

В. Г. Батий, Д. Н. Романов, С. С. Подберезный, А. И. Стоянов, В. Н. Щербин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова 36а, Чернобыль, 07270, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЕРХНИХ ОТМЕТОК ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

Разработана имитационная модель процесса извлечения топливосодержащих материалов с верхних отметок объекта "Укрытие" при помощи навесного оборудования системы основных кранов нового безопасного конфайнмента.

Ключевые слова: имитационная модель, моделирование физических и технологических процессов, топливосодержащие материалы, объект "Укрытие".

Введение

Проектирование нового безопасного конфайнмента (НБК) над объектом "Укрытие" ЧАЭС (так называемого 1-го пускового комплекса проекта строительства НБК – ПК-1) выполнялось в условиях, когда отсутствовала четкая концепция будущего извлечения топливосодержащих материалов (ТСМ) и обращения с радиоактивными отходами (РАО). Единственным требованием к НБК на начальном этапе демонтажа нестабильных конструкций объекта "Укрытие" (ПК-2 проекта) при помощи системы основных кранов НБК является резервирование необходимого технологического пространства для дальнейшего размещения и использования технологий извлечения ТСМ и других РАО. Это создает определенные риски, связанные с тем, что извлечение ТСМ при помощи созданных систем НБК может быть затруднено или даже невозможно для отдельных скоплений ТСМ. Кроме того, создание технологий и инфраструктуры обращения с ТСМ займет много времени, а вся деятельность, связанная с извлечением ТСМ, должна завершиться до того, как технологические системы НБК морально и физически устареют. Начатые реализовываться на начальной стадии международного Плана обеспечения мероприятий (ПОМ) задачи, связанные с технологиями обращения с ТСМ, включая демонстрационный эксперимент, исключены из задач.

Риски воздействия ТСМ 4-го энергоблока на окружающую среду и персонал НБК будут сохраняться до тех пор, пока ТСМ не будут извлечены из объекта "Укрытие". Поэтому чрезвычайно актуальной является разработка принципиальных технологических решений по извлечению ТСМ с использованием систем НБК и обоснование безопасности в процессе их реализации, которая должна выполняться параллельно с проектированием и сооружением НБК, что позволит максимально возможно учесть потребности будущей деятельности по извлечению ТСМ при создании НБК.

По сути, извлечение ТСМ из различных зон объекта "Укрытие" – это необходимость решения каждый раз комплекса научных задач, обусловленная отсутствием достаточного количества данных о характеристиках ТСМ, а также о динамике изменения этих характеристик со временем. Кроме того, извлечение ТСМ – это и масштабный инженерный эксперимент, ставить который допускается лишь при условии гарантий безопасного выполнения работ и эффективного расходования средств. В этом направлении в ИПБ АЭС НАН Украины ведутся работы по разработке принципиальных технологических решений по извлечению ТСМ с использованием технологических систем и инфраструктуры НБК, которые разрабатываются для демонтажа нестабильных конструкций ОУ. Как было показано в [1], самой первоочередной задачей является извлечение ТСМ с верхних отметок ОУ, так как эти скопления приведут к наибольшим дозам персонала при эксплуатации НБК, к радиоактивному загрязнению конструкций и характеризуются максимальными рисками для загрязнения окружающей среды в случае возможных аварий.

В настоящей работе разработана компьютерная модель процесса извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие" после демонтажа его легкой кровли и трубного наката и проведено тестовое компьютерное моделирование процесса. Такие разработки необходимы для обоснования выполнимости и безопасности предлагаемых решений извлечения ТСМ с помощью систем НБК с максимальной наглядностью и минимальной затратностью.

