна, двери, инженерные сети и многое другое. Обширный каталог библиотек с готовыми элементами позволяет сократить время проектирования, а возможность создания пользовательских объектов еще больше расширяет возможности. Встроенный редактор позволяет создавать любые необходимые, нестандартные единицы оборудования, и дополнять ими существующие библиотеки. Autodesk Revit не только позволяет создавать трехмерные модели, но и включает в себя инструменты для разработки плоских чертежей, обеспечивая возможность оформления рабочих чертежей, разрезов, планов и других документов, необходимых для строительства. Его возможности позволяют вести весь проект строительства от концепции до конечной реализации.

Разработка информационных моделей производилась на основании сборочных чертежей, технологических схем, инструкций по эксплуатации и нормативной документации.

В данной работе рассматривается создание 3D-BIM модели помещений 3-го контура энергоблока БН-600 и использование её для обучения персонала. Помещения находятся в зоне свободного доступа (ЗСД), при нормальной работе блока облучения персонала исключено. В данных помещениях располагаются трубопроводы и арматура обвязки парогенераторов ПГН-200М по 3-му контуру (см. рис. 2, рис. 3).

Каждая петля циркуляции по третьему контуру включает парогенератор, турбоустановку К-210-130, трубопроводы и оборудование вспомогательных систем. Питательные узлы парогенераторов представляют собой комплекс оборудования, обеспечивающий подачу питательной воды в парогенератор в соответствии с требованиями технологического процесса. В состав питательного узла входят: питательные насосы, напорные трубопроводы, регулирующие клапаны, механические фильтры, дренажные трубопроводы, контрольно-измерительные приборы и арматура. В соответствии с петлевой структурой третьего контура, каждый питательный узел независимо обеспечивает подачу питательной воды в соответствующий парогенератор. Питательная вода от насосов поступает через напорные трубопроводы на питательный узел петли, где через механические фильтры и регулирующие клапаны распределяется по половинам парогенератора. Трубопроводы, подводящие питательную воду к испарительным модулям, подключаются к этим линиям параллельно. Поступая в водяные камеры испарительных модулей, питательная вода проходит через узел дроссельных шайб, установленных на входе в каждую трубку трубного пучка, и, двигаясь внутри труб снизу вверх, нагревается до насыщения, испаряется и пар перегревается. Из верхних камер испарительных модулей пар отводится в сборный коллектор и по перепускным линиям (две на парогенератор) направляется в раздающий коллектор, оттуда подводится к верхним камерам перегревателей модулей. На перепускных линиях вне бокса парогенератора установлены запорные задвижки для отсечения пароперегревателей. После модулей основных перегревателей перегретый пар высокого давления направляется в сборный коллектор острого пара и далее – к турбине [9, С. 210–214].

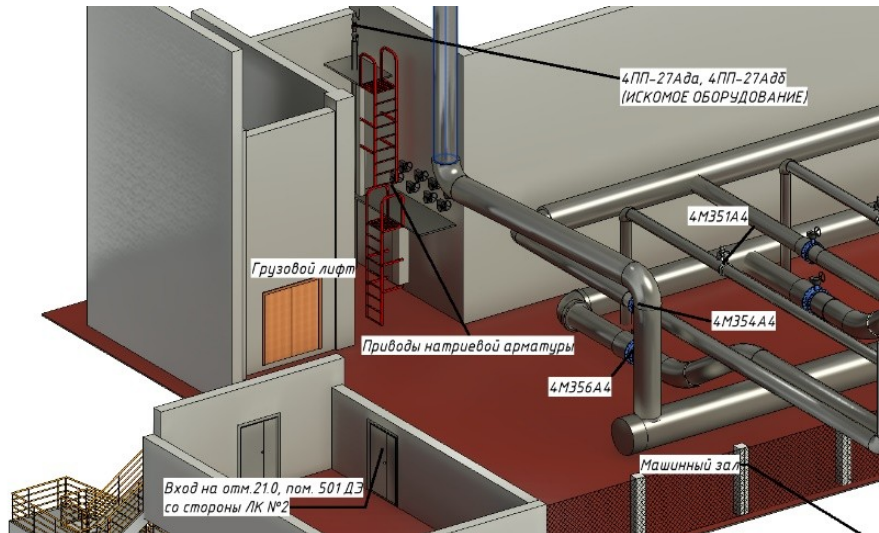


Рисунок 2 - Виртуальная модель помещений парогенератора АЭС с РУ БН-600  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.2>

