

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.118.4.001

© 2025. Все права защищены.

ПРИМЕНЕНИЕ «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

Сафронова Н. Н.*, канд. экон. наук (safronova_nn@accni.ru)

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2025 г.

Аннотация

Высокая сложность технологических процессов вывода из эксплуатации (ВЭ) АЭС, постоянно повышающаяся динамика работ, большое количество факторов, влияющих на их качество, а также значительные убытки при отказе от оптимизации параметров технологического процесса демонтажа и утилизации конструктивных компонентов энергоблока определяют перспективный путь решения задачи по ВЭ АЭС путем имитационного моделирования различных вариантов выполнения практических работ.

Применение «цифровых двойников» для проектирования, определения технических решений и оптимизации работ по ВЭ АЭС является основным способом решения поставленной задачи. В сочетании с другими технологиями, такими как искусственный интеллект, это может существенно повысить эффективность комплексного процесса ВЭ АЭС.

Представлен анализ формирования «цифровых двойников» для решения задачи по ВЭ АЭС. Рассмотрен способ создания «цифровых двойников», и предложен подход к решению актуальной задачи комплексной оценки качества работ по ВЭ АЭС по критериям их безопасности, экологической приемлемости и экономической целесообразности.

► **Ключевые слова:** АЭС, вывод из эксплуатации, моделирование, техническое решение, «цифровые двойники», эффективность.

* Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли (АСКАО), Москва, Россия.

“DIGITAL TWINS” OF OBJECTS AND TASKS SOLVED DURING DECOMMISSIONING OF NPPS

Safronova N. N.*, Ph. D.

The article was received by the editors’ crew on November 5th, 2025.

Abstract

The high complexity of the technological processes of decommissioning NPPs, the constantly increasing dynamics of work, many factors affecting their quality, as well as significant losses if the parameters of the technological process for dismantling and disposing of structural components of a power unit are not optimized, determine a promising way to solve this problem by simulating various options for performing practical work.

The use of “digital twins” for the design and optimization of NPPs decommissioning is the main method of solving this problem. In combination with other technologies such as artificial intelligence, it can significantly improve the efficiency of the integrated decommissioning process of NPPs.

The analysis of the possibilities of methods for the formation of “digital twins” for decommissioning NPPs is considered. An approach to solving urgent problem of a comprehensive assessment of the quality of work on decommissioning NPPs according to the criteria of their safety, environmental acceptability and economic feasibility is proposed.

► **Keywords:** *NPPs, decommissioning, modeling, technical solution, “digital twins”, efficiency.*

* Association of Organizations of the Nuclear Industry Construction Complex (ASKAO), Moscow, Russia.

Введение

Актуальность и цель поиска лучшего решения практических технических задач по выводу из эксплуатации (ВЭ) АЭС в ближайшем будущем определяется тем, что жизненный цикл АЭС предполагает утилизацию, окончательное захоронение опасных радиоактивных материалов и изделий конструктивных компонентов энергоблока и его ликвидацию в целом. Техническая проблема ВЭ АЭС является актуальной для многих стран, использующих ядерные энергетические установки для обеспечения своей энергетической безопасности. По состоянию на начало 2025 г. в мире функционируют более 400 энергоблоков АЭС. Свыше 70 % этих энергоблоков имеют фактический срок своей службы¹ [1, 2] до 60 лет. Период плановой эксплуатации в 60 лет для большинства существующих ядерных энергетических установок является предельно допустимым по начальным проектным требованиям к ресурсу их безопасности² [3]. Поэтому в ближайшей перспективе ожидается массовый ВЭ АЭС по причине исчерпания ими фактического ресурса безопасности. К текущему моменту в мировой атомной энергетике выведено из эксплуатации более 200 энергоблоков АЭС, но большая часть площадок этих окончательно остановленных энергоблоков пока еще находится под надзором регулирующих органов. Техническая сущность ВЭ АЭС состоит в решении практических инженерных задач, имеющих целью прекращение всякой деятельности, связанной с функциональным предназначением ядерных энергетических установок, и конверсии ее площадки в экологически безопасное состояние, не требующее контроля со стороны национальных надзорных органов и МАГАТЭ.

Формирование и реализация технических решений по ВЭ АЭС представляют собой многофакторный процесс [4]. В составе этого процесса имитационное моделирование условий и возможных

последствий, рисков деятельности по окончательной ликвидации энергоблоков и их ядерного наследия. Верификация качества и социальной приемлемости такой деятельности имеет важное практическое значение для обоснования безопасности принимаемых технических решений. Основным требованием безопасности при ВЭ энергоблоков АЭС является защита работников и населения, окружающего мира от воздействия радиации в настоящее время и в будущем, а также обязательное представление обоснованного заключения об отсутствии опасности, приемлемости рисков от этой деятельности в национальные надзорные органы.

Создание технологий имитационного моделирования процессов ВЭ АЭС требует применения расчетных методов и адекватных физико-феноменологических и математических моделей³ технологических процессов и объектов, формирования и анализа «цифровых двойников» принимаемых технических решений. Для численной реализации имитационных моделей процессов, объектов и «цифровых двойников» технических решений необходимы данные мониторинга окружающей и внутренней среды⁴, которые постоянно изменяются с учетом процессов деградиационного старения конструктивных компонентов энергоблока АЭС. Это и обуславливает необходимость многократного использования «цифровых двойников» рассматриваемого технического решения, объекта или процесса ВЭ АЭС для обоснования безопасности выполнения практических работ по ликвидации энергоблока из-за постоянно изменяющихся обстоятельств в период его длительной окончательной остановки на заключительном периоде этапа ВЭ. Архитектура таких «цифровых двойников» предполагает конвергенцию уравнений динамики физических и химических процессов на базе физико-феноменологических моделей реальных технологи-

¹ Фактическое время этапа эксплуатации энергоблока в период всего его жизненного цикла соответствует понятийному определению: срок эксплуатации, в пределах которого все технические характеристики изделия удовлетворяют требованиям нормативной документации.

