



На правах рукописи
УДК 621.311.25

ЧУЙКО Даниил Вадимович

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
ДЕМОНТАЖА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ
БЕЛОЯРСКОЙ АЭС**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

2014

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе «НЕОЛАНТ»
(ЗАО «НЕОЛАНТ») (г. Москва).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Тихоновский Владислав Леонидович

Официальные оппоненты: *Чесноков Александр Владимирович*,
доктор технических наук, ученый
секретарь Управления реабилитации НИЦ
«Курчатовский институт»

Енговатов Игорь Анатольевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры строительства объектов
тепловой и атомной энергетики
Московского государственного
строительного университета (ФГБОУ
ВПО «МГСУ»)

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Опытно-демонстрационный центр
вывода из эксплуатации уран-графитовых
ядерных реакторов» (ОАО «ОДЦ УТР»)

Защита состоится «__» _____ 20__ года в ____ часов __ минут
на заседании специализированного совета Д 520.009.06 при
НИЦ «Курчатовский институт» по адресу:
1231812, Москва, пл. академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке РНЦ «Курчатовский институт».

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
д.т.н., профессор

В.Г. Мадеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Особенностью сегодняшней ситуации является то обстоятельство, что проектирование основного числа эксплуатируемых блоков АЭС в РФ проводилось 40–50 лет назад с использованием существующих в то время технологий и без проработки на стадии проектирования решений по выводу из эксплуатации, в частности по демонтажу реакторной установки.

Вывод из эксплуатации (ВЭ) энергоблока АЭС – комплексный процесс, требующий тщательного планирования. Одним из наиболее опасных воздействий в процессе демонтажа является радиационное, поскольку при демонтаже происходит целенаправленное разрушение защитных барьеров безопасности и возможен вынос за пределы блока большого количества радиоактивных веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии, а также в виде аэрозолей. Факторы обращения с образующимися РАО и обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды играют наиболее значимую роль при практической реализации ВЭ.

Тщательное планирование процесса демонтажа требует одновременного учёта множества факторов, характеризующих как состояние выводимого из эксплуатации энергоблока, так и применяемое оборудование, и планируемые операции. Как правило, корректно учесть их путём умозрительных заключений весьма сложно, и следовательно, велик риск принятия решений, не обеспечивающих требуемый уровень безопасности.

При демонтаже реакторных установок зачастую нет альтернативы безлюдным технологиям. Тем самым существенно ограничивается присутствие персонала в местах проведения работ и возможность «по месту» принимать корректирующие меры в случае неожиданных ситуаций. Принятие неверных решений при проектировании процесса ВЭ может при демонтаже обернуться невозможностью его выполнения и необходимостью разработки нового проекта ВЭ.

Одним из способов решения указанных проблем является проведение интерактивного имитационного трёхмерного моделирования процедур демонтажа. Указанное моделирование позволяет автоматически учесть многие проблемные факторы.

Кроме того, для применения интерактивного имитационного трёхмерного моделирования при подготовке к ВЭ имеются предпосылки в положениях нормативно-технических документов.

Так, в публикациях МАГАТЭ содержатся рекомендации применения макетов и моделей реактора и блока в целом для подготовки персонала к выполнению процедур демонтажа. В отечественных нормативно-технических документах указывается на необходимость наделения информационных систем (ИС) баз данных по выводу из эксплуатации (БДВЭ) функциональными возможностями интерактивных имитационных трёхмерных моделей ВЭ блоков АЭС. В том числе, на это указывают положения руководящего документа ОАО «Концерн Росэнергоатом» РД ЭО 1.1.2.25.0582-2011 «База данных по выводу из эксплуатации блоков атомных станций. Общие требования». В этом документе, в частности, указывается, что «созданные и внесённые в БДВЭ модели инженерной графики должны быть использованы для решения следующих задач при ВЭ блока АС:

- для разработки технологических процессов проведения демонтажных работ при ВЭ;
- для обучения персонала, выполняющего работы при ВЭ;
- для составления отчётов и презентаций о проведённых работах при ВЭ».

Современный уровень развития информационных технологий, в том числе технологий создания компьютерных видеоигр, позволяет обеспечивать практически достоверное моделирование на трёхмерных моделях физических процессов в режиме реального времени. На сегодняшний день накоплен достаточный опыт создания и применения трёхмерных моделей для целей вывода из эксплуатации. Зарубежный опыт свидетельствует об эффективности применения данных технологий. Это создаёт убедительные предпосылки для создания и применения интерактивных имитационных трёхмерных моделей (ИИТМ) для отработки процедур демонтажа, а также для обеспечения подготовки к работе соответствующего персонала.

Вместе с тем, не выявлено работ, предлагающих системный подход к созданию и применению ИИТМ для отработки процедур демонтажа реакторных установок.

Этим обусловлена актуальность рассматриваемой работы.

Цель работы

Целью работы является разработка научно-методических и практических основ построения и применения интерактивных имитационных трёхмерных моделей для целей верификации выполнимости и оптимизации процесса демонтажа реакторных установок, а также последующей подготовки работников.

Практической целью работы является решение прикладных задач по верификации проектных решений по демонтажу графитовых кладок блоков 1, 2 Белоярской АЭС.

Научная новизна

Создан комплекс научно-методических подходов к построению и применению ИИТМ для решения задач верификации и оптимизации работ по демонтажу реакторных установок, а также для подготовки к нему персонала.

В том числе разработаны: способы генерации различных состояний графитовой кладки, методы расчёта временных и ресурсных затрат с целью выбора оптимизированного варианта выполнения операций, методические подходы к определению границ ИИТМ с применением информационных карточек, а также к формированию для отработки демонтажа трёхмерных моделей с физическими параметрами.

Практическая ценность

Для целей разработки технологии вывода из эксплуатации блоков 1, 2 Белоярской АЭС была создана ИИТМ демонтажа графитовых кладок реакторов указанных блоков. С помощью ИИТМ были верифицированы предложенные проектные решения по послойному дистанционно управляемому демонтажу графитовой кладки.