Выбор типа модели

Моделирование является одним из средств познания действительности. Этот процесс состоит из двух больших этапов: разработки модели и анализа разработанной модели. Моделирование позво-

© В. Г. Батий, Д. Н. Романов, С. С. Подберезный, А. И. Стоянов, В. Н. Щербин, 2014

ляет исследовать суть сложных процессов и явлений с помощью экспериментов не с реальной системой, а с ее моделью. Для принятия разумного решения по организации работы системы не обязательно знание всех характеристик системы, всегда достаточен анализ ее упрощенного, приближенного представления [2]. Причем в зависимости от решаемой задачи тип модели будет различным (таблица). Основанием классификации является ключевая задача, для которой модель реализуется и используется, от централизации инженерных данных по объекту до моделирования физических и технологических процессов и обучения персонала [3].

Типы разработанных моделей в зависимости от решаемых задач

Ключевая задача	Другие задачи	Тип рекомендуемой модели объекта "Укрытие" и НБК	Технологии для создания модели объекта "Укрытие" и НБК
1. Визуализация объемов и взаимного расположения объектов 2. Проверка на пространственные коллизии при проектировании (3D моделировании) объекта	1. Получение планов, разрезов, изометрических чертежей 2. Создание видеоматериалов, анимации	Инженерная 3D модель помещений объекта "Укрытие" и НБК	Системы трехмерной графики и анимации 3ds max 2011 Системы автоматизированного проектирования AutoCAD 2011
1. Моделирование физических и технологических процессов 2. Оптимизация технологических процессов 3. Отладка основных проектных решений на модели, а не в процессе строительства объекта	1. Визуализация и моделирование процесса демонтажа сложного негабаритного оборудования 2. Моделирование аварийных ситуаций и выбор наилучших способов их устранения	Имитационная модель извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие"	Программы для визуализации и/или программы для симуляции физических явлений - Unity3D 3.4
Обучение монтажных бригад, строительного и обслуживающего персонала	Обучение и тренировки персонала перед началом работ по извлечению ТСМ	Интерактивная модель извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие", разработанная на базе имитационной модели извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие"	Программы для визуализации и/или программы для симуляции физических явлений - Unity3D 3.4

Основные принципы при разработке имитационных/интерактивных моделей

Проблема создания перспективных систем дистанционного управления роботами-манипуляторами в настоящее время стала одной из актуальнейших проблем робототехники. В первую очередь это обусловлено резко возросшей необходимостью проведения работ в так называемых экстремальных условиях, т.е. в условиях, характеризующихся высокой потенциальной опасностью для здоровья и жизни человека, что исключает проведение этих работ непосредственно человеком и требует использования роботов.

В отличие от использования роботов для автоматизации производства, для которого характерна строгая упорядоченность внешней среды, в которой функционирует робот, при проведении работы в экстремальных условиях имеет место противоположная картина. В этом случае внешняя среда робота, как правило, является плохо упорядоченной и недетерминированной. Причем информация о ней является неполной, и эта информация может быть динамичной и непредсказуемой. Это требует постоянного пополнения и уточнения информации, корректировки принятых решений на основании вновь полученных данных. Кроме того, выполняемые операции обычно являются нетиповыми и достаточно сложными [4]. Эти обстоятельства учитывались при разработке СОК НБК.

Система основных кранов (СОК) обеспечивающая демонтаж нестабильных конструкций объекта "Укрытие" и последующие работы по обращению с ТСМ и РАО внутри НБК, включает в свой состав, помимо технологического и электротехнического оборудования, систему контроля и управ-

ления (СКУ) СОК, которая обеспечивает выполнение всех технологических операций с основными кранами.

Архитектура СКУ СОК выполнена двухуровневой, распределенной, обладающей функциональной конфигурацией.

Все стандартные производственные задачи выполняются с автоматизированного рабочего места командного и автоматизированного рабочего места тележек. Все автоматизированные рабочие места включают в себя интерфейс "человек - машина", представляющий собой панель сенсорного экрана [5].

Использование полностью автоматизированных систем не предусмотрено, что согласуется с рекомендациями МАГАТЭ [6]. Полностью роботизированные и автоматизированные системы не способны реагировать на сложные непредсказуемые ситуации – только обязательное участие человека-оператора в процессе управления действиями робота может обеспечить эффективное функционирование роботов в экстремальных условиях. Причем управление должно быть дистанционным, чтобы человек был удален из опасной зоны [4].