² Свойство энергоблока при ВЭ, согласно принятому проекту, для нормального режима и при нарушении нормального режима, включая аварии, ограничивать радиационное, а также другие сопровождающие его воздействия на работников, население и окружающую среду установленными пределами (уточнение термина, принятого в [3]).

³ Имитационная расчетная модель, позволяющая исследовать взаимосвязь между различными наблюдениями процессов и явлений при ВЭ, в соответствии с теорией безопасности сложных технических динамических систем и результатами обработки имитационных экспериментов, результаты которых пока не могут быть описаны существующими теориями в рамках существующих концепций по ВЭ АЭС.

⁴ Система наблюдений за процессом (явлением, фактором) природного или техногенного происхождения, состоянием окружающей среды объекта, а также оценка и прогноз их изменений и развития радиологических и других параметров или определение состояния энергоблока при ВЭ согласно принятому проекту (уточнение термина, принятого в [3]).

ческих процессов. Концепция моделей «цифровых двойников» технических решений, процессов и объектов, производственных систем ВЭ АЭС различной физической и технологической, радиационно-химической и иной природы определяет оригинальный подход к формированию и обоснованию качества необходимых действий на платформе единства измерений и оценок. Таким образом, постановка и поиск решения задачи формирования архитектуры «цифровых двойников» технических решений по ВЭ АЭС для текущего момента представляется своевременной и необходимой.

Исходные данные и методы формирования архитектуры «цифровых двойников» технических решений по выводу АЭС из эксплуатации

Возможным решением задачи по формированию и обоснованию качества необходимых технических решений⁵ по ВЭ АЭС на платформе единства измерений и оценок может быть применение накопленных знаний по функциональной безопасности сложных технических систем [5, 6], архивных баз данных по результатам комплексных радиационных и инженерно-диагностических обследований (КРИДО)⁶ [7] технического состояния энергоблока АЭС [8, 9]. Это решение включает самостоятельные процедуры сбора, систематизации и анализа первичных данных КРИДО и имитационного представления технического решения в формате моделей «цифровых двойников» (“Digital twins” collection – коллекция «цифровых двойников») [10–13] с описанием структуры, состава действий, объектов, их свойств, связей и др. Высокая сложность технологических процессов ВЭ энергоблоков АЭС, постоянно повышающаяся динамика и радиационно-опасные условия работ по ликвидации ядерного наследия АЭС, огромное количество факторов, влияющих на их качество, а также значительные убытки при отказе от оптимизации параметров техно-

логического процесса демонтажа и утилизации конструктивных компонентов энергоблока определяют перспективный путь решения этой задачи на базе уже апробированных компьютерных систем: система управляемых баз данных (СУБД), CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing/Автоматизированное проектирование/производство), CAE (Computer Aided Engineering – компьютерное проектирование), CAPP (Computer Aided Process Planning – автоматизированное планирование процессов), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерский контроль и сбор данных), DCS (Distributed Control System – распределенная система управления), MES/MOM (Manufacturing Execution System/Manufacturing Operation Management – система управления производственными операциями) и ряда других. Возникающий при этом вопрос о качестве инструментальных средств и достаточности современных промышленных СУБД для адекватного отображения «цифровых двойников», логической и физической организации исходных данных предполагает детализацию технических решений ВЭ по их целевому назначению. Например, цель технического решения – управление производственными процессами по демонтажу крупного массогабаритного оборудования энергоблока АЭС или дезактивация внутренних помещений энергоблока, или управление замкнутым жизненным циклом обращения с конструкционными материалами АЭС, или другие конкретные цели. Это могут быть такие цели, как проектирование и изготовление, испытания необходимого вспомогательного оборудования и инструментальных средств для ликвидации энергоблока, для удаления за периметр площадки энергоблока демонтированных конструкций с признаками радиоактивного загрязнения, для обращения и утилизации, окончательного захоронения радиоактивных отходов. А также цели: создания средств специального транспорта, информационно-измерительных систем управления технологическими ресурсами, программного обеспечения (ПО) автоматизированного проектирования технологий для повторного использования конструкционных материалов АЭС по новому назначению, профессиональной подготовки рабочего кадрового ресурса и иные цели. Эти детализированные цели ВЭ в целом будут определять информационную составляющую «цифрового двойника» анализируемого технического решения. Для общего случая технического решения в сфере ВЭ АЭС его структура в формате

⁵ Раздел в программе (проекте) управления качеством ВЭ энергоблока.

⁶ Выполнение диагностических измерений, тестовых инженерных испытаний и исследований, включая металлографические, прогнозных расчетов для определения фактического технического состояния и безопасности энергоблока. В нашем случае используется для этапа ВЭ энергоблока (уточнение термина из первоисточника – International Atomic Energy Agency SALTO Peer Review Guidelines, Guidelines for Peer Review of Safety Aspects of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Services Series No. 26 (2014).