### Виртуальные технологии в атомной энергетике

Виртуальная реальность (VR) продолжает находить все большее применение в различных отраслях, и Ленинградская АЭС – прекрасный пример использования этой технологии для обучения персонала. В декабре 2021 года на Ленинградской АЭС-2 был внедрен VR-тренажер, предназначенный для обучения персонала электроцеха по эксплуатации и обслуживанию комплектного распределительного устройства (КРУ-10кВ). Это уникальное цифровое решение позволяет значительно сократить время обучения, улучшить качество подготовки и повысить квалификацию персонала АЭС. Важным преимуществом VR-тренажера является возможность обучения в безопасной виртуальной среде, что снижает риск травм и несчастных случаев. Также он способствует безаварийной работе с энергоблоками и оборудованием. Разработкой программно-аппаратного комплекса занималась команда КРОК «Иммерсивные технологии». Они реализовали тренажер на базе отечественной операционной системы Astra Linux в рамках программы цифровизации атомной отрасли. VR-тренажер включает 6 сценариев, которые позволяют персоналу регулярно отрабатывать практические навыки по эксплуатации и обслуживанию электрооборудования. Тренажер виртуальной реальности для персонала АЭС представляет собой цифровую копию двух основных локаций станции и более 500 моделей оборудования, инструментов и объектов в помещениях. Сценарии тренажера разработаны с учетом инструкций, регламентов, бланков и программ переключений, что позволяет обучающимся максимально приблизиться к реальным условиям работы. За счет этого сотрудники при обучении погружаются в виртуальное рабочее место и отрабатывают навыки производства работ. Это позволяет повысить уровень их осознанности при работе на реальном оборудовании и снизить риски возникновения инцидентов и аварийных ситуаций [10, С. 56-57].

### Описание эксперимента и основные результаты

За последние 15 лет после перехода к дозовым пределам, согласно НРБ-99/2009, усредненные значения коллективной дозы облучения персонала всех АЭС России в пересчете на один энергоблок уменьшились приблизительно в 3 раза. Исключено несанкционированное превышение индивидуальной дозы облучения 18 мЗв в год [11, С. 21].

Белоярская АЭС, при этом, показательно занимает лидирующую позицию и показывает минимальные индивидуальные и коллективные дозы, на уровне с новыми блоками Ленинградской АЭС-2 и Ростовской АЭС.

Согласно публикации Международной комиссии по радиологической защите: установление референтных уровней позволяет оптимизировать радиационную защиту и снизить радиационные риски для населения. Усиление принципа оптимизации радиационной защиты является важным шагом в области радиационной безопасности. Оно позволит обеспечить более высокий уровень защиты населения и работников от радиационных рисков [12].

Основываясь на положительной динамике в части оптимизации радиационной защиты персонала на АЭС, дальнейшее снижение индивидуальных и дозовых нагрузок должно определяться внедрением и реализацией комплекса мероприятий. Управление индивидуальными и коллективными рисками облучения в АО «Концерн Росэнергоатом» производится согласно «Программе оптимизации радиационной защиты персонала на АЭС» (2020–2024 гг.), а в Госкорпорации «Росатом» действуют МУ 2.6.5.054-2017 «Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий».

Организация работы на атомных электростанциях является неотъемлемой частью успешного управления профессиональным облучением. Это процесс, который требует тщательного планирования и координации деятельности сборной команды работников различных служб, а также полного наблюдения за выполнением работ на всех этапах для достижения общей цели – безопасной и эффективной работы станции. Таким образом, организация работы на атомных электростанциях является ключевым фактором успешного управления профессиональным облучением. Тщательное планирование, контроль за выполнением работ и соблюдение мер радиационной защиты помогают обеспечить безопасность и эффективность работы на электростанции [13].