Имитационное моделирование – это разработка и выполнение на компьютере программной системы, отражающей поведение и структуру моделируемого объекта. Компьютерный эксперимент с моделью состоит в выполнении на компьютере данной программы с разными значениями параметров (исходных данных) и анализе результатов этих выполнений [2].

Инженерные модели объекта "Укрытие" и НБК

Ниже приведены примеры различных компьютерных моделей, разработанных в рамках данной работы. На рис. 1 представлен разрез конструкций НБК и объекта "Укрытие" по плоскости, проходящей через центр разрушенного реактора. На рисунке показаны основные скопление ТСМ от верхних до нижних отметок помещений объекта "Укрытие", а также зона действия СОК.

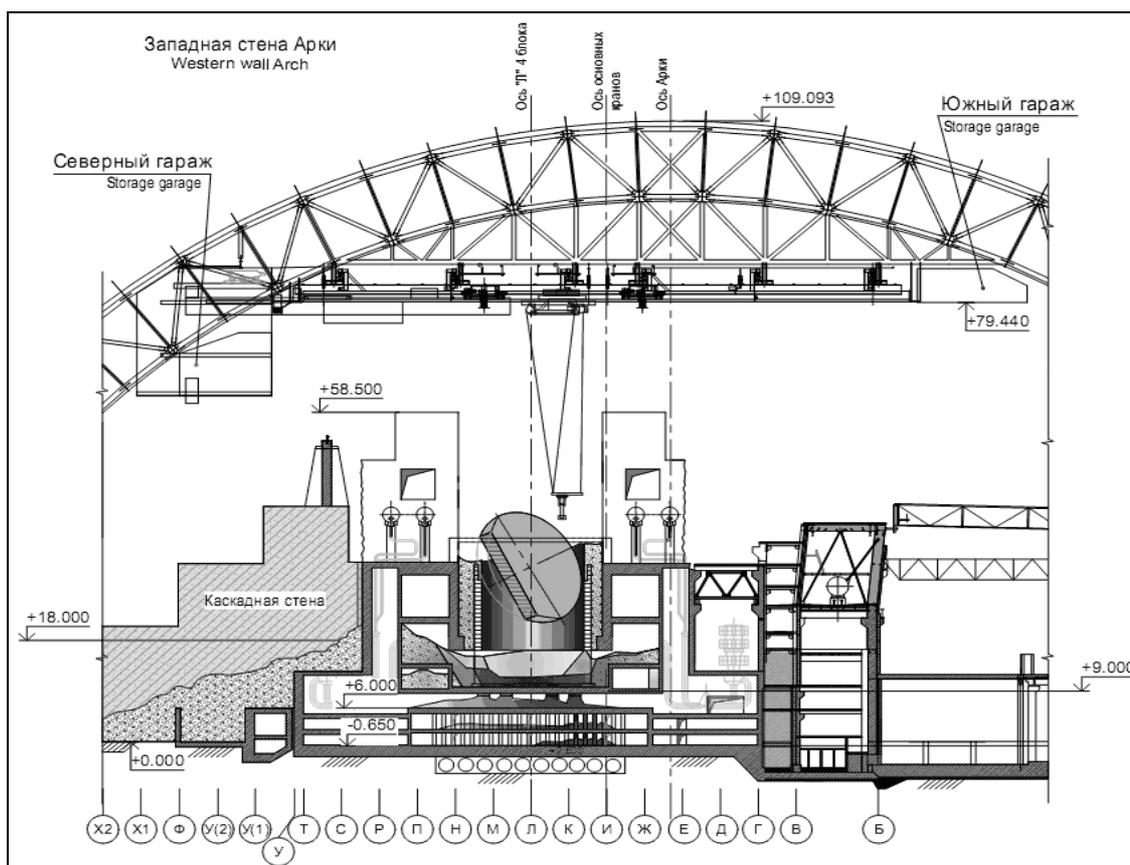


Рис. 1. Конструкции НБК и объекта "Укрытие" – разрез по центру разрушенного реактора.