Автор выносит на защиту:

- результаты верификации на ИИТМ проектных решений по демонтажу графитовых кладок реакторов блоков 1, 2 Белоярской АЭС;
- комплекс научно-методических требований к составу, функциям, созданию и применению ИИТМ, обеспечивающей:
 - моделирование технологических операций;
 - построение банка данных операций;
 - верификацию и оптимизацию процесса демонтажа в части организации и технического оснащения работ;
 - подготовку персонала к выполнению демонтажных работ.

Личный вклад автора

Автор:

- принимал непосредственное участие в проведении исследований, осуществлял сбор, подготовку, анализ и систематизацию исходных данных, необходимых для выполнения работы, разрабатывал требования, алгоритмы и подходы к решению задач ВЭ при помощи ИИТМ;

- в составе группы разработчиков участвовал в разработке концепции создания и применения многомерных информационных моделей ВЭ блока АЭС при разработке проекта ВЭ, в рамках которой было предложено построение ИИТМ ВЭ в качестве набора взаимодействующих информационных систем;
- разработал методические подходы к созданию ИИТМ для отработки демонтажа реакторных установок и обеспечил их практическое применение;
- непосредственно руководил коллективом, который осуществлял разработку программного обеспечения ИИТМ демонтажа графитовой кладки реактора блока 1 Белоярской АЭС;
- непосредственно руководил коллективом, который осуществлял верификацию проектных решений по демонтажу графитовой кладки реактора АМБ-100.

Достоверность диссертационной работы

Достоверность работы подтверждена созданием ИИТМ и результатами верификации разработанной ФГУП «ФЦЯРБ» первой версии принципиальной технологии удаления просыпей ЯМ и разборки графитовой кладки реакторов 1 и 2 блоков, в части послойного демонтажа графитовой кладки с одновременным демонтажем каналов СУЗ, штанг и стяжек бокового отражателя.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты работы доложены и обсуждались на: девятой российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (Обнинск, 2006), восьмой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2012) (Москва, 2012) и на международной встрече экспертов МАГАТЭ по теме «Вывод из эксплуатации и реабилитация территорий после ядерных аварий» (International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident) (Вена, 2013).

Структура и объем диссертационной работы

Структура содержания работы включает: обозначения и сокращения, термины и определения, введение, 6 глав, заключение, список источников и одно приложение. Работа представлена на 136 страницах и включает 5 таблиц, 34 рисунка и 64 ссылки на литературные источники.

Публикации

Общее число публикаций – 14 (в том числе, в ведущих периодических изданиях ВАК – 4, в зарубежных источниках (МАГАТЭ) – 1).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся общие данные о работе, включая данные, свидетельствующие об её актуальности.

В разделе определена роль и место ИИТМ в процессе подготовки к выводу и вывода из эксплуатации блока АЭС. ИИТМ призвана обеспечить снижение рисков, издержек и повышение безопасности выбранного варианта демонтажа за счет многофакторного предварительного компьютерного имитационного моделирования, оптимизации отдельных наиболее сложных технологических операций, итеративной верификации операций по демонтажу на предмет удовлетворения сформулированным требованиям.

Место ИИТМ в процессе принятия проектных решений – служить инструментом, используемым как работниками выводимых из эксплуатации объектов, так и специалистами и руководителями. Основные задачи, решаемые при помощи ИИТМ: эксперимент, анализ результатов эксперимента, визуализация принятых решений. Место ИИТМ на этапе вывода из эксплуатации – служить информационно-обучающим тренажёром для привлечённых к демонтажу работников, а также инструментом моделирования операций для целей оперативного планирования и проработки корректирующих и уточняющих решений для специалистов, ответственных за проведение демонтажа.

Кратко перечислены важные для практических целей работы характеристики текущего состояния энергоблоков и реакторных пространств реакторов блоков 1, 2 Белоярской АЭС. Среди них: в реакторных пространствах находится заметное количество просыпей ОЯТ; в графитовой кладке имеются металлоконструкции (стяжки отражателя, каналы СУЗ); идентифицированы ожидаемые виды проблем извлечения блоков графитовой кладки (расколотый блок, трещиноватый блок, затёртый блок, козловые аварии).

В первой главе рассмотрен зарубежный опыт применения ИИТМ и их элементов для отработки процесса ВЭ реакторных установок.

Рассмотрены подходы, рекомендуемые МАГАТЭ, а также опыт применения компьютерного моделирования процесса демонтажа реакторных установок Triga (Республика Корея), JPDR и АЭС Fugen (Япония).

В МАГАТЭ подчёркивают необходимость тренировки персонала к выполнению работ по ВЭ с применением как натуральных, так и виртуальных макетов и моделей. В том числе указывается на целесообразность применения для компьютерного макетирования следующих технологий: трёхмерных моделей, созданных в соответствующих САПР; трёхмерных

моделей, созданных с применением гамма-сканнеров, гамма-спектрометров и лазерного сканирования, а также соответствующего программного обеспечения; интерактивного графического программного обеспечения робототехники; другого программного обеспечения.

В результате проведённого анализа выявлено, что в зарубежной практике имеются отдельные случаи применения имитационного и статического трёхмерного моделирования для решения задач верификации проектных решений по демонтажу реакторных установок различного назначения. Подходы к построению таких моделей не раскрыты.

По вопросу подготовки сотрудников объектов к демонтажным работам экспертами МАГАТЭ даны рекомендации по созданию систем поддержки процесса обучения сотрудников и проработаны общие требования к ним. Эти системы призваны обеспечить: ведение баз данных подготавливаемых работников, хранение учебных материалов (электронных курсов, контрольных вопросов), планирование расписания занятий, хранение отметок о выполнении работниками контрольных заданий (контрольных вопросов), данных о сертификации работников и сроков действия этих сертификатов. Интеграция в указанные системы интерактивных имитационных трёхмерных моделей (которые будут применяться в качестве учебных материалов и контрольных заданий) способна вывести их на качественно новый уровень, а именно применять в системах не только мультимедийные презентации и ответы на контрольные вопросы, а также и полномасштабные тренировки, при которых работники смогут оттачивать навыки выполнения поставленных перед ними задач, в условиях, близких к реальности. Далее в работе проработаны требования к ИИТМ для достижения указанных целей.

