

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОМЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ БЛОКА АЭС ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Б.К. Былкин*, В.Л. Тихоновский, Д.В. Чуйко****

** НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва*

*** ЗАО «НЕОЛАНТ», г. Москва*



Изложены основные положения применения имитационного моделирования при планировании работ по выводу из эксплуатации АЭС

Ключевые слова: атомная станция, вывод из эксплуатации, информационные технологии, информационная система, имитационное моделирование.

Key words: nuclear power plant (NPP), decommissioning, information technologies, information system, imitational modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Вывод из эксплуатации (ВЭ) – завершающий этап жизненного цикла блока АЭС, сравнимый по сложности и продолжительности с таким этапом жизненного цикла, как эксплуатация. Но в отличие от эксплуатации это затратный этап, который в силу особенностей оказывает существенное влияние на суммарные показатели эффективности АЭС [1].

В связи с потенциальной значительной длительностью, сложностью и опасностью процесса ВЭ в требованиях нормативно-технических и руководящих документов Ростехнадзора и Концерна РЭА определено создание и наполнение информационной системы базы данных вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС (ИС БДВЭ) с использованием трехмерного моделирования для всестороннего информационного сопровождения процесса ВЭ АЭС [2–4].

На сегодняшний день работы по созданию ИС БДВЭ ядерно и радиационно опасных объектов и, в частности, блоков АЭС осуществляются достаточно активно [5]. Однако все созданные и создаваемые на сегодняшний день системы пока решают только базовую задачу систематизации, сохранения и передачи знаний на длительные временные сроки.

Зарубежный опыт показывает возможность создания и высокую эффективность применения различного рода имитационных моделей и тренажеров для ВЭ блоков АЭС. В качестве примера можно привести один из крупнейших проектов современности по выводу из эксплуатации пяти энергоблоков с реакторными установками типа ВВЭР на АЭС Greifswald в восточной Германии, в процессе которого активно применялись информационные системы, базы данных и расчетные комплексы оценки различных аспектов ВЭ блоков [6].

© *Б.К. Былкин, В.Л. Тихоновский, Д.В. Чуйко, 2012*

Отметим, что основными задачами, решаемыми за рубежом с помощью информационных систем, применяемых при ВЭ, являются расчет стоимости проекта ВЭ, планирование и управление его проведением [7].

В целом, формирование имитационной модели ВЭ блока АЭС должно являться составной частью создания ИС БДВЭ. Следующие факторы определяют возможность, целесообразность и необходимость осуществления предварительного моделирования процесса (проекта) ВЭ блока АЭС на имитационных моделях ВЭ (далее ИМ ВЭ):

- длительность, сложность и потенциальная опасность процесса ВЭ для персонала, населения, окружающей среды;
- значительная стоимость практической реализации ВЭ и необходимость ее оптимизации;
- необходимость обучения персонала, который будет осуществлять практические работы по ВЭ;
- системный подход по созданию баз данных ВЭ блоков АЭС с применением трехмерного моделирования;
- современный уровень развития возможностей вычислительной техники и программного обеспечения;
- международный опыт планирования и осуществления работ по ВЭ, положения рекомендаций МАГАТЭ;
- требования современных нормативно-технических и концептуальных документов Ростехнадзора, Госкорпорации «Росатом», ОАО «Концерн Росэнергоатом» в области вывода из эксплуатации и информационного сопровождения данного процесса.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ БЛОКА АЭС ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье под термином «имитационное моделирование» понимается логико-математическое описание процессов, реализуемых в виде компьютерных алгоритмов и программ, имитирующих в ходе машинного эксперимента протекание процессов во времени подобно тому, как они проходили бы в действительности. Имитационное моделирование применяется в целях проектирования, анализа и оценки функционирования сложных объектов, для которых по различным причинам невозможно либо очень сложно разработать аналитические модели. Использование имитационных моделей чаще всего продиктовано необходимостью учета большого числа случайных факторов, влияющих на результат функционирования объектов. В этом случае проводится n экспериментов с моделью, в каждом из которых значения случайных факторов заменяются детерминированной величиной в соответствии с их законом распределения. После проведения n экспериментов с моделью результаты обрабатываются с применением методов математической статистики. Среди видов имитационного моделирования особое место занимает дискретно-событийное моделирование, реализующее в ходе машинного эксперимента механизм формирования системного времени от события к событию. Событиями, например, могут быть значимые вехи календарно-сетевого графика сооружения объекта. Дискретно-событийное имитационное моделирование часто применяется для построения временных разрезов 3D-модели объектов, по сути – для построения 4D-модели объекта и проведения экспериментов на этой модели с целью отработки проектных решений.