На рис. 2 приведена трехмерная модель разрушенного реактора 4-го энергоблока ЧАЭС, построенная в 3ds Max 2010. Точка обзора выбрана таким образом, что позволяет определить размер зазора между металлоконструкцией бака реактора (схема "Л") и схемой "ОР".

На рис. 3 приведены зоны работ при удалении ТСМ на верхних отметках.

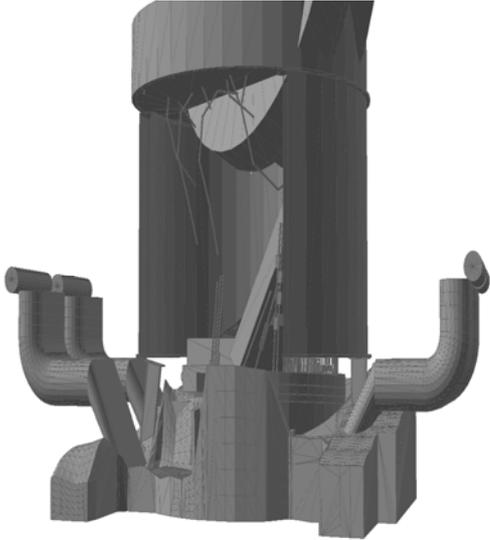


Рис. 2. Трехмерная модель реактора и помещения 305/2.

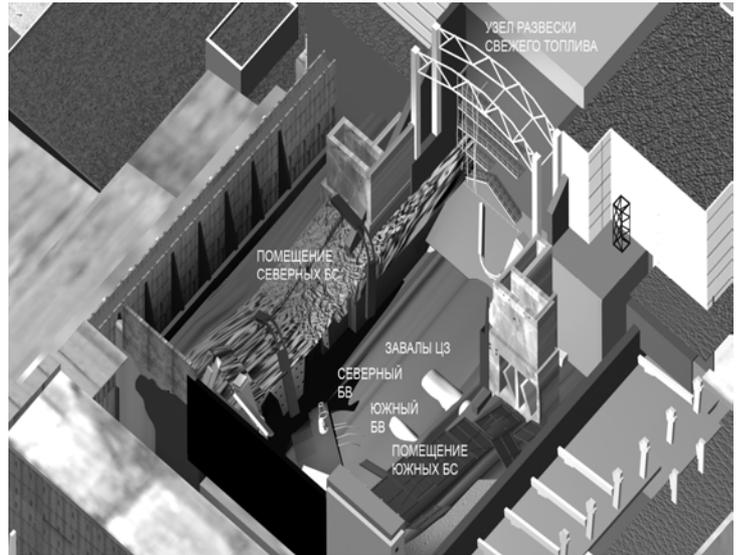


Рис. 3. Трехмерная модель центрального зала (ЦЗ) объекта "Укрытие". Зоны производства работ.

Имитационные/интерактивные модели объекта "Укрытие" и НБК

В среде программного продукта Unity3D 3.4 разработаны имитационная и интерактивная модели современного состояния 4-го блока объекта "Укрытие", НБК и СОК НБК.

Главное окно – интерфейс – имитационной модели НБК и объекта "Укрытие" показано на рис. 4.

Достоинством модели данного типа является:

высокая точность воспроизведения 3D моделями геометрии реальных объектов, подлежащих обращению с ТСМ, а также оборудования и механизмов, используемых при этом;

имитация взаимодействия 3D моделей всех этих объектов при их взаимных перемещениях в пространстве с учетом их жесткости, воздействия гравитации и т.д.;

возможности статического 3D моделирования сооружений, конструкций и оборудования дополнить весьма ценным для повышения качества проекта имитационным анализом динамики хода работ.

За счет своевременного, еще до выполнения реальных операций по демонтажу или строительству, выявления опасных коллизий и устранения их причин имитационная модель процесса извлечения ТСМ из объекта "Укрытие" позволяет избежать: не предусмотренных проектом затрат; угрозы нарушения запланированного безопасного хода работ и опасного радиационного воздействия на людей и окружающую среду.