Во второй главе приведены научно-методические основы интерактивного имитационного трёхмерного моделирования. Сформулированы научно-методические требования к функционированию, а также методические подходы к созданию и последующему применению ИИТМ демонтажа реакторной установки. Сформулированы отдельные комментарии относительно того, как эти наработки применены при интерактивном имитационном трёхмерном моделировании демонтажа графитовых кладок блоков БелАЭС.

Введено понятие «имитационное моделирование» и имитационная модель (ИМ). Однозначного общепринятого определения указанных понятий не существует. Были проанализированы наиболее часто употребляемые формулировки, и для целей настоящей работы имитационное моделирование определено как *логико-математическое представление демонтажных работ, реализуемое в виде компьютерных алгоритмов и программ, имитирующих протекание реальных физических и технологи-*

ческих процессов во времени, включая действия персонала и используемого оборудования. А ИМ определена как модель, обеспечивающая имитационное моделирование проектируемого процесса демонтажа.

На этой основе дано определение интерактивному имитационному трёхмерному моделированию, которое сформулировано как *имитационное моделирование, обеспечивающее в режиме реального времени визуализацию демонтажных работ на трёхмерных моделях и учёт управляющих воздействий оператора*. ИИТМ определена как модель, обеспечивающая интерактивное имитационное трёхмерное моделирование проектируемого процесса демонтажа.

Определены применяемые в работе термины, отражающие классификацию объектов, из которых модель состоит (действующие объекты; пассивные перемещаемые объекты; неподвижные объекты), также классификацию по способам моделирования физических свойств объектов (статические и нестатические модели), и некоторые другие.

Верификация и оптимизация операций демонтажа в части организации и технического обеспечения работ осуществляется путём проведения серии «экспериментов» с ИИТМ, в ходе которых апробируются различные комбинации технического оснащения и порядка проведения работ. Последующая оптимизация производится путём выбора успешных вариантов с наиболее оптимальными результирующими параметрами. Параметры включают в себя: время выполнения операции, количество задействованных единиц технического оснащения, количество задействованных работников, а также качественные оценки результатов («удобство выполнения действий», «сложность подготовки работников к выполнению операции»).

По результатам верификации и оптимизации производится утверждение проектных решений. После этого созданная модель применяется для подготовки работников к выполнению работ.

Предложен следующий методический подход к созданию ИИТМ. Когда определён моделируемый процесс демонтажа и обрабатываемые на ИИТМ технологии, уточняются границы создаваемой модели.

В начале производится уточнение границ эксперимента с моделью – должны быть определены основные состояния демонтируемого объекта, для верификации и оптимизации операций между которыми целесообразно создание и применение ИИТМ. Для эксперимента определяются начальное и целевое конечное состояние. Для ИИТМ Белоярской АЭС эти состояния определены следующим образом: начальное состояние – «настил и защитное укрытие смонтированы над шахтой реактора; выемные части контейнеров для складирования графита и обрезков металлоконструкций, а также демонтажное оборудование размещено внутри за-

щитного укрытия; предварительно уже демонтировано N ($N=0, 1, \dots$) вышележащих слоёв графитовой кладки»; конечное состояние, которое требуется достичь, – «демонтирован очередной слой графитовой кладки».

Дальнейшее определение границ модели – это: выделение части демонтируемого объекта, подлежащего моделированию (блок, здание, помещение, реакторная установка или её часть и т. д.); выделение и классификация моделируемых объектов-составляющих. При этом важным является выделение из модели всех нестатических объектов, а также всех действующих объектов и пассивных перемещаемых, затем выявление их свойств и ограничений. Разработаны методические рекомендации по отнесению объектов к упомянутым классам.

В процессе принятия решений по вопросам определения границ моделей рекомендовано применение информационной карточки модели, форма которой разработана и представлена в данной главе. При создании одновременно нескольких ИИТМ для отработки одного процесса демонтажа указанные информационные карточки также рекомендовано использовать для последующей каталогизации моделей. Разработана информационная карточка для модели Белоярской АЭС.

Следующим шагом создания модели является выбор технологий и способов создания модели, удовлетворяющих сформулированным в работе требованиям. На этом шаге выявляются дополнительные и уточняются ранее выявленные ограничения. Затем модель разрабатывается.

Модели составляющих объектов должны иметь идентичные реальным объектам свойства и параметры: габаритные характеристики, для перемещаемых объектов также массу и момент инерции, а для нестатических объектов, кроме того, должны быть представлены дополнительные физические свойства, включающие степени свободы изменения положения составляющих объекта в узлах, значения генерируемых действующим объектом сил на собственные подвижные элементы и внешние объекты и др.

Рассмотрены и рекомендованы для конкретных задач моделирования основные способы построения трёхмерных моделей (реинжиниринг данных, фотограмметрия, лазерное сканирование). Для создания модели демонтажа графитовых кладок блоков Белоярской АЭС обоснован выбор способа реинжиниринга данных.

Определены основные функциональные требования, которые должны быть выполнены для решения задач моделирования. Сформулированные требования направлены на обеспечение наглядности, а главное, на максимальное приближение условий работы оператора модели к реальным условиям выполнения операций на объекте. Для процесса де-

монтажа при помощи дистанционно управляемых механизмов эти требования включают в себя: ограничение способов обзора модели теми способами, что планируются в реальности; применение натуральных пультов управления; режим «свободной камеры» в ИИТМ для решения задачи подбора оптимизированного расположения точек обзора. Для процесса демонтажа, выполняемого работниками, требования включают в себя: моделирование работников, их инструментария; поддержка различных способов управления моделируемыми работниками (режим «выдачи команд», режим «вселения в работника»). Общие требования к моделированию включают в себя: автоматическую запись проводимого эксперимента с ИИТМ, выполнение расчётов выходных параметров как во время эксперимента с моделью, так и по его завершении.