Основной целью создания и применения имитационной модели ВЭ блока АЭС является снижение издержек и повышение безопасности осуществления выбран-

ного варианта ВЭ блока АЭС за счет системного управления требованиями к проекту ВЭ, многофакторного предварительного компьютерного имитационного моделирования и оптимизации осуществления как всего процесса ВЭ в целом, так и его отдельных наиболее сложных технологических операций, итеративной верификации проекта ВЭ на предмет удовлетворения сформулированным требованиям.

Формирование ИМ ВЭ должно осуществляться после первоначального наполнения ИС БДВЭ блока АЭС в достаточном объеме. Применение ИМ ВЭ должно происходить при разработке, согласовании и экспертизе проекта ВЭ в целях его оптимизации и верификации.

Определенный по результатам применения ИМ ВЭ оптимальный способ осуществления работ по ВЭ в рамках выбранного варианта ВЭ должен являться основой для преобразования ИМ ВЭ в *ND*-проектную модель ВЭ, которая совместно с данными комплексного обследования (КИРО), а также разработанной при проектировании ВЭ проектно-конструкторской, организационно-технологической, сметной и иной документации, введенной в состав ИС БДВЭ, должна формировать электронный проект ВЭ блока АЭС (ЭП ВЭ). *ND*-проектная модель ВЭ должна в дальнейшем использоваться при планировании и управлении практическими работами по ВЭ блока АЭС в соответствии с разработанными и отраженными в ней проектными решениями.

Для достижения указанной цели ИМ ВЭ должна обеспечивать решение следующих задач:

- формирование и поддержание иерархически декомпозированной системы требований к проекту ВЭ, применяемым методикам и технологиям выполнения работ, организационным, технологическим, экономическим и другим накладываемым ограничениям;
- использование данных ИС БДВЭ в качестве основы для формирования ИМ ВЭ, включая трехмерные инженерные модели промплощадки и блока АЭС, интегрированные с проектными, эксплуатационными данными и данными КИРО по зданиям, сооружениям, системам и оборудованию промплощадки и элементам блока АЭС; степень детализации указанной информации ИС БДВЭ, ее трехмерных моделей должна быть достаточна для решения задач имитационного моделирования и получения достоверных оценок аспектов реализации того или иного варианта выполнения отдельных работ по ВЭ и всего процесса ВЭ в целом;
- ведение информационного банка данных (альтернативных) технологий и методик осуществления типовых технологических операций по ВЭ (деактивация, демонтаж, подъемно-транспортные операции) с указанием применяемого оборудования, механизмов, инструментов, а также временных, финансовых и других параметров их применения;
- формирование планов-графиков различного уровня выполнения работ по ВЭ с возможным указанием используемых ресурсов; ведение пула используемых ресурсов с указанием характеристик ресурсов, стоимости их использования (персонал АЭС и подрядных организаций, механизмы, оборудование и инструменты);
- расчет укрупненной оценки стоимости ВЭ по выбранному варианту на основе утвержденной в ОАО «Концерн Росэнергоатом» методики расчета укрупненной оценки стоимости ВЭ с использованием в качестве исходных данных информации ИС БДВЭ блока АЭС;
- динамическая визуализация на трехмерных моделях блока АЭС и промплощадки блока АЭС управляемых электронных образов (имитационных макетов) оборудования, механизмов, персонала для моделирования отдельных наиболее сложных технологических операций по ВЭ с одновременным подсчетом дозовых на-

грузок на персонал и применяемое оборудование, объемов и характеристик образующихся отходов, экономических аспектов осуществления моделируемых технологических операций;

- создание средств автоматизированной верификации технологических операций ВЭ и всего выбранного варианта ВЭ на предмет соответствия заложенным требованиям к Проекту ВЭ.

На рисунке 1 представлены этапы эволюции ИС БДВЭ в направлении создания ИМ ВЭ и далее в направлении *ND*-модели ВЭ и электронного проекта ВЭ в привязке к основным вехам в заключительных этапах жизненного цикла действующего блока АЭС.

СОСТАВ И СТРУКТУРА ИМ ВЭ, ВЗАИМОСВЯЗЬ ИМ ВЭ И ИС БДВЭ БЛОКА АЭС

На основе зарубежного [8, 9] опыта создания имитационных моделей для задач ВЭ ЯЭУ различного назначения развивается отечественный подход построения ИМ ВЭ блока АЭС [10], включающий в себя следующие функциональные подсистемы и взаимосвязь между ними (рис. 2). На рисунке приняты следующие обозначения:

1 – связь требований в СУТ с информационными объектами в СКСП (задачи, ресурсы) для обеспечения верификации требований СУТ к срокам выполнения работ, ресурсам и стоимости;

2 – связь требований в СУТ с допустимыми пороговыми нагрузками на персонал и оборудование, указываемых в СРДН;