Одним из главных элементов процесса планирования является возможность доступа к информационной модели, содержащей в себе данные по радиационным параметрам в координатах помещений, особенностям и характеристикам оборудования, а также использования опыта эксплуатации. Ранее – в 20 веке, при проектировании и возведении энергоблоков АЭС, эксплуатируемых в настоящее время, в качестве носителя информации использовалась бумага (техническая документация, чертежи), что значительно затрудняет поиск необходимой информации, увеличивает время планирования радиационно-опасных работ. Внедрение виртуальной цифровой модели позволяет оптимизировать и сократить время планирования.

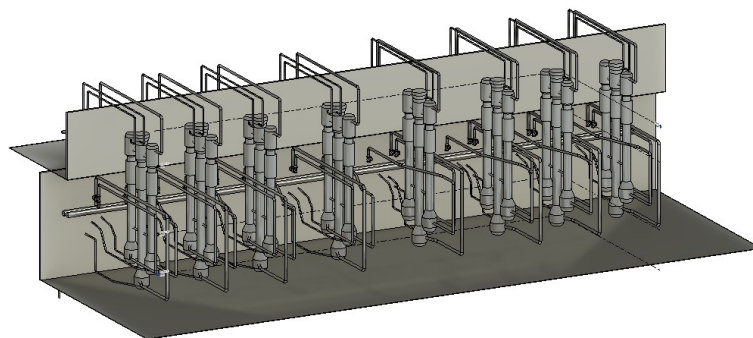


Рисунок 3 - Виртуальная модель помещений парогенератора АЭС с РУ БН-600

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.3>

Результаты проведенных в течение 2021 г. экспериментов по замеру времени, затрачиваемого работниками на перемещение к месту выполнения работ, в том числе продолжительности регламентных обходов «неопытного» эксплуатационного персонала, показали значительное превышение темпов сокращения этого времени за счет тренировок с использованием разработанных виртуальных моделей помещений по сравнению с темпами сокращения времени без таких рода тренировок. Для демонстрации и обучения использовалась трехмерная информационная модель, показанная на рисунках 2 и 3.

Площадкой для экспериментов и выполнения временных замеров служили производственные помещения зоны свободного доступа, для исключения непланируемого облучения персонала.

В процессе эксплуатации атомной электростанции неизбежно возникают ситуации, когда требуется проведение ремонтных работ. Для успешного и своевременного выполнения ремонта необходимо быстро и точно найти необходимое оборудование. Однако, в условиях сложной планировки помещений и оборудования АЭС, этот процесс может занимать значительное время. Для решения этой проблемы предлагается использовать виртуальные модели с указанием четких координат расположения оборудования. Такие модели позволяют ремонтным бригадам быстро и точно находить необходимое оборудование, что значительно ускоряет процесс ремонта. Кроме того, использование виртуальных моделей позволяет оптимизировать процесс поиска оборудования в ЗКД (зоне контролируемого доступа). Значительная часть работ по ремонту и обслуживанию оборудования проводится в ЗКД, поэтому оптимизация этого процесса положительно скажется на показателях индивидуальной и коллективной эффективной дозы.

Проведенные на площадке эксперименты показали следующий результат. Временные затраты на поиск оборудования составили от 14 до 56 минут, для неподготовленного персонала (см. таблицу 1).

В течение капитального ремонта 30.07.2021-07.09.2021 энергоблока с РУ БН-600 удалось произвести 8 корректных замеров времени до проведения обучения. Затем были произведены ещё 8 замеров, но уже с поправкой на предварительную подготовку.