«цифрового двойника» открытой архитектуры включает:

- математическую модель технического решения, которая показана в виде программного кода. При этом фактическое применение математической вычислительной модели в процессе моделирования деятельности по ВЭ АЭС в Российской Федерации возможно, если использовать ПО для электронных вычислительных машин и компьютерных сетей, вычислительные средства согласно ГОСТ Р 57700.22-2020 и одновременно удовлетворять особым требованиям Ростехнадзора по аттестации ПО, которое используется для решения задач в сфере проектирования, эксплуатации и ВЭ объектов использования атомной энергии;
- актуальные данные, определяющие информационную сущность технического решения;
- инструменты мониторинга, характеризующиеся параметрами: глубина диагностики, интенсивность обнаружения скрытых отказов, восстановление работоспособного состояния элементов ПО, а также коррекция и улучшения;
- алгоритмы анализа по критериям качества технического решения;
- алгоритмы выявления достижений и ошибок (например, на базе диаграммы Исикавы, Парето и пр.);
- методы адаптации модели на основе фактических данных демонтажных работ и утилизации отходов при ликвидации АЭС.

Таким образом, в нашем случае информационная сущность «цифрового двойника» – это взаимосвязанная совокупность:

- технологических компонентов АЭС;
- основных технологических процессов (дезактивация, демонтаж и утилизация оборудования и конструкций АЭС, обращение с радиоактивными отходами и т. д.);
- вспомогательных процессов (подготовка и работа оборудования, логистика транспортных линий, обеспечение ресурсов безопасности, качества и пр.);
- цифровой информации в рамках заявленной цели и всего процесса ВЭ АЭС.

При создании модели «цифрового двойника» технического решения как комплексного процесса ВЭ АЭС, в зависимости от конечной цели имитационного моделирования, в частности цели системного прогнозирования рисков для окружающей среды от принимаемых к исполнению технических решений или цели выбора лучшего технического решения и т. д., интегральный процесс моделируется, как

правило, на трех уровнях дифференцированной детализации:

- отдельной технологической операции (процедуры);
- отдельного самостоятельного технологического процесса, например дезактивации оборудования на месте его расположения в помещениях энергоблока;
- интегрального производственного процесса, например замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами АЭС на промышленной основе.

На рис. 1. показана схема уровней моделирования «цифрового двойника» технического решения ВЭ для общего случая. Представлены этапы производственного процесса на пути к заданной цели «выбор лучшего варианта и валидация технического решения».

Исходя из сказанного, в нашем случае под «цифровым двойником» будем понимать программный (виртуальный) аналог реального технологического решения по ВЭ с конкретной целью ликвидации ядерного наследия АЭС. Служебное свойство этого аналога – воспроизводить структуру, состояние, а также изменение показателей технического решения во времени его исполнения. При этом предполагается интерполяционная открытая архитектура «цифрового двойника» технического решения⁷, которая обусловлена многофакторной неопределенностью исходных данных, их нелинейностью. В этой связи ограничением рассматриваемого технического решения является интерполяционное улучшение любой цифровой функции. Отсюда, в силу того, что структура физической и феноменологической модели технического решения, как правило, получена из уравнений динамики конкретного технологического процесса или отдельной операции, можно считать, что с увеличением точности и достоверности исходных данных для моделирования интегральное качество «цифрового двойника» и полученных на его основе вычислительных результатов будет увеличиваться.

Тенденция к постоянному совершенствованию «цифрового двойника» процесса или объекта ВЭ АЭС способствует улучшению уже разработанных ПО и расчетных кодов как средств имитационного моделирования в высоко автоматизированном режиме.

⁷ Система формирования технического решения путем поиска промежуточных частных решений по имеющемуся дискретному набору известных и уже апробированных проектно-управленческих решений при ВЭ энергоблока.