3 – связь требований в СУТ с допустимыми величинами финансовых затрат на реализацию ВЭ или отдельных технологических операций, указываемых в СУРС;

4 – связь требований в СУТ с допустимыми величинами образования РАО в рамках реализации всего ВЭ или отдельных технологических операций, указываемых в СРОРАО;

5 – определение базовой длительности и ресурсоемкости задач в сетевых планах-графиках СКСП на основе характеристик технологий, указанных в НБДТ;

6 – получение информации о геометрии зданий, сооружений, оборудования и трубопроводов, а также данных о радиационной обстановке в точках контроля для расчета и построения пространственной конфигурации распределения радиоактивных полей;

7 – получение СРДН данных о пространственной конфигурации распределения радиоактивных полей из СРКРП для расчета дозовых нагрузок при имитационном моделировании;

8 – передача СМТО информации в СУРС для определения укрупненной оценки стоимости варианта реализации технологической операции;

9 – получение СМТО данных о характеристиках применяемых технологий из НБДТ в моделируемом варианте реализации технологической операции;

10 – передача СМТО информации в СРОРАО для определения объема и категорий образующихся отходов, расчета потребности в контейнерах;

11 – получение информации СУРС от ИС БДВЭ для укрупненной оценки стоимости ВЭ блока АЭС в целом;

12 – получение информации СУРС от СКСП для укрупненной оценки стоимости ВЭ блока АЭС в целом;

13 – обращение ИОТ к СРДН для подсчета пороговых допустимых дозовых нагрузок при обучении персонала реализации выбранного варианта технологической операции;

14 – обращение СМТО к СРДН для подсчета дозовых нагрузок при имитационном моделировании варианта реализации технологической операции;