Определены виды современных информационных технологий, которые целесообразно применять для решения вопросов интерактивного имитационного трёхмерного моделирования (в частности, к этим технологиям относятся и современные технологии создания трёхмерных видеоигр).

Отмечена необходимость упорядочивать записи о смоделированных операциях, а также предоставлять возможности установки различных заметок как внутри записи операции (отметок, привязанных к моменту времени), так и общих ко всей готовой записи. Определены организационные и функциональные требования к формируемому таким образом банку данных операций с учётом, в том числе, ожидаемого значительного количества записей, их длительности, наличия двух видов действующих лиц, работающих с записями об операциях в ИИТМ (а именно лица, выполняющего моделирование (обладающего экспертизой в соответствующей области выполнения работ), и эксперта-аналитика, обрабатывающего указанные записи). В число этих требований входит требование обеспечения двух видов каталогов для сохранения записей: каталога с упрощённой структурой для первичного размещения записей, сразу после завершения эксперимента, и иерархического каталога для последующего хранения и обработки записей специалистами.

Рассмотренные функциональные требования к ИИТМ применены при разработке ИИТМ демонтажа графитовой кладки блоков Белоярской АЭС.

После завершения планирования работ по ВЭ, ИИТМ целесообразно использовать для подготовки персонала к выполнению работ согласно утверждённым сценариям. В работе определены требования для поддержки обучения работников, т.е. по превращению ИИТМ демонтажа в обучающий тренажёр. Эти требования во многом определяют возможности, необходимые для проверки выполнимости технологических опера-

ций, однако также определяют поддержку управления и отслеживания процессов обучения. В частности, для решения задач группового обучения в составе ИИТМ требуется предусмотреть технические средства для обеспечения презентаций. Для решения задач индивидуальных тренировок персонала требуется обеспечить функции сохранения результатов тренировок, функции проверки знаний, функции управления заданиями на обучение, функции отображения подсказок при моделировании в режиме обучения, функции автоматизации проверок результатов моделирования на соответствие критериям, заданным в задании на обучение, и некоторые другие.

Разработанная ИИТМ Белоярской АЭС позволяет производить обучение работников. Тем не менее, реализация перечисленных функций тренажёра является преждевременной, в связи с тем, что по результатам интерактивного имитационного трёхмерного моделирования выявлена необходимость корректировки технологической последовательности.

Применение созданной ИИТМ включает в себя: проработку методики испытаний технологии при помощи ИИТМ; проведение серии экспериментов с целью верификации; проведение серии экспериментов с целью оптимизации; утверждение выбранных решений по демонтажу; подготовку работников к выполнению демонтажа.

В третьей главе описана структура ИИТМ демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС. Ввиду схожести графитовых кладок реакторов АМБ-100 и АМБ-200, а также ввиду универсальности способа моделирования проблемных блоков графитовой кладки, результаты экспериментов с моделью применимы также для схожего демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-200 Белоярской АЭС.

Приводится краткое описание первой версии верифицируемых основных технологических решений последовательности работ по демонтажу графитовой кладки и удалению просыпей ЯМ из кладки и конструкций реактора. Модель создана для отработки решений по выполнению этапа № 2 в части послыйного демонтажа графитовой кладки с одновременным демонтажем каналов СУЗ, штанг и стяжек бокового отражателя (технологические решения в целом предусматривают два этапа). Демонтаж производится при помощи дистанционно управляемого механизма (ДУМ) марки BROKK, который располагается внутри защитного укрытия с перемещаемым по шахте реактора настилом. В настиле предусмотрены выемные люки.

Дано описание моделируемого алгоритма демонтажа графитовой кладки. Демонтаж каждого слоя производится в следующей последовательности: выемка блоков активной зоны; выемка блоков зоны отражателя; срезание стояков СУЗ; перемещение рабочей площадки настила.

Последовательность выполнения каждого из описанных шагов представлена на алгоритмических схемах, отмечены основные особенности выполнения каждого из указанных шагов, влияющие на создание модели.

Модель является полностью детерминистической – отработка присутствующих в реальности случайных факторов, а именно проблемных состояний блоков текущего извлекаемого слоя кладки и модели раскалывания трещиноватого блока, производится без использования генератора случайных чисел. Так, расположение и тип дефектов очередного демонтируемого слоя кладки задаются оператором в качестве параметров моделируемой операции. Такой способ позволяет оператору, выявив те участки кладки, где проблема указанного вида в наибольшей степени угрожает результативности демонтажа, смоделировать эту проблему именно в указанном месте. Раскол блока моделируется для иллюстративных целей при помощи заранее сделанной заготовки.

Для модельных экспериментов определены входные параметры и переменные. Параметры, помимо указанных выше дефектов графитовых блоков, включают в себя данные о расположении ДУМ, выемных ёмкостей контейнеров и крышек настила. Состояния блоков, которые в процессе эксперимента с моделью ещё не были перемещены со своего исходного места, можно поменять, не прекращая эксперимент. Входными переменными являются команды, подаваемые оператором с пульта управления ДУМ.

В процессе эксперимента производится вычисление выходных переменных. После сохранения записи итоговые значения этих переменных становятся выходными параметрами операции. Выходные параметры смоделированной операции включают в себя как параметры, определяемые автоматически, так и параметры, представляющие собою качественную оценку оператором результатов моделирования. Автоматически определяемый параметр – время выполнения операции – определяется путём прямого замера времени моделирования. Для других автоматически определяемых параметров, объёма извлечённых блоков и металлоконструкций и их массы, определены алгоритмы и методики расчётов.