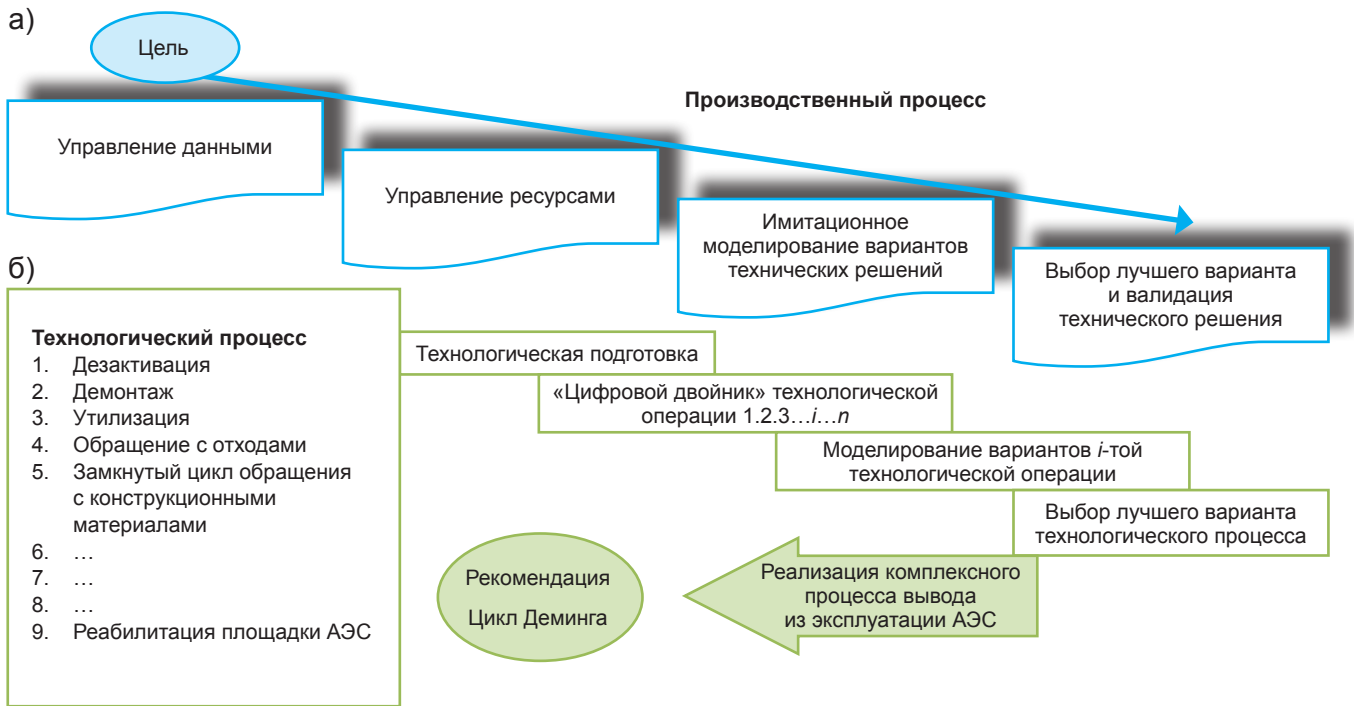


Рис. 1. Схема моделирования «цифрового двойника» технического решения по выводу из эксплуатации АЭС для общего случая

[Fig. 1. Modeling scheme of the “digital twin” of the technical solution for decommissioning of a NPP for a general case]

Эти средства функционируют самостоятельно в распределенной компьютерной среде как целостная совокупность цифровых моделей процессов и технических решений ВЭ для фактических условий состояния, осуществления и управления реальными технологическими процессами или процедурами ликвидации энергоблоков АЭС. Цифровое представление таких процессов в ряде случаев предполагает многомерную сеточную визуализацию конкретного изделия, например корпуса реактора (рис. 2). В этом формате для общего случая имитационного моделирования технического решения «цифровой двойник» конструктивного компонента энергоблока АЭС отражает его пространственную геометрию, технические характеристики, параметры работы, условия эксплуатации, взаимодействие с другими изделиями, а также данные диагностики, в том числе по прогнозированию дефектов, изменению служебных свойств, надежности, противояварийной устойчивости и пр. Следует отметить, что реализация концепции унифицированных моделей «цифровых двойников» технических решений, процессов и объектов, производственных систем ВЭ АЭС различной физической и технологической, радиационно-химической и иной природы предполагает не только цифровизацию отдельных функций по сбору и обработке первичных данных КРИДО, но также конструирование «цифровых двойников» для произвольных технологических процессов ВЭ

АЭС (технических решений) и моделирования инженерных работ в целях конверсии выводимых из эксплуатации энергоблоков, в том числе при реализации замкнутого цикла обращения с металлическими отходами АЭС на этапе их ВЭ.

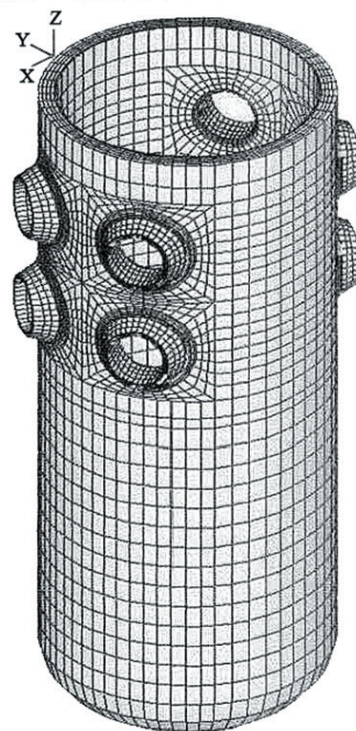


Рис. 2. Сеточная визуализация «цифрового двойника» корпуса реактора

[Fig. 2. Mesh visualization of the reactor vessel's “digital twin”]

Методы формирования архитектуры «цифровых двойников» технических решений по ВЭ АЭС исходят из ряда важных предпосылок. В числе предпосылок цифрового моделирования инженерных работ в целях конверсии окончательно остановленных АЭС, повторного использования конструкций и оборудования энергоблоков с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) и их трансформации в металлические заготовки в промышленных масштабах следует отметить не только практические аспекты реализации разных концепций по ВЭ АЭС, но и нормативную необходимость обоснования качества формирования и реализации соответствующих технических решений [14]. Изучение свойств качества инженерных работ, например по признаку их радиационной безопасности, в сфере конверсии энергоблоков АЭС и ликвидации их ядерного наследия путем цифрового моделирования, в общем случае представляет собой информационное пространство необходимых технических решений, таких как среды функционирования «цифровых двойников» АЭС, совокупности или отдельно взятых конструктивных компонентов энергоблока, процессов их дезактивации, демонтажа, утилизации, переработки и других важных технологических операций и процедур. Данное информационное пространство может быть представлено множеством накопленных знаний в сфере конверсии конструкционных материалов при ликвидации энергоблока АЭС в полезные продукты в формате СУБД [15], которая имеет свою положительную апробацию в управлении рисками энергетических ядерных объектов. В этой связи основные методы формирования архитектуры «цифровых двойников» технических решений по ВЭ АЭС представлены методами проектирования и ведения оригинальной СУБД, которая включает в свой состав:

- матрицы исходных данных для имитационного моделирования работ;
- методы сбора и классификационного анализа первичных данных по истории проектирования, монтажа и эксплуатации энергоблока, в том числе от источников, измерительных средств КРИДО;
- методы имитационного представления конструктивных компонентов энергоблоков и технологических процессов их ликвидации, утилизации в формате «цифровых двойников» (“Digital twins” collection);
- методы феноменологического описания структуры, состава конструктивных компонентов энергоблока и их служебных свойств, а также известных взаимосвязей между ними и ряд других.