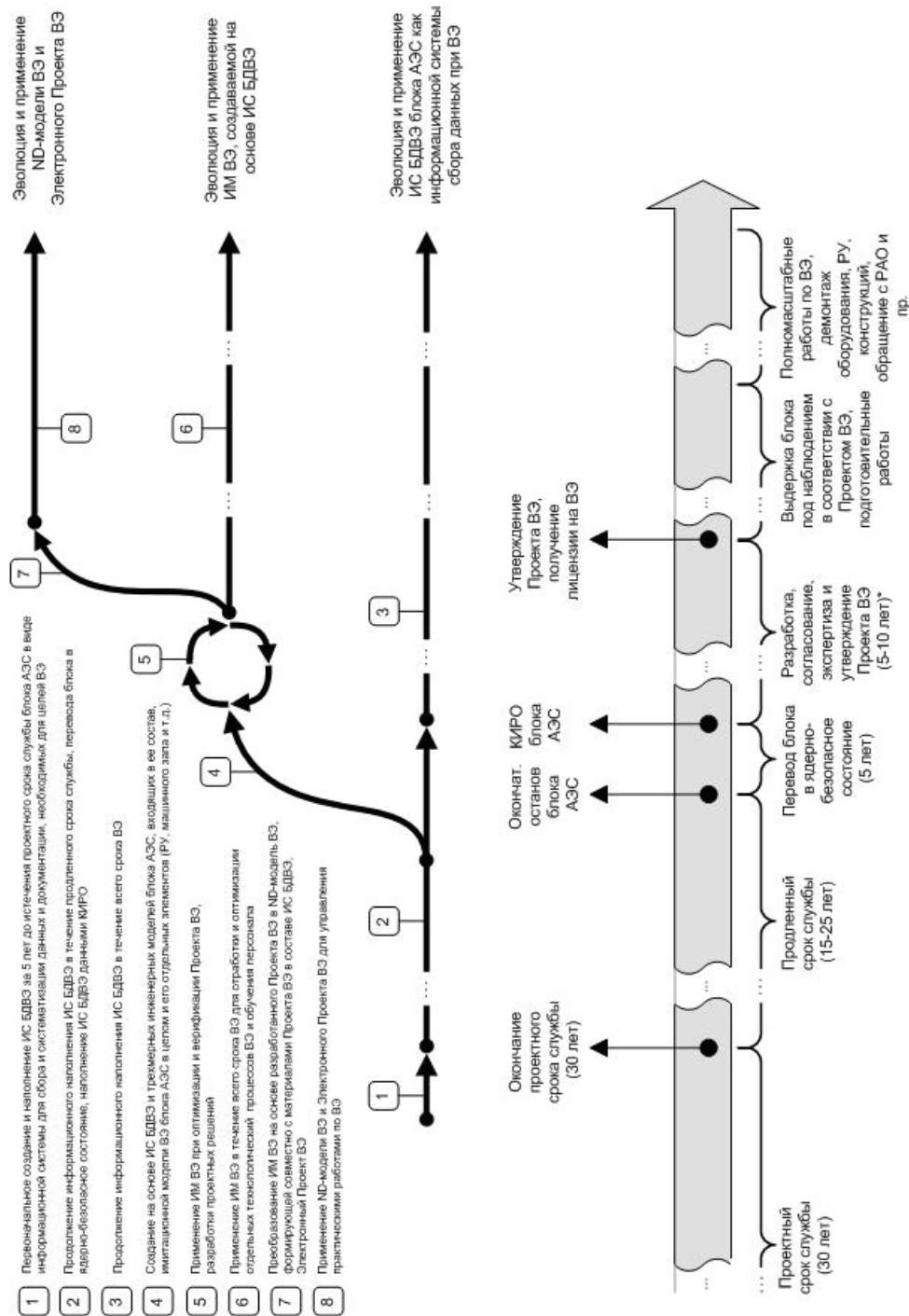


Рис. 1. Эволюция ИС БДВЗ в направлении ИМ ВЗ, ND-модели ВЗ и электронного проекта ВЗ

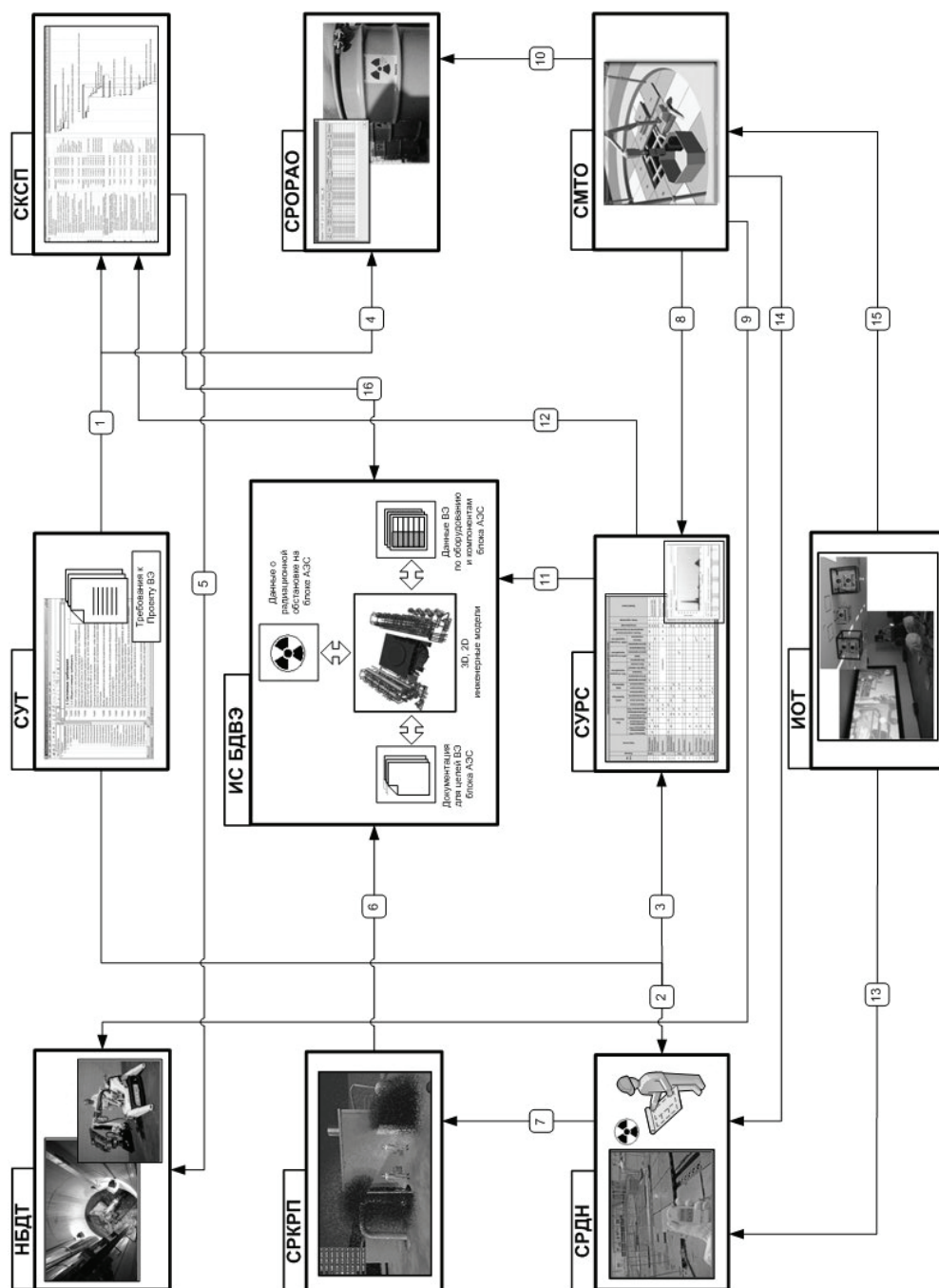


Рис. 2. Структура функциональных элементов ИМ ВЗ блока АЭС и взаимосвязи между ними

15 – обращение ИОТ к СМО для получения сценария выбранного варианта технологической операции;

16 – связь задач в сетевых планах-графиках СКСП с графическими элементами трехмерных моделей ИС БДВЭ для визуализации планов-графиков различного уровня.