ИИТМ состоит из следующих расчётных функциональных блоков: блока формирования системного времени, блока расчёта физического взаимодействия, блока визуализации информации, блока расчёта выходных переменных, блока преобразования управляющих воздействий. Кратко изложены основные принципы функционирования ИИТМ.

Системное время формируется следующим образом. Создаётся последовательность моментов изменения состояния модели, распределённых с равными интервалами по оси времени.

Моделирование операции в ИИТМ производится путём расчёта в каждый квант системного времени положения и состояния перемещаемых моделируемых объектов на основании законов физики (законов классической механики), для чего у моделируемых объектов определены физические свойства. Модель имеет ряд допущений и ограничений, указанных в работе. Часть свойств объектов моделировались только для иллюстративных целей.

В эти же кванты времени производятся расчёты, необходимые для визуализации. В блоке визуализации реализована визуализация столкновений элементов ДУМ с другими объектами – пришедшие в соприкосновение объекты подсвечиваются другим цветом.

Описаны основные особенности моделирования физических свойств перемещаемых объектов и действующего объекта – ДУМ. Для ДУМ, кроме этого, определены правила перерасчёта управляющих воздействий оператора в переменные движения ДУМ. Параметры перерасчёта определены на основании документации на ДУМ и натурных замеров.

В итоге в процессе создания ИИТМ, в том числе в процессе проработки моделируемых физических свойств, были выявлены следующие особенности процесса, для которых целесообразна отдельная верификация (расчётными методами или натурными испытаниями), а отработка на ИИТМ производилась в предположении, что эти вопросы уже решены:

- требуется исключить возгорание графитовых блоков графитовой кладки при распиле металлоконструкций, находящихся в ней (каналов СУЗ и стяжек отражателя);
- требуется обеспечить достаточную прочность захвата применяемыми насадками ДУМ графитовых блоков и обрезков металлоконструкций;
- требуется исключить проскальзывание ДУМ по поверхности настила как при движении, так и при рабочем положении на упорах.

В четвёртой главе описана постановка задачи верификации, дано краткое описание использованных для этих целей функциональных возможностей программного комплекса ИИТМ, приведены и проанализированы результаты верификации демонтажа графитовых кладок реакторов АМБ-100 и АМБ-200 БелАЭС при помощи созданной ИИТМ.

Основными задачами верификации являлись: проверка практической реализуемости задачи послойного извлечения графитовой кладки реактора с применением предложенных технических средств; выявление «узких мест» предложенных технических решений; выработка предложений по корректировке технологии.

Разработана методика испытаний предложенной технологии при помощи ИИТМ, в соответствии с которой поверхность настила была разделена на зоны различной конфигурации, и для каждой из них был определён свой набор начальных расположений ДУМ, контейнеров (точнее, размещаемых внутри укрытия выемных частей транспортных контейнеров), мест размещения для снятых листов настила.

В созданном программном комплексе ИИТМ предусмотрено два режима работы: имитация и воспроизведение. Первый предназначен для выполнения имитационного моделирования, второй – прежде всего для анализа его результатов. Программный комплекс ИИТМ выполнен в двухэкранной конфигурации (экран модели и экран графического пользовательского интерфейса).

В режиме имитации пользователь с помощью устройств ввода в режиме реального времени управляет ДУМ, выполняя тем самым действия по демонтажу кладки. В качестве устройств ввода применяются полномасштабные макеты пультов управления ДУМ «BROKK». В режиме имитации обеспечивается идентификация столкновения объектов модели (столкнувшиеся объекты подсвечиваются), моделируется обзор места работ с телекамер в режиме, максимально приближенном к предполагаемым условиям в ходе демонтажа (рис. 1).

Также предусмотрена так называемая свободная камера, которая может перемещаться в любых направлениях по сцене. В режиме имитации свободная камера используется в случае, если остальные камеры не позволяют дать необходимый уровень обзора для выполнения требуемой операции. При этом все факты включения свободной камеры фиксируются и отображаются в режиме воспроизведения, чтобы показать, что для выполнения данной операции в реальных условиях предложенных камер недостаточно, или их расположение необходимо изменить. В режиме воспроизведения указанная камера служит для обзора сцены при воспроизведении записанного эксперимента.

В режиме воспроизведения имеется возможность просматривать ранее записанные эксперименты, а также возможность в любом месте эксперимента остановить воспроизведение и продолжить имитацию с выбранного момента записи.

Для учёта различных аварийных состояний извлекаемых блоков графитовой кладки в программном комплексе ИИТМ предусмотрен механизм моделирования выбираемых пользователем аварийных состояний. Реализующий это пользовательский интерфейс позволяет определить состояние очередного слоя графитовой кладки, задав на интерактивной графической схеме расположение проблемных графитовых блоков и виды проблем.