Таблица 1 - Замеры времени маршрутов следования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.4>

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	~
Время фактическое, мин	56	37	21	33	27	14	27	15	28
Время оптимизированное,	13	25	15	17	23	11	15	15	17

МИН									
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--

*Примечание: фактическое время – время с момента получения допуска рембригады на работу, до момента, когда рембригада приступила к работе, т.е. время, затраченное на поиск необходимого оборудования. Оптимизированное время – время, затраченное на поиск оборудования обученным персоналом*

В таблице 1 и на рисунке 4 показано, что фактическое время, затрачиваемое на поиск оборудования, в среднем на 60% больше, чем планируемое. Это связано с тем, что в реальных условиях приходится сталкиваться с рядом факторов, которые не всегда можно учесть при планировании работ. Например, ориентация в технологически сложных помещениях, в условиях воздействия ионизирующего излучения, может значительно усложнить поиск оборудования.

В атомной промышленности персонал регулярно сталкивается с необходимостью проведения ремонтных и технических работ в радиационно-опасных помещениях. Для обеспечения безопасности и эффективности этих работ необходимо предоставить сотрудникам соответствующие знания и обучить необходимым навыкам. Традиционные методы обучения, такие как лекции, семинары и практические занятия, имеют ряд недостатков. Они требуют значительных затрат времени и ресурсов, а также не всегда позволяют эффективно имитировать реальные условия работы в радиационно-опасных помещениях. Одним из перспективных методов обучения персонала в атомной промышленности является использование виртуальных методик. Виртуальные методики позволяют создавать интерактивные среды, в которых сотрудники могут изучать оборудование, отрабатывать навыки работы и принимать решения в условиях, максимально приближенных к реальным. Дополнительно, виртуальные модели могут быть использованы для разработки различных типов учебных материалов: видеолекций, фотографий и рендер-моделей.

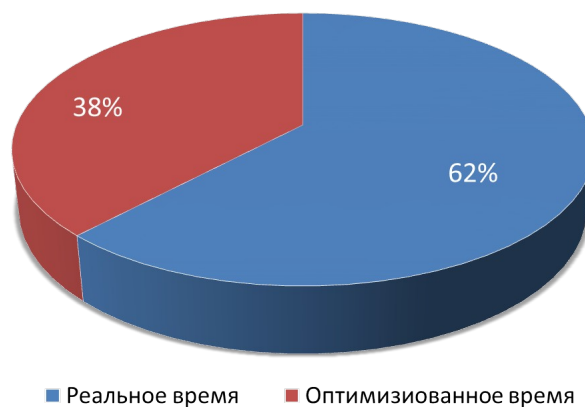


Рисунок 4 - Замеры времени маршрутов следования  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.5>

Виртуальные модели также могут использоваться для обучения персонала. Ремонтные бригады могут использовать их для изучения расположения оборудования и отработки процедур поиска и ремонта. Это позволит повысить квалификацию персонала и сократить время проведения ремонта. Таким образом, использование виртуальных моделей с указанием чётких координат расположения оборудования позволяет оптимизировать процесс поиска оборудования на АЭС, что приводит к сокращению времени проведения ремонта, повышению квалификации персонала и уменьшению дозовой нагрузки.

В перспективе, помимо оптимизации радиационной защиты персонала, исследуемая виртуальная модель может быть использована для проведения работ по продлению срока эксплуатации АЭС. Начиная с 2022 года ожидаются глобальные работы, например, замена модулей парогенератора и холодных фильтр-ловушек, а также замена выемных частей главных циркуляционных насосов. Операция по замене модулей парогенератора уже выполнялась в 2006-2008 годах в рамках предыдущего продления срока эксплуатации блока. Для описанных выше работ каждый элемент атомной станции можно представить в цифровом варианте, в виде специальной информационной модели, где будут содержаться все необходимые данные за весь срок эксплуатации. С возможностью просмотра архива динамики ремонтов и эксплуатации оборудования.

#### **Анализ эксперимента**

Оптимизацию радиационной защиты можно значительно усовершенствовать, если использовать виртуальные модели радиационно-опасных объектов. Это позволит решать задачи маршрутной оптимизации, что, в конечном счете, приведет к уменьшению дозы облучения при проведении комплекса мероприятий.

Основной целью решения задач маршрутной оптимизации является нахождение минимума функционала качества – суммарной дозы облучения при выполнении комплекса работ в нестационарных радиационных полях [14, С. 32].

$$\sum_{i=1}^n \dot{H}_i \times t_i \rightarrow \min \quad (1)$$

где:

$\dot{H}_i$  – мощность дозы в  $i$ -ой изодозной области,

$t_i$  – время нахождения человека в  $i$ -той изодозной области.