ИС БДВЭ блока АЭС содержит в себе всю необходимую информацию о блоке АЭС (трехмерные и двухмерные инженерные модели, перечни систем и оборудования с указанием массогабаритных и иных характеристик, данные по радиационной обстановке и радиационному загрязнению оборудования, электронный архив документации). ИС БДВЭ в целом обеспечивает датацентрический метод хранения информации, обмен данными между САПР, сбор, структурированное хранение и представление по запросу пользователя инженерно-технической информации.

Для создания на основе ИС БДВЭ полноценной ИМ ВЭ и применения ее в качестве действенного инструментария планирования и подготовки ВЭ необходимо обеспечить систематическое поступление в ИС БДВЭ информации о радиационной обстановке на блоке АЭС и наполнение ИС БДВЭ детальной информацией о составе и структуре систем блоков АЭС, материалах оборудования, трубопроводов, реакторных и строительных конструкций, а также параметров их радиационного загрязнения.

Система управления требованиями (СУТ) предназначена для сбора, документирования, согласования, модификации и верификации требований, контроля реализации, управления изменениями требований, а также связывания и прослеживания требований к результатам разработок стадий технического проектирования и рабочей документации проекта ВЭ.

Целью создания и применения СУТ в ИМ ВЭ и при разработке проекта ВЭ является модернизация и совершенствование технологий процессов верификации проекта ВЭ на предмет соответствия требованиям нормативной базы и заказчика. С помощью СУТ должны быть улучшены процессы разработки и управления требованиями к проекту ВЭ путем приведения процессов в соответствие современным подходам системной инженерии.

СУТ должна обеспечивать

- автоматизацию процесса конвертации нормативно-технических документов в иерархию требований СУТ;
- осуществление контроля и отслеживания внесения изменений в иерархию требований;
- управление процессами разработки требований, включая функции их согласования и изменения;
- связывание требований с объектами и (или) информацией в компонентах ИМ ВЭ при создании проекта ВЭ;
- проведение валидации реализации требований в Проекте ВЭ в рамках ИМ ВЭ с выдачей соответствующих отчетов.

Система календарно-сетевого планирования (СКСП) содержит в себе планы-графики выполнения работ по ВЭ нужной степени детализации с указанием потребного объема ресурсов для их реализации.

СКСП применяется при формировании ИМ ВЭ для решения следующих задач:

- отражение структурной декомпозиции работ по ВЭ;
- разработка сетевой модели проекта ВЭ;
- анализ критического пути проекта ВЭ;
- отражение плановых сроков производства работ по ВЭ и поставки необходимого оборудования и материалов, сроков разработки рабочей документации для обеспечения выполнения работ по ВЭ;

- анализ потребностей для реализации проекта ВЭ в ресурсах, как трудовых, так и материальных, во времени.

Планы-графики различного уровня СКСП в составе ИМ ВЭ связываются с элементами трехмерных моделей ИС БДВЭ для визуального представления планируемого хода выполнения работ. Длительность и ресурсное обеспечение задач в СКСП, отражающих выполнение типовых технологических операций, должны формироваться на основе информационного наполнения нормированной базы данных технологий и с учетом требований СУТ. Для проверки длительности и требуемого объема необходимых людских и иных ресурсов для выполнения наиболее сложных технологических операций, отраженных в виде задач в СКСП, необходимо применять систему моделирования технологических операций.

По итогам имитационного моделирования в системе моделирования технологических операций сведения о длительности выполнения задачи, требуемых ресурсах и стоимости ее выполнения должны заноситься в СКСП.

Система расчета конфигурации радиационных полей (СРКРП) на основании данных ИС БДВЭ о радиоактивном загрязнении оборудования, трубопроводов, строительных конструкций блока АЭС обеспечивает расчеты конфигурации радиационных полей в локальных местах блока АЭС для определения дозовых нагрузок на персонал и радиационных нагрузок на технические средства, планируемые к применению для выполнения технологических операций по ВЭ.

На основании данных КИРО, введенных в ИС БДВЭ, система должна обеспечивать отражение на трехмерных моделях блоков АЭС, зданий и сооружений промплощадки радиационной обстановки, формируя с достаточной степенью приближения конфигурации распределения радиационных полей в пространстве. При изменении пространственной конфигурации помещений, оборудования и других компонентов система должна обеспечивать средства пересчета конфигурации полей.