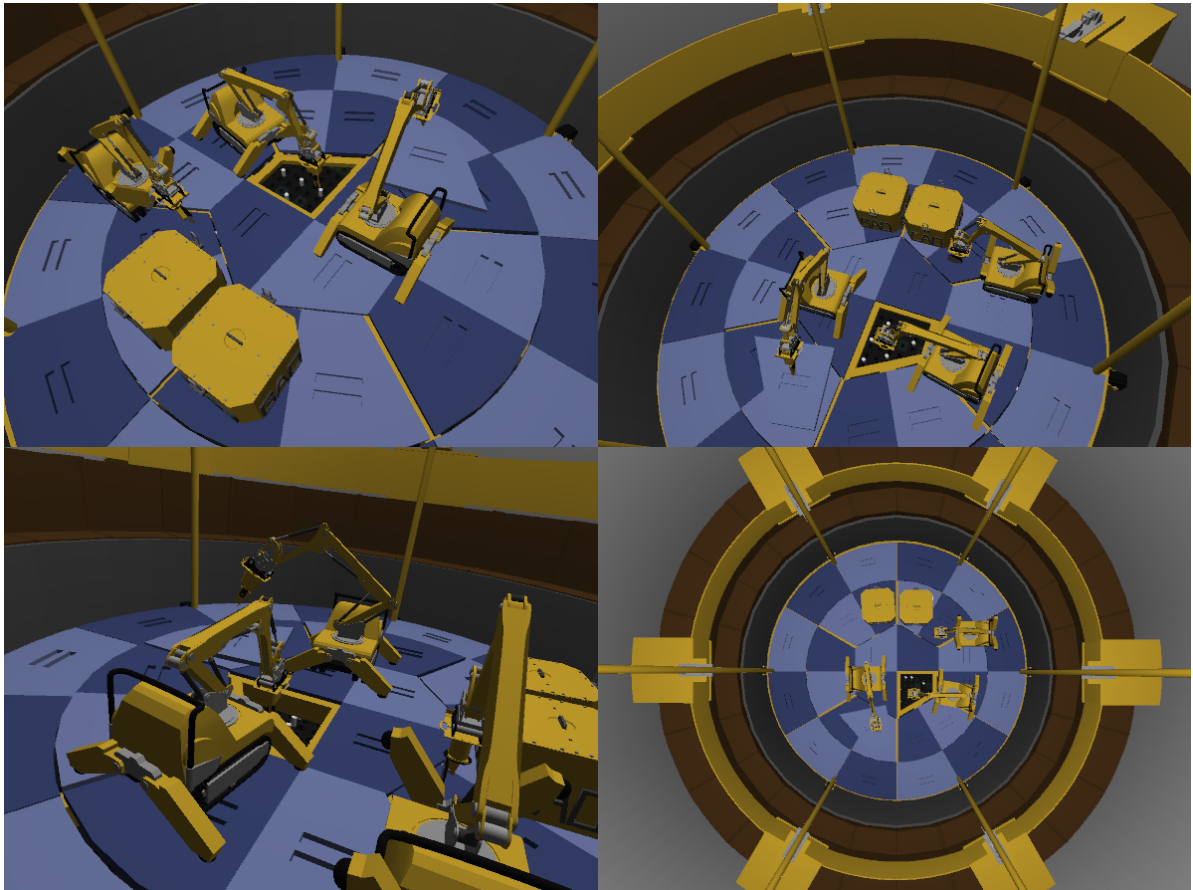


Рис. 1 – ИИТМ демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС. Обзор сцены с четырёх видеокамер

Другие возможности графического пользовательского интерфейса включают в себя: управление записями и сценами; управление камерами; управление заметками (комментариями); отображение управляющих воздействий; отображение объёмов извлечённых РАО (в виде графитовых блоков и металлических объектов).

В результате верификации при помощи ИИТМ был выявлен ряд недоработок, не позволяющих осуществить демонтаж графитовой кладки предложенным способом, а именно: нецелесообразность смены насадок ДУМ в процессе работы; сложность работы с предложенными видеокамерами; доступность для извлечения при помощи ДУМ только порядка 40% блоков слоя графитовой кладки (основная причина недоступности: мешают опорные конструкции настила) (рис. 2); необходимость предварительного раскола слипшихся блоков (ограничения по грузоподъёмности оборудования).

По каждому из видов проблем были сделаны предложения по корректировке предложенных технических решений. Рекомендовано после принятия корректирующих мер к технологии, при помощи разработанного программного комплекса и актуализированной ИИТМ выполнить

верификацию, а затем оптимизацию обновлённой версии технологии; применить ИИТМ для обучения и тренировки персонала, которому предстоит выполнить демонтаж.