Следуя формуле (1), легко установить – снижение количества времени, проводимого персоналом в полях ИИ, приводит к снижению величин индивидуальной и коллективной доз.

Данные, представленные в таблице 2, относятся к периоду средних и капитальных ремонтов, в сравнении с 2016 по 2021 год. Сравнительные величины по годам колеблются в одном диапазоне, следовательно, в таблице отсутствует распределение по году, данные просуммированы.

Сопоставив величины из таблицы 2 и результаты экспериментов таблицы 1 при помощи формулы (1), можно представить вероятное снижение коллективной дозы персонала при внедрении методики предварительного обучения персонала перед выполнением работ в полях ИИ. Основываясь на виртуальной цифровой модели помещений энергоблока. Суммарная эффективная доза облучения прямопропорциональна по отношению ко времени, проведенному в полях ИИ, следовательно, снижение составит примерно 60%. При условии равномерности и неизменности мощности дозы в некоторой области.

Пути сокращения коллективной и индивидуальной доз облучения персонала:

- снижение количества персонала, необходимого для выполнения работ в полях ИИ;
- снижение времени выполнения работ путём использования труда высококвалифицированного персонала;
- разработка, планирование и оптимизации маршрутов следования персонала;
- улучшение условий труда на рабочих местах (вентиляция, освещение);
- проведение подготовительных работ в «чистых» зонах в отсутствии ИИ.

Таблица 2 - Дозовые нагрузки в период ремонта, данные 2016 – 2021 гг.

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.160.6>

Число лиц, получивших эффективную дозу облучения	Наименование подразделения			
	Реакторный цех	Цех ремонта	Цех автоматики	Атомремонт
0–0,1 мЗв	56	273	217	321
0,1–0,5 мЗв	8	65	21	24
0,5–1 мЗв	1	45	1	17
1–2 мЗв	0	39	0	23
2–5 мЗв	0	11	0	14
Более 5 мЗв	0	0	0	1
Коллект доза, чел*Зв	0,0059	0,1639	0,0179	0,1223
Коллект доза, чел*Зв при оптимизации	0,0037	0,1024	0,0112	0,0764

### Заключение

Применение виртуальных технологий на АЭС становится все более актуальным и важным. Внедрение этих технологий позволяет решать различные задачи, связанные с проектированием, эксплуатацией и выводом из эксплуатации АЭС, тем самым повышая безопасность и эффективность работы станции. Одним из наиболее перспективных направлений использования виртуальных технологий на АЭС является применение систем автоматизированного проектирования (САПР). Эти программы позволяют создавать трехмерные модели объектов, которые могут использоваться для проведения различных расчетов, анализа и оптимизации. Исследуемая 3D-BIM модель может использоваться на всех этапах жизненного цикла АЭС, от проектирования до вывода из эксплуатации. С ее помощью можно решать множество задач по маршрутной оптимизации, оптимизации радиационной защиты персонала, планированию графика ремонта оборудования и составлению смет. Помимо этого, современные IT-технологии позволяют использовать 3D-BIM модель для создания VR-тренажеров, которые могут использоваться для обучения персонала. Внедрение виртуальных технологий на АЭС имеет ряд преимуществ, в том числе:

1) повышение эффективности и скорости обучения персонала;

2) снижение стоимости производства 1кВт электроэнергии;

3) повышение коэффициента использования установленной мощности [11]. Таким образом, внедрение виртуальных технологий на АЭС является важным и перспективным направлением, которое позволит повысить безопасность и эффективность работы станции. Ожидается, что виртуальные модели АЭС будут использоваться не только для проведения исследований и экспериментов, но и для управления АЭС в режиме реального времени.

Цифровые данные об АЭС будут использоваться для создания систем искусственного интеллекта, которые будут помогать персоналу АЭС принимать решения и предотвращать аварии. Виртуализация и цифровизация позволят вывести атомную энергетику на новый уровень безопасности, эффективности и экономичности.