Способ и пример программной реализации оригинальных «цифровых двойников» объектов и процессов для решения задач по выводу из эксплуатации АЭС

«Цифровые двойники» применительно к объектам и процессам в задачах по ВЭ АЭС в нашем случае рассматриваются как инструментальные информационные средства для управления деятельностью по ликвидации энергоблоков АЭС. Сущность этих средств заключается в создании имитационной цифровой модели для выполнения вариантных расчетов, автоматизированной интеллектуальной оценки их результатов и в итоге – формировании рекомендаций в формате «Помощник специалиста по выводу из эксплуатации АЭС» [16] для выбора приемлемых технических решений по критериям их качества, лучшей реализуемости и экономической эффективности. Для выполнения вариантных расчетов для выбора лучшего технического решения разрабатывается и верифицируется оригинальный пакет ПО. Способ программной реализации оригинальных «цифровых двойников» объектов и процессов в формате ПО для вычислительных задач по ВЭ АЭС заключается в формировании виртуальной среды технического решения на основе реальных данных КРИДО, в нашем случае – диагностики технического состояния окончательно остановленного энергоблока. Данная среда формируется либо в целом на модели энергоблока, либо какого-то важного конструктивного компонента АЭС на периоде ВЭ. На рис. 3 показана виртуальная среда ПО для нашего случая. Архитектура виртуальной среды ПО «цифрового двойника» технического решения при ликвидации энергоблока АЭС включает расчетные модули и редакторы, архив СУБД, информационный модуль с содержанием конструктивного компонента и технологического процесса, ПО для обеспечения вариантного расчета, коллекцию унифицированных сеточных моделей.

Важно отметить, что в реальной практике отдельно взятым виртуальным цифровым компонентом энергоблока может быть любое оборудование, изделие или технологическая система АЭС.

Например, это могут быть хранилища радиоактивных отходов, в том числе подземные, с парком технологических скважин. Пример построения ПО для этого варианта ранее был представлен в работе [16]. В общем случае ПО формирует комплекс СУБД – объединенных архивов знаний по ВЭ АЭС.



Рис. 3. Архитектура виртуальной среды программного обеспечения «цифрового двойника» технического решения при ликвидации энергоблока АЭС
 [Fig. 3. Architecture of the virtual environment of the software “digital twin” of the technical solution during the liquidation of the NPP power unit]

В нашем случае он включает отдельные блоки: базы оригинальных исходных первичных данных; вычислительные модули для верификации данных имитационных расчетов; вычислительные технологии формирования банков данных для имитационного моделирования, в том числе и вторичной информации (знаний); архивы, содержащие типовые информационные модели «цифровых двойников» конструктивных компонентов энергоблока (на рис. 4 представлен пример типовой конечно-элементной цифровой модели защитной оболочки энергоблока с ВВЭР, она включает 366 992 конечных элемента, 402 378 узлов), а также методы их систематизированного описания (конструирования) и логико-аналитической обработки. Применение только архивов знаний как информационного средства накопления и анализа первичных данных в целом для имитационного моделирования инженерных работ при конверсии ВЭ энергоблоков с ВВЭР не может в программной цифровой среде иметь достаточно полное информационное виртуальное пространство. В первую очередь, для обоснования безопасности и экологической приемлемости таких работ и прогнозируемых рисков важно включить в этот архив предполагаемые программы практических действий при выполнении технологических операций и работ с детализацией их основных условий выполнения и характеристик.

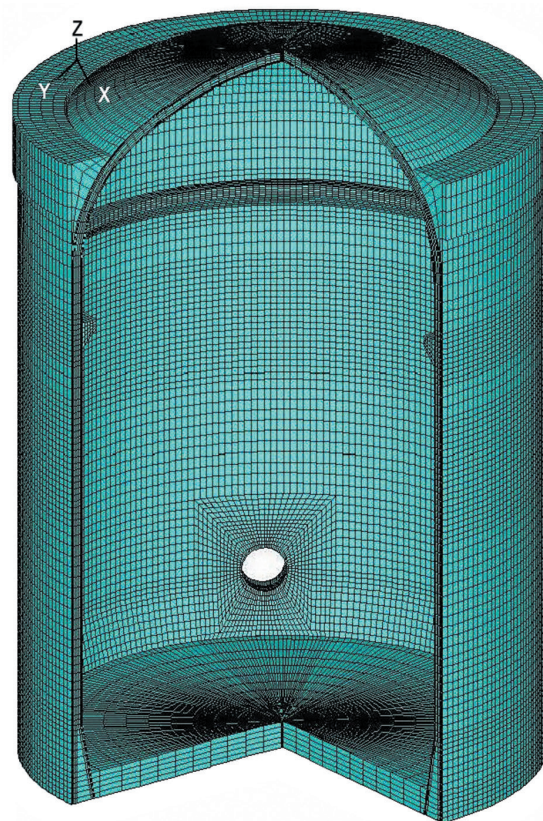


Рис. 4. Конечно-элементная цифровая имитационная модель защитной оболочки на примере Нововоронежской АЭС
 [Fig. 4. Finite element digital simulation model of a containment shell using the example of Novovoronezh NPP]

Данная модель обеспечивает расчетное моделирование демонтажа с учетом уровня радиационного загрязнения, индивидуальных особенностей конструкции оболочки энергоблока АЭС. Она также учитывает фактический проектный облик и массогабаритные характеристики, особенный состав и степень деградации конструкционных материалов оболочки, реальные действующие силовые нагрузки в натяжных канатах и изменение усилий натяжения по длине канатов, коэффициент трения и угол изгиба каната и прочее, включая угрозы внезапного разрушения демонтируемых конструктивных компонентов энергоблока или проявления опасных событий, в том числе в возможных чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. Это обстоятельство связано с проблемной задачей переноса в вычислительную среду сложившихся субъективных представлений (знаний) о формировании необходимых технических решений при ВЭ АЭС и управления их реализацией. В пространстве этой среды решаются задачи физико-технологической формализации комплексного процесса ВЭ АЭС и ликвидации ядерного наследия энергоблока или его отдельно взятых технологических операций на уровне концептуальной имитационной модели конкретного технологического процесса, работы или объекта демонтажа энергоблока и т. д., обладающей, в том числе, временными свойствами.