Система расчета объемов РАО (СРОРАО) на основании информации ИС БДВЭ должна обеспечивать функции подсчета объемов РАО, образующихся при демонтированных работах и работах по дезактивации оборудования и систем, с указанием типов и категорий образующихся РАО.

СРОРАО обеспечивает в составе ИМ ВЭ решение следующих задач:

- прогнозирование объема и категорий РАО в выделенном объеме пространства на трехмерной инженерной модели здания или сооружения промплощадки АЭС;
- определение объемов и категорий образующихся РАО в операциях по демонтажу;
- расчет требуемого количества контейнеров для промежуточной изоляции (при демонтаже) или окончательной изоляции (после переработки на установках по переработке) образующихся РАО;
- прогнозирование заполнения пунктов долговременного хранения контейнеров с РАО на площадке АЭС на заданную дату реализации проекта ВЭ.

Система получает от ИС БДВЭ геометрические данные об объемах помещений, оборудования и трубопроводов, о материалах изготовления, об их радиационном загрязнении (данные КИРО, дозиметрического контроля и пр.). На основании указанной информации СРОРАО рассчитывает объемы образующихся РАО при демонтаже.

Расчет объемов РАО должен выполняться системой для заданного объема здания. В этом случае пользователь ИМ ВЭ должен определить интересующий его объем на трехмерной модели. Другой вариант – определение объемов РАО для заданной технологической операции. В этом случае СРОРАО взаимодействует с СМТО.

На основании указанных данных система должна давать прогноз потребных объемов контейнеров и заполнения хранилищ. Также система может сопоставить указанные данные с доступным объемом хранилищ, возможностями установок по переработке, доступностью транспорта для удаления РАО с места образования.

Система расчета дозовых нагрузок (СРДН) предназначена для оценки дозовых нагрузок персонала, привлекаемого к выполнению тех или иных технологических операций по ВЭ в условиях существующей конфигурации радиационных полей. Она обеспечивает также подсчет дозовых нагрузок на персонал, выполняющий работы по ВЭ, и радиационных нагрузок оборудования, применяемого для осуществления подобных работ (например, робототехнические комплексы, узлы электронной аппаратуры).

Для расчета дозовых нагрузок система использует информацию СРКРП о пространственной конфигурации радиационных полей при моделировании перемещений управляемых электронных образов (имитационных макетов) оборудования, механизмов, персонала в рамках применения СМТО при отработке тех или иных технологических операций.

Нормированная база данных технологий (НБДТ) содержит в себе перечень и описание апробированных референтных технологий по ВЭ (дезактивация, демонтаж и пр.) с нормативами их применения для расчета стоимости. Система является базовой для формирования планов выполнения работ по реализации проекта ВЭ в СКСП.

Для каждой применяемой технологии в НБДТ должны быть введены оценочные зависимости выходных параметров применяемых технологий от входных параметров. Оценки могут строиться на основании результатов выполнения альтернативных технологий в СМТО для выполнения определенных технологических операций по ВЭ.

Система укрупненного расчета стоимости (СУРС) обеспечивает на основании данных смежных систем расчет стоимости выполнения отдельных технологических операций по ВЭ с возможным учетом затрат на обращение с образующимися РАО.

Система должна обеспечивать укрупненную оценку стоимости реализации как всего Проекта ВЭ, так и его отдельных технологических операций, для которых выполняется имитационное моделирование средствами СМТО.

Для укрупненной оценки стоимости реализации всего проекта ВЭ СУРС должна обращаться за данными к СКСП, содержащей в себе интегральный план-график работ по реализации Проекта ВЭ с финансовыми оценками стоимости.

Для оценки стоимости выполнения отдельной технологической операции СУРС должна получать связанную информацию из системы моделирования технологических операций, СРОРАО, СРДН. По итогам имитационного моделирования выполнения технологической операции в СМТО финансовые оценки ее выполнения для соответствующей задачи должны передаваться в СКСП.

Система моделирования технологических операций (СМТО) обеспечивает отработку (моделирование) на трехмерных моделях блока АЭС тех или иных технологических операций с применением управляемых электронных образов (имитационных макетов) оборудования, механизмов, персонала с одновременным подсчетом дозовых нагрузок на персонал, радиационных нагрузок на применяемое оборудование, объемов и характеристик образующихся отходов, экономических аспектов осуществления моделируемых технологических операций.

СМТО обеспечивает имитационное моделирование на трехмерной модели блока АЭС, других зданий и сооружений промплощадки полного цикла выполнения

той или иной основной или вспомогательной технологической операции, необходимой для ВЭ. При выполнении моделирования специалисты осуществляют управление имитационными макетами оборудования, механизмов и персонала. Имитационные макеты могут перемещаться в виртуальном пространстве, взаимодействовать и ожидать друг друга. Имитационные макеты и производимые ими операции могут быть записаны как один сценарий. Основываясь на рабочих сценариях с привлечением систем СРДН, СРОРАО, СУРС должны вычисляться дозовые нагрузки, объемы и категории образующихся РАО, трудозатраты и стоимость осуществления каждого (альтернативного) сценария технологической операции.