Применение BIM-модели позволяет:

- 1) создать единую информационную среду для всех участников проекта, включая проектировщиков, строителей, эксплуатационников и ремонтников;
- 2) повысить качество и точность проектирования, строительства и эксплуатации АС;
- 3) сократить сроки строительства и модернизации АС;
- 4) оптимизировать затраты на строительство и эксплуатацию АС;
- 5) обеспечить безопасность и надежность эксплуатации АС.

Однако внедрение BIM-модели в АС сопряжено с рядом проблем. К примеру, с необходимостью использования специализированного программного обеспечения, которое может быть достаточно дорогим и обучения персонала работе с BIM-моделью, а с также недостатком опыта внедрения BIM-модели в АС. Несмотря на эти проблемы, внедрение BIM-модели в АС является перспективным направлением, которое позволит повысить эффективность и безопасность эксплуатации АС.

В рамках импортозамещения в России разрабатываются собственные программные продукты для 3D-моделирования, которые могут быть использованы для внедрения BIM-модели в АС. Эти продукты обладают всеми необходимыми функциями для создания, редактирования и визуализации трехмерных моделей. Внедрение отечественных программных продуктов для 3D-моделирования в АС позволит повысить безопасность и надежность эксплуатации АС, снизить зависимость от иностранных IT-компаний и сэкономить средства на закупку программного обеспечения.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Золотов А. Быстрый нейтрон / А. Золотов, С. Тен, Р. Топорков [и др.] // Приложение к газете «Быстрый нейтрон». — 2020. — № 1. — С. 22.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / под общей ред. Киселёва М. Ф., Шандалы Н. К. — Москва : ООО ПКФ «Алана», 2009. — 344 с.
3. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация // О. Л. Ташлыков. — Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co RG, 2011. — 232 с.
4. Завадский Д. И. Использование BIM-проектирования при планировании радиационно-опасных работ / Д. И. Завадский, О. Л. Ташлыков // Ядерные технологии: от исследований к внедрению. — Нижний Новгород, 2019. — С. 44–45.
5. МУ 2.6.5.054-2017. Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий Госкорпорации «Росатом». Методические указания. — Введ. 01.01.2018. — Москва : Федеральное медико-биологическое агентство, 2017. — 52 с.
6. Горелик А. Г. Самоучитель 3ds Max 2018 / А. Г. Горелик. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2018. — 528 с.
7. Бельтюков А. И. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : учебное пособие / А. И. Бельтюков, А. И. Карпенко, С. А. Полуяктов [и др.] — Екатеринбург : УрФУ, 2013. — 548 с.
8. В промышленную эксплуатацию введен первый виртуальный тренажер на АЭС // Автоматизация и IT в энергетике. — 2022. — С. 56–57.
9. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков. — Екатеринбург : Урал, 2018. — 352 с.
10. Организация работы в целях оптимизации радиационной защиты от профессионального облучения на атомных электростанциях // Публикация ОЭСР. — Париж, 2009. — 114 с.
11. Кропачев Ю. А. Подсистема автоматизированной обработки данных нерегламентных измерений радиационной обстановки / Ю. А. Кропачев, О. Л. Ташлыков, А. Н. Сесекин [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. — 2019. — № 3(93). — С. 26–35.
12. Nosov U. V. Decommissioning Features of BN-350, -600 Fast Reactors / U. V. Nosov, A.V. Rovneiko, O. L. Tashlykov [et al.] // Atomic Energy. — 2019. — Vol. 125. — Issue 4. — P. 219–223.
13. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Annals of the ICRP. — 2007. — Vol. 37. — № 2-4.
14. Zavadskii D. I. Optimization of radiation protection of staff using BIM-designing / D. I. Zavadskii, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings 2313. — 2019. — P. 210–225.