Для достижения полноты и адекватности имитационных моделей инженерных работ, выполняемых с целью конверсии ВЭ энергоблоков с ВВЭР при реализации замкнутого цикла обращения с металлическими и иными отходами АЭС, требуется ряд дополнений. В частности, будут необходимы перечень и физико-феноменологическое описание возможных и наиболее вероятных сценариев реализации реальных и возможных событий, в том числе аварийных. Это важно для изучения на имитационных моделях – «цифровых двойниках» энергоблока всего комплекса – опасностей, которые могут возникнуть при ликвидации энергоблока, особенно когда это будет происходить в будущий период массового ВЭ и ликвидации одновременно многих энергоблоков АЭС.

Синтез выполняемых практических работ и рабочих технологических процессов в объеме технических решений при ВЭ АЭС предполагает раздельное имитационное описание компоновки энергоблока и его конструктивных компонентов, технологий для последующего обращения и размещения демонтированного конструктивного компонента энергоблока, его утилизации, а также детальное и дифференцированное описание всего комплексного физико-технологического процесса

в формате «цифрового двойника» отдельных групп, кластеров инженерно-технологических работ. Цифровую виртуальную схему разработки, тестирования и верификации технических решений по ВЭ АЭС на индустриальной основе для нашего случая поясняет рис. 5, где представлена последовательность этапов определения виртуальной реализации технического решения в условиях серийного промышленного производства, строительства, включая этапы по формированию концептуального задания на поиск технического решения, формирование облика цифровой модели, проектирование (описание) технического решения, физико-феноменологическое моделирование, расчетное определение по заданным критериям и верификацию [17].

Результаты

Универсальный состав возможных «цифровых двойников» конструктивных компонентов и технологических процессов ВЭ АЭС позволяет достаточно точно прогнозировать физические параметры, особые условия, ожидаемые сроки реализации технических решений. Это наиболее эффективно достигается путем применения ПО с одновременной реализацией матричных операций и параллельного расчета динамик технологических процессов при разных исходных данных по формированию «цифрового двойника». Таким образом, на концептуальном уровне может быть обеспечена инвариантность «цифровых двойников» объектов и процессов в решении задач по ВЭ АЭС с различными проектными типами ядерных энергетических установок.

Заключение

Универсальность предложенной концепции методов формирования «цифровых двойников» для решения проблемных задач по ВЭ АЭС состоит в возможности применения различного формата виртуальных цифровых моделей физико-химических объектов с альтернативной степенью их детализации. Это обуславливает необходимость разработки программно-технологической платформы для выполнения имитационных расчетов в обоснование качества технических решений по ВЭ АЭС. В будущем, в период массового ВЭ АЭС, с учетом вызовов современности по рациональному природопользованию и охране окружающей среды, дальнейшее развитие концепции формирования «цифровых двойников» объектов и технологических процессов в решении задач по ВЭ АЭС заслуживает серьезного внимания и поддержки.