Отрабатывая применение различных альтернативных технологий, отраженных в НТБД, варьируя количество привлекаемого персонала и механизмов для осуществления технологической операции, СМТО совместно с СРДН, СРОРАО и СУРС позволит разработать оптимальный план производства работ для технологической операции в пространстве координат «Объемы РАО»–«Стоимость»–«Сроки»–«Дозовые нагрузки»–«Ресурсы»–«Технологии» [10, рис. 1].

При моделировании отдельных операций требуется создание в СМТО на основании проектно-конструкторской и технической документации каталогов трехмерных объектов соответствующих элементов (роботы, контейнеры для РАО, оснастка для проведения демонтажа, элементы строительных конструкций и др.). При этом создаваемые элементы должны иметь идентичные реальным объектам свойства и параметры: кинематические, габаритные, степени свободы отдельных элементов объекта и др. (рис. 3).

Для повышения степени достоверности получаемых результатов целесообразно обеспечить применение в СМТО имитаций (копий) управляющих пультов для используемых в сценариях робототехнических средств, подъемно-транспортного оборудования и т.д.

Управление действиями имитационных макетов персонала (виртуальных специалистов) должно осуществляться с помощью специально разработанных интерактивных пользовательских интерфейсов, позволяющих указывать направления движения виртуальных специалистов, применение ими необходимых инструментов, взаимодействие с другими объектами сценария и т. д. Для обеспечения боль-

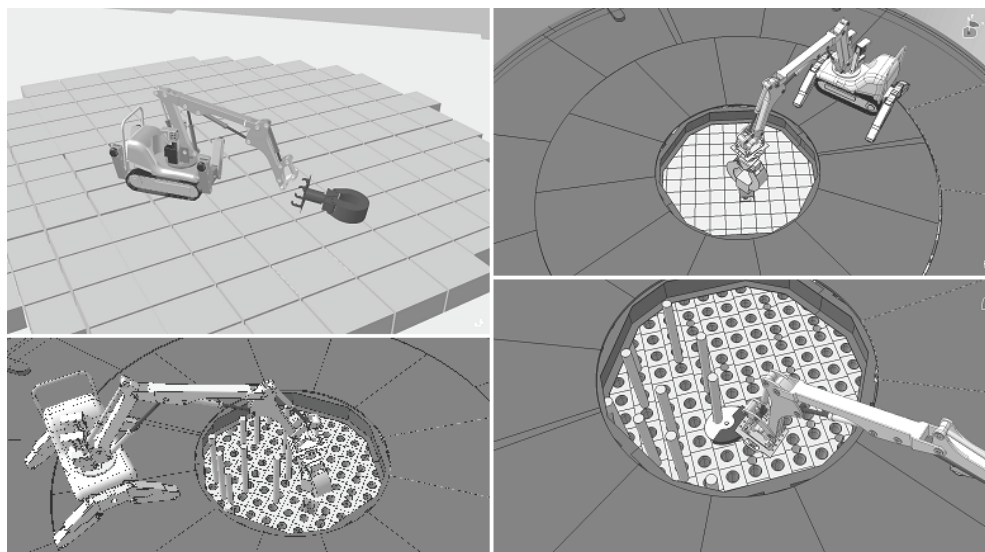


Рис. 3. Имитационное моделирование применения робототехнического комплекса при демонтаже внутриреакторных конструкций

шего «эффекта присутствия» целесообразно в СМТО применять технологии стереоскопического изображения.

Имитационно-обучающий тренажер (ИОТ) представляет собой комплекс программно-технических средств, реализующий элементы технологий виртуальной реальности, и применяемый для обучения персонала организаций, привлекаемого к практическим работам по ВЭ, выполнению последовательностей работ в рамках разработанных технологических операций.

Основная задача ИОТ – обеспечение детальной отработки демонстрационным персоналом выбранного с применением СМТО оптимального сценария осуществления технологической операции. Таким образом, ИОТ должен оценивать точность выполнения специалистом предписанных ему действий в рамках сценария. Достижение требуемого уровня точности действий тренируемого специалиста, а также слаженности действий всех специалистов, обучаемых в рамках сценария, будет являться одним из критериев возможности их допуска к проведению практических работ на объекте.