Рис. 4. Имитационная модель объекта "Укрытие" и НБК.

Предварительный анализ моделей

Основная задача имитационной модели – обеспечить детальную отработку выбранного сценария осуществления технологической операции. Также имитационная модель должна позволять на

основе имеющихся отработанных технологических операций оптимизировать их выполнение и подобрать наиболее оптимальные сценарии [7].

На имитационной модели был выполнен анализ возможности применения СОК для демонтажа строительных конструкций восточной стены ЦЗ объекта "Укрытие" (рис. 5).

СОК предназначена для обеспечения демонтажа нестабильных конструкций объекта "Укрытие" и последующих работ по обращению с ТСМ и РАО внутри НБК [8].

Зона действия СОК НБК начинается на расстоянии 1,5 м от оси восточной стены ЦЗ. Площадки обслуживания узла развески "свежих" тепловыделяющих сборок (ТВС) непосредственно примыкают в восточной стене, и могут располагаться на расстояниях менее 1,5 м от оси стены. Это необходимо учитывать при подборе (или разработке) длины руки манипуляторов мобильной инструментальной платформы (МИП), чтобы работа по удалению фрагментов активной зоны (ФАЗ) и демонтажу строительных конструкций (СК) на восточной стене могла быть выполнима.

Минимальная допустимая дистанция между кранами 11,8 м. Две полностью загруженные тележки могут находиться на одном мосту, при этом расстояние между центрами тележек должно составлять не менее 22 м. Тележка с грузом 5 т может приближаться к МИП на минимальное расстояние, но только в том случае, если и МИП, и тележка находятся на расстоянии не менее 2 м от любой консоли [8]. Эти требования ограничивают массу контейнера, делают невозможным использования эффективного экранирования и необходимость создавать дополнительную защиту на площадке временного хранения (рис. 6).



Рис. 5. Демонтаж ферм кровли и площадок обслуживания узла развески на восточной стене ЦЗ.

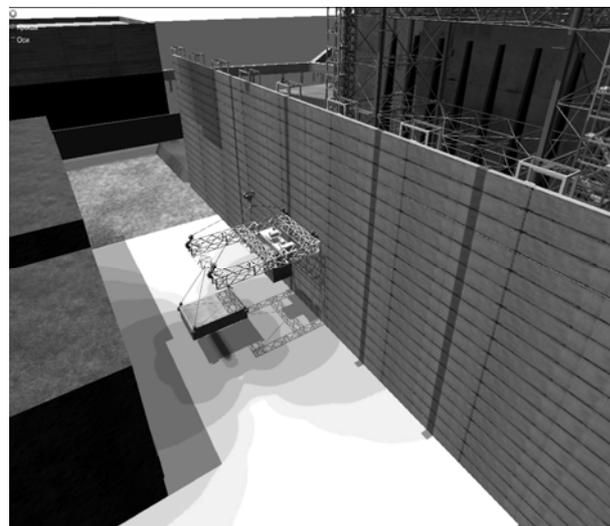


Рис. 6. Контейнер в зоне временного хранения.

В комплект поставки МИП не входит манипулятор для захвата и переноса фрагментов строительных конструкций. При резке СК на высотных отметках без захвата отрезаемого фрагмента будет происходить его падение с высоты до 26 м, что неминуемо повлечет за собой пылеподъем и ухудшение радиационной обстановки, а также вероятность обрушение нижележащих СК. Кроме этого, имеется необходимость захвата и перемещения в контейнер фрагментов СК или горячих точек, как это предусмотрено в [8] – "удаление "горячих" точек (в случае обнаружения) и помещение в контейнер при помощи специального манипулятора".