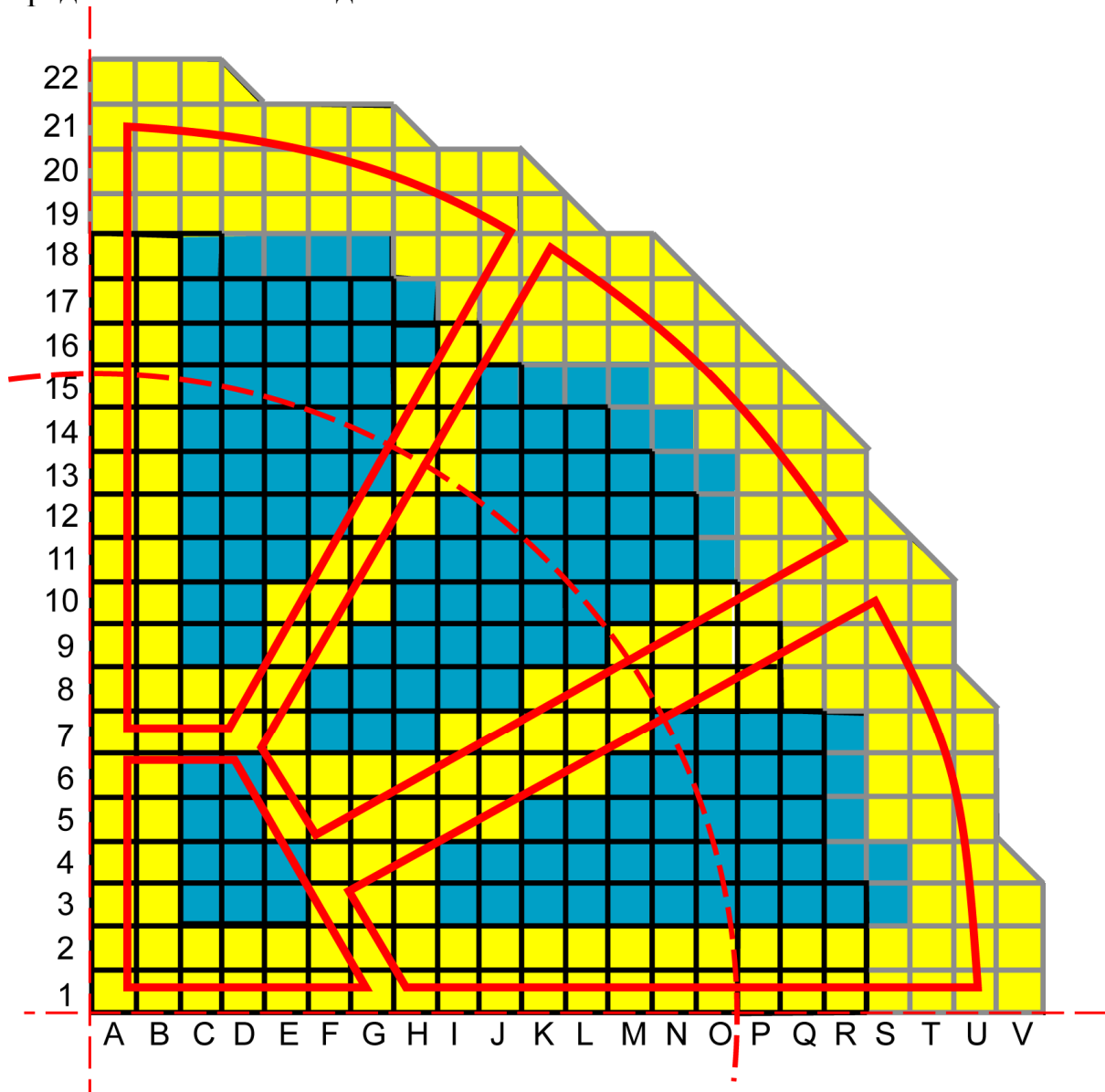


Рис. 2 – Общая схема доступности блоков для извлечения (жёлтым отмечены блоки, недоступные для извлечения; синим – блоки, которые можно извлечь)

Таким образом, применение ИИТМ в процессе разработки технологии демонтажа графитовой кладки позволило ещё на этапе эскизного проектирования применяемого оборудования и технологического процесса демонтажа выявить недостатки, которые не позволяют применить эту технологию в полном объёме. Это позволило избежать необоснованных затрат и серьёзных технических проблем, связанных с попытками её практического воплощения.

В пятой главе приведены другие примеры применения имитационного трёхмерного моделирования (как интерактивного, так и неинтерактивного), для которого были использованы результаты данной работы.

Эти примеры включают в себя отработку технологий, применяемых при ВЭ реакторов ПУГР ФГУП «ПО «МАЯК».

Были созданы следующие ИИТМ: ИИТМ отработки демонтажа каналов и металлоконструкций подреакторного пространства ПУГР АВ-1, а также имитационная трёхмерная модель реконструкции системы сброса грунтовых вод ПУГР АВ-1 и АВ-2.

В шестой главе рассмотрены перспективы развития ИИТМ в плане расширения пространства оптимизации технологических операций и реализации возможностей оптимизации проекта ВЭ в целом.

Расширенное целевое пространство оптимизации предложено в виде следующего набора составляющих: удобство работы, сложность подготовки работников, ресурсы, сроки, стоимость, риски, дозозатраты, объёмы РАО.

В основе решения задачи оптимизации проекта ВЭ положен принцип структурной декомпозиции работ с выполнением для задач составляющих этой структуры интерактивного имитационного трёхмерного моделирования. Целью экспериментов с ИИТМ является выявление значений оптимизируемых параметров. Проект в целом при этом может быть оптимизирован, либо через оптимизацию отдельных составляющих, либо путём выбора оптимальной последовательности из нескольких альтернативных.

Для оптимизации работ по дозозатратам и образующимся РАО в общих чертах проработаны методические вопросы: подготовки модели, измерения параметров по результатам эксперимента с моделью, вопросы оптимизации проекта ВЭ в целом.

Предложены подходы к выполнению оптимизации проекта ВЭ по финансово-экономическим показателям, а именно по затратам на демонтаж, на дезактивацию, на обращение с РАО, а в случае аварийных блоков также по затратам на обращение с ядерными материалами, на удаление радиоактивных и нерадиоактивных рабочих сред. В процессе моделирования автоматически измеряются время исполнения работ, расход материалов и ресурса оборудования, объёмы РАО и других отходов, которые затем по действующим ставкам привлечения, коэффициентам и тарифам могут быть пересчитаны в затраты. Оптимизация проекта в целом при этом может быть произведена путём подбора оптимальной последовательности смоделированных в ИИТМ операций.

Предложен механизм идентификации «слабых мест» в предлагаемых последовательностях работ по рискам, основанный на экспертных оценках рисков отдельных операций.

В заключении диссертационной работы сформулированы ее основные результаты и выводы:

1) Для создания и применения интерактивных имитационных трёхмерных моделей в процессе подготовки и выполнения работ по демонтажу реакторных установок существуют убедительные предпосылки (риски вынужденной остановки демонтажных работ и необходимости разработки нового проекта демонтажа в случае ошибочных проектных решений, уровень развития информационных и компьютерных технологий, требования нормативно-технических и руководящих документов и др.).

2) Определены основные задачи применения ИИТМ для демонтажа реакторных установок:

- при разработке проектов ВЭ – это верификация, оптимизация и визуализация работ по демонтажу, а в перспективе – также и планирование работ по ВЭ;
- при подготовке и выполнении работ по ВЭ – это подготовка персонала к выполнению работ.

3) Разработаны научно-методические и практические основы реализации ИИТМ демонтажа реакторной установки. Для этого в настоящей работе:

- проанализирован зарубежный опыт применения технологий имитационного моделирования для ВЭ объектов;
- сформирован понятийно-терминологический аппарат;
- определены и обоснованы требования к ИИТМ и методические подходы к её созданию и применению;
- описанные разработки применены при практической реализации ИИТМ блоков 1, 2 БелАЭС.