В состав ИОТ входят

- широкоформатные средства отображения стереоскопического изображения;
- имитации пультов для управления робототехническими комплексами, подъемно-транспортным оборудованием, механизмами и т.д.;
- необходимые программные средства для отображения сценария выполнения работ и интерактивного управления имитационными моделями оборудования и персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в статье структура функциональных элементов ИМ ВЭ блока АЭС и взаимосвязи между ними в настоящее время реализуются применительно к планированию вывода из эксплуатации блоков первой очереди Белоярской АЭС.

Литература

1. «Концепция подготовки и вывода из эксплуатации блоков атомных станций ОАО «Концерн Росэнергоатом» (вторая редакция). Концерн «ОАО Росэнергоатом», ОАО «ВНИИАЭС», 2010.
2. НП-012-99. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока АС. – М.: Ростехнадзор, 1999.
3. Типовая структура базы данных для вывода из эксплуатации блока атомной станции. Общие требования. РД 90 0582-2005. – М.: ФГУП «Концерн Росэнергоатом», 2005.
4. Концепция отраслевой информационной системы вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов». – М.: Госкорпорация «Росатом», 05.10.2009.
5. Тихоновский В.Л., Былкин Б.К. Место и роль информационных технологий при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №4. – С. 113-120.
6. The Greifswald Decommissioning Project. Energiewerke Nord GmbH, April. 2007.
7. Былкин Б.К., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л. и др. Использование информационных технологий при выводе из эксплуатации блоков атомных станций // Атомная техника за рубежом. – 2003. – № 5. – С. 3-11.
8. J. of Nucl. Sci and Techn. – 2007. – V. 44. – №. 4. – P. 649-656.
9. ALARA Planning and Teaching Tool Based on Virtual-Reality Technologies, Electric Power Research Institute, 2010г.
10. Былкин Б.К., Перегуда В.И., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л. Состав и структура имитационных моделей для оценки затрат на вывод из эксплуатации блоков АЭС // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110. – Вып. 2. – С. 66-70.

Поступила в редакцию 21.03.2012

The liquid metal coolants including lead containing metallic melts are used in a number of nuclear reactors at present. The impurities being contained in the coolant, primarily oxygen impurity, exert an important effect on its quality. Knowledge of the true values of the thermodynamic activity (TDA) of oxygen in different parts of the circuit enables this quantity to be held in a proper range. This is necessary to prevent slag formation and oxide phase crystallization in the "cold" parts of the circuit and preserve the protective oxide coating on the inner surfaces of structural materials in the "hot" sites. To do this, the OASCR calibration rig capable of reproducing the different modes of oxygen activity in liquid lead is constructed and tested. The OASCR calibration rig is entered in the State List. In SSC RF IPPE the OAA-1 analyzer is developed as well, to measure the oxygen activity in liquid lead and lead-bismuth. The analyzer makes it possible to take continuous remote measurements of the thermodynamic activity of oxygen in molten lead. In 2011 the OAA-1 analyzers were successfully tested using the OASCR test rig.

УДК 621.039.51

Optimization of Isotopic Composition Identification by Program Code MGAU using Statistical Methods \ V.I. Boyko, M.E. Silaev, Y.V. Nedbaylo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 8 titles.

This paper includes statistical analysis of isotopic composition results that were got with program MGAU. Multivariate analysis was chosen as suitable statistical method. In accordance with results of analysis the recommendations were made for using of this program code in combination with Low Energy Germanium Detector. These recommendations give opportunity to optimize of measurement process of uranium isotopic composition.

УДК 621.039.51

IRT Research Reactor Burnup Calculation for the Analysis of Conversion to Low Enrichment Uranium Fuel \ S.V. Ivakhin, A.I. Radaev, G.V. Tikhomirov, M.V. Shchurovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

Neutronic characteristics of IRT-3M fuel assembly with dioxide high enrichment uranium (HEU) fuel and uranium-molybdenum low enrichment uranium (LEU) fuel are considered. Results of calculation of irradiated fuel isotope composition are presented. Test problems for IRT cells with HEU and LEU fuel calculated by MCU and MCNP codes are proposed.

УДК 621.311.25.004.7

Creation and Application of Multidimensional Information Models of NPP Unit for Decommissioning \ B.K. Bylkin, V.L. Tikhonovsky, D.V. Chuyko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 illustrations. – References, 10 titles.

Basic principles of the imitational modeling application for the nuclear power plant decommissioning planning have been described.

УДК 532.546

The comparison of Two Approaches for Calculation of the Force Interaction of the Two-Phase Flow with Tube Bundle \ V.G. Asmolov, V.N. Blinkov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov, Y.V. Parfenov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The comparison of the two different approaches for simulation of the force interaction of the two-phase flow with the external surfaces is presented in the paper. The two-velocity two-phase flow model was developed for calculation of the two-phase pressure drop for the cross flow across tube bundle. The pressure drops across tube bundle were calculated with this model using two different approaches for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle. The calculated results