### Список литературы на английском языке / References in English

1. Zolotov A. Bystryj nejtron [Fast neutron] / A. Zolotov, S. Ten, R. Toporkov [et al.] // Prilozhenie k gazete «Bystryj nejtron» [Appendix to the newspaper "Fast Neutron"]. — 2020. — № 1. — P. 22. [in Russian]
2. Publikacija 103 Mezhdunarodnoj Komissii po radiacionnoj zashhite (MKRZ) [Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP)] / under the general editorship of N. M. Kiselyov. F., Shandalov N. K. — Moscow : LLC PKF "Alana", 2009. — 344 p. [in Russian]
3. Tashlykov. O. L. Dozovye zatraty personala v atomnoj jenergetike. Analiz. Puti snizhenija. Optimizacija [Dose delays of personnel in the nuclear power industry. Analysis. Ways of reduction. Optimization] // O. L. Tashlykov. — Saarbrücken : Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co RG, 2011. — 232 p. [in Russian]
4. Zavadsky D. I. Ispol'zovanie BIM-proektirovaniya pri planirovanii radiacionno-opasnyh rabot [The use of BIM-design in planning radiation-hazardous work] / D. I. Zavadsky, O. L. Tashlykov // Jadernye tehnologii: ot issledovanij k vnedreniju [Nuclear technologies: from research to implementation]. — Nizhny Novgorod, 2019. — P. 44–45. [in Russian]
5. MU 2.6.5.054-2017. Optimizacija radiacionnoj zashhity personala predpriyatij Goskorporacii «Rosatom». Metodicheskie ukazaniya [Optimization of radiation protection of personnel of Rosatom State Corporation enterprises. Methodological guidelines]. — Introd. 01.01.2018. — Moscow : Federal Medical and Biological Agency, 2017. — 52 p. [in Russian]
6. Gorelik A. G. Samouchitel' 3ds Max 2018 [Tutorial 3ds Max 2018] / A. G. Gorelik. — St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2018. — 528 p. [in Russian]
7. Beltyukov A. I. Atomnye jelektrostantsii s reaktorami na bystryh nejtronah s natrievym teplonositelem [Nuclear power plants with fast neutron reactors with sodium coolant] : textbook / A. I. Beltyukov, A. I. Karpenko, S. A. Poluyaktov [et al.] — Yekaterinburg : UrFU, 2013. — 548 p. [in Russian]
8. V promyshlennuju jekspluataciju vveden pervyj virtual'nyj trenazher na AJeS [The first virtual simulator at the NPP was put into commercial operation] // Avtomatizacija i IT v jenergetike [Automation and IT in the energy sector]. — 2022. — P. 56–57. [in Russian]
9. Tashlykov O. L. Remont oborudovaniya atomnyh stancij [Repair of nuclear power plant equipment] : textbook / O. L. Tashlykov. — Yekaterinburg : Ural, 2018. — 352 p. [in Russian]
10. Organizacija raboty v celjah optimizacii radiacionnoj zashhity ot professional'nogo obluchenija na atomnyh jelektrostantsijah [Organization of work in order to optimize radiation protection from occupational exposure at nuclear power plants] // Publikacija OJeSR [OECD publication]. — Paris, 2009. — 114 p. [in Russian]
11. Kropachev Yu. A. Podсистема avtomatizirovannoj obrabotki dannyh nereglamentnyh izmerenij radiacionnoj obstanovki [Subsystem of automated data processing of non-routine measurements of the radiation situation] / Yu. A. Kropachev, O. L. Tashlykov, A. N. Sesekin [et al.] // Jadernaja i radiacionnaja bezopasnost' [Nuclear and radiation safety]. — 2019. — № 3(93). — P. 26–35. [in Russian]
12. Nosov U. V. Decommissioning Features of BN-350, -600 Fast Reactors / U. V. Nosov, A.V. Rovneiko, O. L. Tashlykov [et al.] // Atomic Energy. — 2019. — Vol. 125. — Issue 4. — P. 219–223.
13. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Annals of the ICRP. — 2007. — Vol. 37. — № 2-4.
14. Zavadskii D. I. Optimization of radiation protection of staff using BIM-designing / D. I. Zavadskii, O. L. Tashlykov // AIP Conference Proceedings 2313. — 2019. — P. 210–225.