4) Разработанные и использованные для БелАЭС требования и методические подходы обеспечили достижение цели работы в первую очередь за счёт решения следующих задач:

а) задач создания ИИТМ:

- определение границ моделируемого эксперимента;
- определение границ и состава модели;
- выбор способов разработки и технологий реализации ИИТМ;
- выявление и уточнение ограничений создаваемой модели;

б) задач, решение которых обеспечивается функциями программного комплекса ИИТМ:

- моделирование операций по демонтажу и определение их выходных параметров;
- формирование банка данных операций;
- подготовка работников к выполнению работ по демонтажу.

5) Разработан программный комплекс ИИТМ для демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 БелАЭС. Разработанная ИИТМ применена для проверки предложенной технологии демонтажа кладки реактора и удаления просыпей ЯМ, в части отработки процесса послойного демонтажа блоков графитовой кладки. Для этого была разработана, а затем использована методика испытаний предложенной технологии разборки при помощи ИИТМ. Сделанные выводы по результатам применения ИИТМ демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 могут быть применены и к технологии демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-200. В результате применения разработанной ИИТМ были выявлены недостатки, делающие практически невозможным успешное завершение демонтажа графитовой кладки в соответствии с предлагаемой технологией. Выявленные с помощью разработанной ИИТМ «узкие места» предлагаемой технологии были проанализированы и по ним предложены корректирующие решения. Таким образом, выполненная с помощью ИИТМ верификация предлагаемой технологии демонтажа графитовой кладки позволила избежать обусловленных ее дальнейшим практическим применением рисков прерывания демонтажных работ и последующей переработки проектной документации на вывод из эксплуатации объекта.

б) По результатам моделирования технологии демонтажа реакторов АМБ сформулированы предложения, которые включают:

а) корректировку технологии:

- изменение конструкции настила;
- увеличение числа ДУМ;
- изменение схемы видеонаблюдения;
- добавление инструментов для раскола слипшихся блоков;

б) задачи для дополнительной проработки:

- исключить возгорание графита при распилах;
- исключить выскальзывание блоков кладки и металлоконструкций из захватов ДУМ;
- исключить проскальзывание ДУМ по поверхности настила.

7) Определены перспективы расширения задач и функций ИИТМ с целью добавления новых возможностей оптимизации технологических операций и проекта ВЭ. Они включают в себя:

- оптимизацию технологий выполнения работ по дозовым нагрузкам на задействованных работников;
- оптимизацию работ по образующимся РАО;
- оценку финансово-экономических показателей и оптимизацию проектов ВЭ по этим показателям;
- оптимизацию проектов ВЭ по рискам.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Былкин Б.К., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Создание и применение многомерных информационных моделей блока АЭС при выводе из эксплуатации. – Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2012, № 3, с. 91–101.
2. Былкин Б.К., Бунто П.А., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Применение имитационно-обучающего тренажёра для демонтажа блоков АЭС. – Атомная энергия, 2012, том 113, вып. 6, с. 333–336.
3. Черников О.Г., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л., Кононов В.В., Чуйко Д.В., Былкин Б.К. Создание базы данных для вывода из эксплуатации блоков Ленинградской АЭС. – Электрические станции, 2011, № 11, с. 2–5.
4. Тихоновский В.Л., Кононов В.В., Чуйко Д.В., Былкин Б.К., Шапошников В.А. Способы представления и организации информации для базы данных вывода из эксплуатации блока АЭС. – Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 6, с. 391–394.
5. V. Tikhonovsky, D. Chuyko, V. Kononov, N. Salnikov. Experience of Implementation of Information Technologies for Preparation for the Decommissioning and Decommissioning (IAEA-CN-211/16PD). – International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident. IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 28 January–1 February 2013.
6. Чуйко Д.В., Былкин Б.К., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л., Бунто П.А., Юшицин К.В., Михайлов Д.П. Отработка процесса демонтажа графитовой кладки с применением имитационной трехмерной модели. – Восьмая международная научно-техническая конференция "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Тезисы докладов, с. 187–188, М. 2012.

7. Былкин Б.К., Кононов В.В., Бунто П.А., Гуляев О.В., Свиридов Д.В., Трифонов В.Е., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Опыт применения имитационной модели демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС. – «Исследования наукограда», № 2 апрель–июнь 2012, с.59–64.
8. Боронин В.В., Бунто П.А., Кононов В.В., Свиридов Д.В., Тихоновский В.Л., Трифонов В.Е., Чуйко Д.В. Имитационное моделирование для верификации работ по ВЭ ЯРОО и по обращению с РВ, ОЯТ и РАО. – Информационный бюллетень «Ядерная и радиационная безопасность России», выпуск 15, 2013, с. 97–102.
9. Черников О.Г., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л., Кононов В.В., Чуйко Д.В., Былкин Б.К. Разработка базы данных для вывода из эксплуатации ЛАЭС. – Журнал «Рациональное управление предприятием», 2008, № 1, с. 36–38.
10. Перегуда В.И., Шапошников В.А. Чуйко Д.В., Тихоновский В.Л., Бунто П.А. Информационная система радиационного мониторинга на блоках Ленинградской АЭС. – Восьмая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Пленарные и секционные доклады, с. 508–511, М. 2012.
11. Тихоновский В.Л., Кононов В.В., Чуйко Д.В., Былкин Б.К., Шапошников В.А. Применение информационных технологий при выводе из эксплуатации блоков АЭС. – МНТК–2008, Москва 21–23 мая 2008 г. Пленарные и секционные доклады, с. 746–748.
12. Былкин Б.К., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Способы создания трёхмерных моделей блоков. – Атомная техника за рубежом, 2012, № 7, с. 3–11.
13. Былкин Б.К., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Анализ зарубежных систем классификации и маркировки компонентов блоков АЭС при их применении в информационных системах. – Атомная техника за рубежом, 2006, № 9, с. 3–9.
14. Былкин Б.К., Шапошников В.А., Садовой Ю.К., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. База данных как инструмент планирования радиационной обстановки при выводе из эксплуатации блока АЭС. – IX Российская Научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 24–26 октября 2006 г., г. Обнинск, Тезисы докладов, с. 324–325.