На мосту крана находится МИП с установленными механическими ножницами. При резке ферм СК, расположенных над площадками обслуживания узла развески восточной стены ЦЗ, они будут падать вниз на площадки, на которых в свою очередь находятся ФАЗ. Для предотвращения этого необходимо удерживать отрезаемые фрагменты СК с помощью манипулятора. В настоящее время при конструировании робототехнических систем для работ по устранению последствий аварий на объектах атомной энергетики наблюдается тенденция использования двух манипуляторов вместо одного. Примеры подобного устройства – роботы Mitsubishi MHI-MEISter, Hitachi ASTACO-SoRa [9].

Для отработки технологии демонтажа ТВС, находящихся на схеме "Е" с помощью дистанционно - управляемого механизма (ДУМ) модели BROKK, были созданы:

инженерная 3D модель ЦЗ с прилегающими помещениями, шахты реактора с основными содержащимися в ней объектами;

3D модель хода работ по демонтажу с помощью робота.

Моделирование процесса демонтажа основано на взаимодействии твердых тел, исключает "проникновение" объектов друг в друга, имитирует действие силы тяжести на объекты, а также движение гусениц, манипуляторов и навесных инструментов ДУМ BROKK (рис. 7).

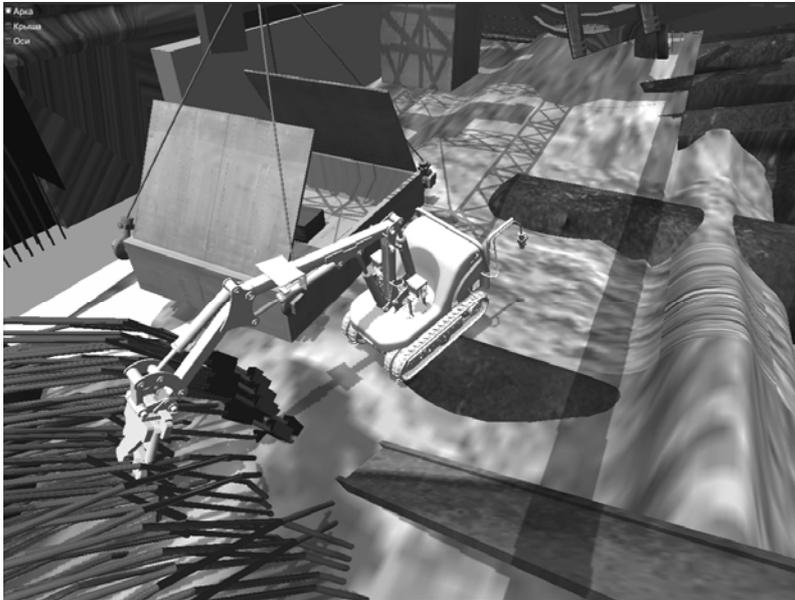


Рис. 7. Имитационная модель ЦЗ. Демонтаж ТВС на схеме "Е".

На имитационной модели опробована технология процесса извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие" при помощи навесного оборудования СОК НБК, был выявлен ряд проблем и предложены изменения некоторых процессов и конструкций:

Выявленная проблема

Длина руки робота-манипулятора 2,5 м, минимальная допустимая дистанция между кранами 11,8 м
Не предусмотрено удерживание демонтируемых металлических конструкций

Предложенное решение

Для подвески контейнера на крюк крана разработать специальную траверсу
В комплект поставки МИП необходимо включить двурукий манипулятор

На базе имитационной модели программным продуктом Unity3D 3.4 создана интерактивная модель современного состояния 4-го блока объекта "Укрытие", НБК и СОК НБК. Для ее установки на компьютер не требуется дополнительного программного обеспечения.

Главное окно интерактивной модели НБК и объекта "Укрытие" показано на рис. 8.