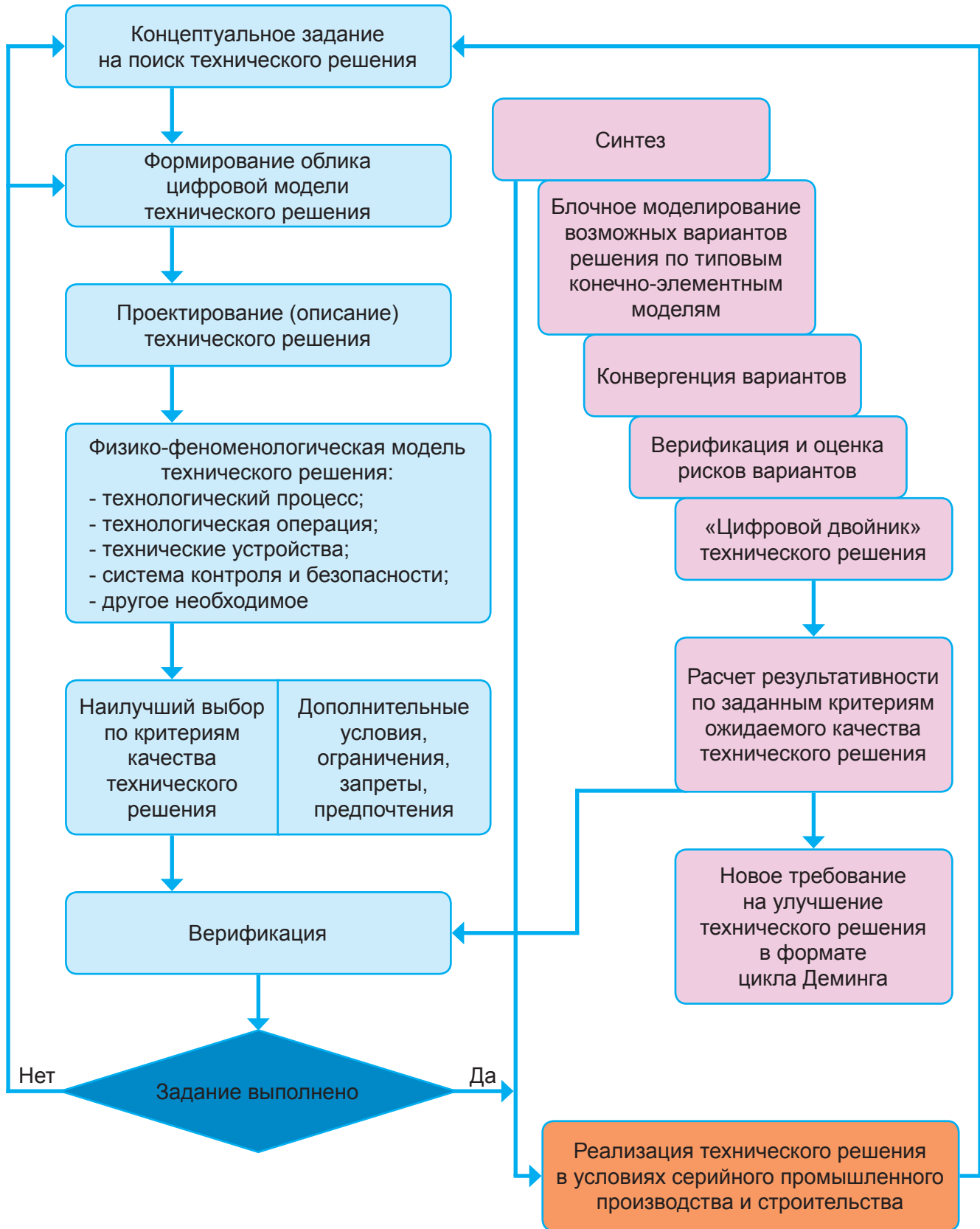


Рис. 5. Схема разработки, тестирования и верификации технических решений по выводу из эксплуатации АЭС [Fig. 5. Scheme of development, testing and verification of technical solutions for decommissioning of NPPs]

Литература

1. Терминологический словарь по ядерной и радиационной безопасности. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011.
2. Термины атомной энергетики. – ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2010.
3. Бидуля Л. В., Былкин Б. К., Зверков Ю. А., Мироненко-Маренкова М. Е. Глоссарий основных терминов и определений в области обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии и реабилитации радиоактивно загрязненных территорий. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2018. – 176 с.
4. Енговатов И. А., Иванова А. И., Коваленко Ж. А., Волков В. Г., Сафронова Н. Н. Основные положения блоковой концепции вывода из эксплуатации зданий и сооружений АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2023. № 4. С. 86–94.
5. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла: монография. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. – 568 с.
6. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Прочность, ресурс и безопасность машин и конструкций / Под ред. чл.-корр. РАН Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. – М.: ИМАШ РАН, 2000. – 527 с.
7. International Atomic Energy Agency SALTO Peer Review Guidelines, Guidelines for Peer Review of Safety Aspects of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Services Series No. 26 (2014).
8. Поваров В. П., Бакиров М. Б., Данилов А. Д. Интеллектуальная система непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов ядерных установок / Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Международной научно-технической конференции. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 33–37.
9. Бакиров М. Б., Кудрявцев Е. М., Сарычев А. А., Тутнов И. А. Введение в техническую диагностику потенциально опасных объектов атомной энергетики: учеб. пособие для вузов. – М.: РАДЭЖОН, 2003. – 39 с.
10. Минаев В. А., Мазин А. В., Здирук К. Б., Куликов Л. С. Синтез цифровых двойников с применением многоаспектной рекурсивной декомпозиции // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 26–37.
11. Старостин И. Е., Гавриленков С. И. Архитектура математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 160–168.
12. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 11 с.
13. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 11 с.
14. Бочкарев В. В. Оптимизация нормативных требований к блокам, остановленным для ВЭ // РЭА: ежемесячный журнал атомной энергетики России. 2021. № 6. С. 60–61.
15. Васильева С. В., Коновалова О. В., Панкин А. М., Тутнов И. А., Соболев А. В., Царев В. С. Управление рисками энергетических ядерных объектов топливно-энергетического комплекса на основе измерительной диагностики их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1 (33). С. 114–122.
16. Панкин А. М. Обработка результатов измерений в задачах технической диагностики: учеб. пособие / А. М. Панкин. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2002. – 202 с.
17. Гуревич М. И., Расторгуев И. А., Степин Ю. П., Чесноков А. В. Модель и метод проектирования алгоритма и вычислительных программ для программно-измерительных комплексов мониторинга технического состояния скважин подземных хранилищ радиоактивных отходов // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2013. № 2 (46). С. 86–106.

References

1. Terminologicheskii slovar' po yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti [Terminological dictionary on nuclear and radiation safety]. Moscow: SEC NRS, 2011. [in Russian].
2. Terminy atomnoi ehnergetiki [Terms of nuclear power engineering]. JSC Rosenergoatom, 2010. [in Russian].