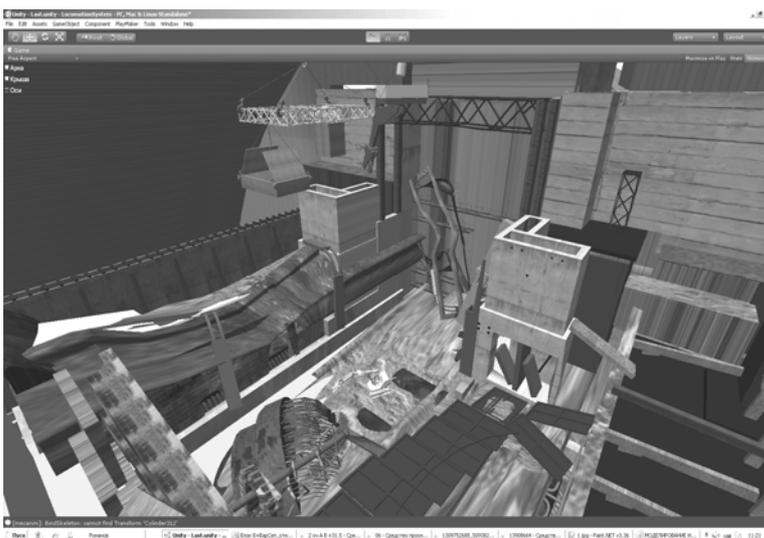


Рис. 8. Интерактивная модель объекта "Укрытие" и НБК.

Проводимые в настоящее время работы по развитию интерактивной модели позволят вывести ее на следующий технологический уровень, на котором будет возможно решение более широкого спектра задач, возникающих в процессе извлечения ТСМ из помещений объекта "Укрытие". Возможно развитие модели, когда ДУМ и СОК можно будет управлять с помощью клавиатуры и игровых устройств, имитирующих взаимодействие с пультами управления BROKK и СОК. Такая интерактивная модель предназначена для обучения и тренировки персонала перед началом работ по демонтажу нестабильных конструкций объекта "Укрытие" и извлечения ТСМ.

Выводы

Использование компьютерной графики и моделирования является необходимой предпосылкой для обеспечения радиационной безопасности и оптимизации процесса выполнения работ в тяжелых радиационных условиях, в частности, при ликвидации последствий аварии. При этом целесообразно использовать комплексный подход использования инженерных (для моделирования зон производства работ) и имитационных (для моделирования технологических процессов при ликвидации последствий аварии) компьютерных моделей. На основе имитационной модели может быть разработана интерактивная модель для обучения персонала, который планируется задействовать в выполнении работ.

Проработаны научно-методические и практические основы разработки, внедрения и применения таких компьютерных моделей в условиях объекта "Укрытие" ЧАЭС.

Применение информационных технологий имитационного моделирования цифровых компьютерных моделей применительно к процессу извлечения ТСМ с верхних отметок объекта "Укрытие" позволило уже на ранней стадии проработки технических предложений выявить некоторые принципиальные проблемы применения технических средств НБК, в частности, СОК. Показано, что дальнейшее развитие и использование моделей позволит оптимизировать процесс извлечения ТСМ, уменьшить дозы персонала и затраты, а также вероятность аварий.

Применение имитационной модели позволит выбрать оптимизировать проектные решения извлечения ТСМ по заданным критериям, верифицировать его на предмет соответствия установленным требованиям, обеспечить программный комплекс для детального обучения и подготовки персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батий В. Г., Лагуненко А. С., Щулепникова А. В. Концептуальные подходы к процессу извлечения ТСМ из различных зон объекта "Укрытие" // Тез. докл. XII конф. по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (17 - 21 марта 2014 г.) Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. - С. 61.
2. Карнов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. - СПб.: "БХВ-Петербург", 2005.
3. http://www.neolant.ru/press-center/aboutus/index.php?ELEMENT_ID=1709
4. Маньяков Ю.А. Модели и алгоритмы извлечения визуальной информации о пространственных объектах в автоматизированных системах управления с оптической обратной связью: Дис. канд. техн. наук: Орел, 2011.
5. SIP-N-KP-22-E06__TEN-081-01/99-925.100.011.OT08.01. Системы контроля, управления и мониторинга. Пояснительная записка.
6. IAEA-tecdoc-1725, Spent fuel storage operation - lessons learned. International Atomic Energy Agency, Vienna: 2013 ISBN 978-92-0-113813-2 ISSN 1011-4289 - P. 65.
7. Былкин Б. К., Кононов В. В., Бунто П. А. и др. Опыт применения имитационной модели демонтажа графитовой кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС // Исследования наукограда. - 2012. - №2. - С. 59 - 64.
8. SIP-N-KP-22-E06__TEN-061-01/99-925.100.011.OT06.01. Технологические решения. Система внутреннего транспорта.
9. Логвинов В. И., Овсянников А. Ю. Анализ технологических и технических требований к мобильному роботу для атомной промышленности // Сб. науч. тр. SWorld. Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013". - Вып. 1. Т. 3. - Одесса: КУП-РИЕНКО, 2013. - ЦИТ:113-1058 - С. 46 - 56.