3. Bidulya L. V., Bylkin B. K., Zverkov Yu. A., Mironenko-Marenkova M. E. (2018). Glossarii osnovnykh terminov i opredelenii v oblasti obrashcheniya s otrabotavshim yadernym toplivom i radioaktivnymi otkhodami, vyvoda iz ehkspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii i reabilitatsii radioaktivno zagryaznennykh territorii [Glossary of basic terms and definitions in the field of spent nuclear fuel and radioactive waste management, decommissioning of nuclear power facilities and rehabilitation of radioactively contaminated territories]. Moscow: SIC "Kurchatov Institute", 176 p. [in Russian].
4. Engovatov I. A., Ivanova A. I., Kovalenko Zh. A., Volkov V. G., Safronova N. N. (2023). Osnovnye polozheniya blokovoï kontseptsii vyvoda iz ehkspluatatsii zdaniï i sooruzhenii AEHS [The main provisions of the block concept of decommissioning of NPP buildings and structures]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika – Nuclear power engineering*, No. 4, pp. 86–94. [in Russian].
5. Severtsev N. A., Yurkov N. K. (2023). Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na ehtapakh zhiznennogo tsikla [Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle]. Monograph. Penza: Publishing house of PSU. 568 p. [in Russian].
6. Makhutov N. A., Gadenin M. M. (2000). Prochnost', resurs i bezopasnost' mashin i konstruksii [Durability, resource and safety of machines and structures]. Edited by corresponding members of RAS. Moscow: IMASH RAS. 527 p. [in Russian].
7. International Atomic Energy Agency SALTO Peer Review Guidelines, Guidelines for Peer Review of Safety Aspects of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Services Series No. 26 (2014).
8. Povarov V. P., Bakirov M. B., Danilov A. D. (2017). Intellektual'naya sistema nepreryvnogo monitoringa ehkspluatatsionnoi povrezhdaemosti kriticheskikh ehlementov yadernykh ustanovok [An intelligent system for continuous monitoring of operational damage of critical elements of nuclear installations]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovanii, upravlenii, proizvodstvu"* – Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "New technologies in scientific research, design, management, production" (V. 2, pp. 33–37). Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Technical Education. [in Russian].
9. Bakirov M. B., Kudryavtsev E. M., Sarychev A. A., Tutnov I. A. (2003). Vvedenie v tekhnicheskuyu diagnostiku potentsial'no opasnykh ob'ektov atomnoi ehnergetiki [Introduction to technical diagnostics of potentially dangerous nuclear power facilities]. A textbook for universities. Moscow: RADEKON, 39 p. [in Russian].
10. Minaev V. A., Mazin A. V., Zdiruk K. B., Kulikov L. S. (2019). Sintez tsifrovyykh dvoïnïkov s primeneniem mnogoaspektnoi rekursivnoi dekompozitsii [Synthesis of digital twins of industrial facilities using multidimensional recursive decomposition]. *Voprosy radioehlektroniki – Questions of Radio Electronics*, No. 11, pp. 26–37. [in Russian].
11. Starostin I. E., Gavrilënkov S. I. (2024). Arkhitektura matematicheskogo yadra tsifrovyykh dvoïnïkov razlichnykh fiziko-khimicheskikh sistem na baze metoda matematicheskogo prototipirovaniya ehnergeticheskikh protsessov [Architecture of the mathematical core of digital twins of various physico-chemical systems based on the method of mathematical prototyping of energy processes]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem – Reliability and quality of complex systems*, No. 4, pp. 160–168. [in Russian].
12. GOST R 57700.37-2021 "Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoïniki izdelii. Obshchie polozheniya" [GOST R 57700.37-2021 "Computer models and modeling of digital twins of products. General provisions"]. 2021.
13. GOST R 57412-2017 "Komp'yuternye modeli v protsessakh razrabotki, proizvodstva i ehkspluatatsii izdelii. Obshchie polozheniya" [GOST R 57412-2017 "Computer models in the processes of product development, production and operation. General provisions"]. 2018.
14. Bochkarev V. V. (2021). Optimizatsiya normativnykh trebovaniï k blokam, ostanovlennym dlya VEH [Optimization of regulatory requirements for NPP stopped for decommissioning]. *REHA: ezhemesyachnyi zhurnal atomnoi ehnergetiki Rossii – REA: monthly Journal of Atomic Energy of Russia*, No. 6, pp. 60–61. [in Russian].
15. Vasilyeva S. V., Konovalova O. V., Pankin A. M., Tutnov I. A., Sobolev A. V., Tsarev V. S. (2021). Upravlenie riskami ehnergeticheskikh yadernykh ob'ektov toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa na osnove izmeritel'noi diagnostiki ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Risk management of nuclear power facilities of the fuel and energy complex based on measurement diagnostics of their technical condition]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem – Reliability and quality of complex systems*, No. 1 (33), pp. 114–122. [in Russian].

16. Pankin A. M. (2002). Obrabotka rezul'tatov izmerenii v zadachakh tekhnicheskoi diagnostiki [Processing measurement results in the tasks of technical diagnostics]. Textbook. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 202 p. [in Russian].

17. Gurevich M. I., Rastorguev I. A., Stepin Yu. P., Chesnokov A. V. (2013). Model' i metod proektirovaniya algoritma i vychislitel'nykh programm dlya programmno-izmeritel'nykh kompleksov monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya skvazhin podzemnykh khranilishch radioaktivnykh otkhodov [Model and method of designing an algorithm and computational programs for software and measurement systems for monitoring the technical condition of wells in underground radioactive waste storage facilities]. Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii – Nuclear Measurement and Information Technologies, No. 2 (46), pp. 86–106. [in Russian].

Сведения об авторе

Сафронова Наталья Николаевна, заместитель генерального директора, Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли («АСКАО») (117485, Москва, ул. Обручева, д. 30, стр. 1, ячейка 12 «АСКАО»).

Author credentials

Safronova Nataliya Nikolaevna, Deputy General Director, Association of Organizations of the Nuclear Industry Construction Complex (“ASKAO”) (mailbox 12 “ASKAO”, 30 bld. 1, Obrucheva str., Moscow, 117485), e-mail: safronova_nn@accni.ru.

Для цитирования

Сафронова Н. Н. Применение «цифровых двойников» объектов и процессов в решении задач по выводу из эксплуатации АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 4 (118). С. 5–17. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.118.4.001.

For citation

Safronova N. N. (2025). Primenenie “tsifrovyykh dvoynikov” ob'ektov i protsessov v reshenii zadach po vyvodu iz ehkspluatatsii AEHS [“Digital twins” of objects and tasks solved during decommissioning of NPPs]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 4 (118), pp. 5–17. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.118.4.001.