В. Г. Батій, Д. М. Романов, С. С. Підберезний, О. І. Стоянов, В. М. Щербін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЛУЧЕННЯ ПАЛИВОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВЕРХНІХ ПОЗНАЧОК ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ"

Розроблено імітаційну модель процесу вилучення паливовмісних матеріалів із верхніх позначок об'єкта "Укриття" за допомогою навісного обладнання системи основних кранів нового безпечного конфайнмента.

Ключові слова: імітаційна модель, моделювання фізичних і технологічних процесів, паливовмісні матеріали, об'єкт "Укриття".

V. G. Batiy, D. N. Romanov, S. S. Podbereznyi, A. I. Stoyanov, V. N. Scherbin

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

**COMPUTER SIMULATION OF THE FUEL CONTAINING MATERIALS REMOVAL PROCESS
FROM THE "UKRYTTYA" OBJECT UPPER LEVELS**

A simulation model of the fuel-containing materials removal from the the "Ukryttya" object upper elevations with the attachment of the main cranes of New Safe Confinement was developed.

Keywords: simulation model, simulation of physical and technological processes, fuel-containing materials, the "Ukryttya" object.

REFERENCES

1. *Batiy V.G., Lagunenko A.S, Shchulepnikova A.V.* Conceptual approaches to the process of FCM removal of the "Shelter" object various zones // Abstracts XII Conference on High Energy Physics, Nuclear Physics and Accelerators, 17 - 21 March 2014 Kharkiv. - NSC KPTI, 2014. - P.61. (Rus)
2. *Karpov YU.* Simulation modeling systems. Introduction to modeling with AnyLogic. - St. Petersburg, 2005. (Rus)
3. http://www.neolant.ru/press-center/aboutus/index.php?ELEMENT_ID=1709 . (Rus)
4. *Man'yakov YU.A.* Models and algorithms for extracting visual information about spatial objects in automated control systems with optical feedback: Thesis for the degree of candidate of technical sciences: 05.13.06 HAC; - Orel, 2011. (Rus)
5. *SIP-N-KP-22-E06__TEN-081-01/99-925.100.011.OT08.01.* Control, management and monitoring. Explanatory note. (Rus)
6. *IAEA-tecdoc-1725.* Spent fuel storage operation - lessons learned. International Atomic Energy Agency, Vienna: 2013 ISBN 978-92-0-113813-2 ISSN 1011-4289 – P. 65. (Eng)
7. *Bylkin B.K., Kononov V.V., Bunto P.A. et al.* Experience of using a simulation model of the dismantling of the reactor graphite stack AMB-100 Beloyarskaya NPP // *Issledovaniya naukoigrada.* – 2012. - № 2. - P. 59 - 64. (Rus)
8. *SIP-N-KP-22-E06__TEN-061-01/99-925.100.011.OT06.01.* Technological solutions. The system of internal transport. (Rus)
9. *Logvinov V.I., Ovsyannikov A.Yu.* Analysis of the technological and technical requirements for mobile robot for the nuclear industry // *Collected scientific works SWorld. Materials of the international scientific-practical conference "Modern trends in theoretical and applied research in 2013".* – Iss. 1. Vol. 3. – Odessa: Kuprienko, 2013. – P. 46 - 56. (Rus)

Надійшла 22.07.2014
Received 22.07.2014