

**ЯДЕРНАЯ
И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ
ЭНЕРГЕТИКА**

УДК 621.039.566.8

Б. К. Былкин

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

**В. В. Кононов, П. А. Бунто,
О. В. Гуляев, Д. В. Свиридов,
В. Е. Трифонов, В. Л. Тихоновский,
Д. В. Чуйко**

ЗАО «НЕОЛАНТ», г. Москва, Россия

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЕМОНТАЖА ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РЕАКТОРА АМБ-100 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Изложен опыт практического применения имитационного моделирования при отработке технологии демонтажа графитовой кладки реактора первого блока Белоярской АЭС.

Ключевые слова: АЭС, имитационное моделирование, реактор АМБ-100, графитовая кладка, технология демонтажа, аварийные ситуации.

B. K. Bilkin

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

**V. V. Kononov, P. A. Bunto,
O. V. Gulyaev, D. V. Sviridov,
V. E. Trifonov, V. L. Tikhonovskiy,
D. V. Chuyko**

CJSC «NEOLANT»

EXPERIENCE OF USING A SIMULATION MODEL OF THE DISMANTLING OF THE REACTOR GRAPHITE STACK AMB-100 BELOYARSK

Outlined is the Experience of using a simulation model of the dismantling of the reactor graphite stack AMB-100 Beloyarsk.

Key words: NPP (Nuclear Power Station), simulation model, reactor AMB-100, graphite stack, technology of dismantling, emergency situations.

Вывод из эксплуатации (ВЭ) – завершающая стадия жизненного цикла энергоблока АЭС, сравнимая по сложности и продолжительности со стадией эксплуатации. Но в отличие от эксплуатации этап вывода из эксплуатации является довольно затратным и в силу

своих особенностей оказывает существенное влияние на суммарные показатели эффективности АЭС.

Учитывая потенциальную длительность, сложность и опасность процесса ВЭ, нормативно-технические и руководящие документы Ростехнадзора и Концерна Росэнергоатом предусматривают создание информационной системы базы данных вывода из эксплуатации

© Былкин Б. К., Кононов В. В., Бунто П. А., Гуляев О. В., Свиридов Д. В., Трифонов В. Е., Тихоновский В. Л., Чуйко Д. В., 2012

энергоблоков АЭС (ИС БДВЭ) с построением трехмерной имитационной модели процесса вывода из эксплуатации [1].

Основной целью создания и применения имитационной модели ВЭ блока АЭС является снижение издержек и повышение безопасности осуществления выбранного 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 заданным требованиям [2].

В рамках работ по выводу из эксплуатации первой очереди Белоярской АЭС была создана имитационная модель разборки (демонтажа) реакторной установки АМБ-100 и разработан программный комплекс с целью моделирования технологических операций по разборке графитовой кладки реактора и обучения операторов робота (BROKK) специальным технологическим операциям. Для отработки технологии демонтажа было произведено графическое и физическое моделирование шахты реактора АМБ-100 с учетом всех объектов, находящихся в шахте, как то: графитовые блоки кладки, чугунные блоки отражателя, стойки СУЗ и т. д.

В соответствии с моделируемой технологией основным исполнительным механизмом демонтажа кладки является дистанционно управляемый робот, работа которого в пространстве шахты реактора обеспечивается специальной конструкцией, называемой *каруселью* (рис. 1).

В процессе разборки кладки робот BROKK использует три различных навесных инструмента:

- захват-манипулятор, чтобы опускать и поднимать плиты настила, крышки контейнеров, в которые помещаются изъятые графитовые блоки и отпиленные куски стоек СУЗ, а также захватывать куски треснувших блоков;
- канговый захват, чтобы захватывать и опускать графитовые блоки, используя отверстия в центре блоков;
- циркулярная пила, чтобы отпиливать верхние части стоек СУЗ, препятствующих изъятию блоков канговым захватом.

Моделирование процесса демонтажа основано на взаимодействии твердых тел, ис-

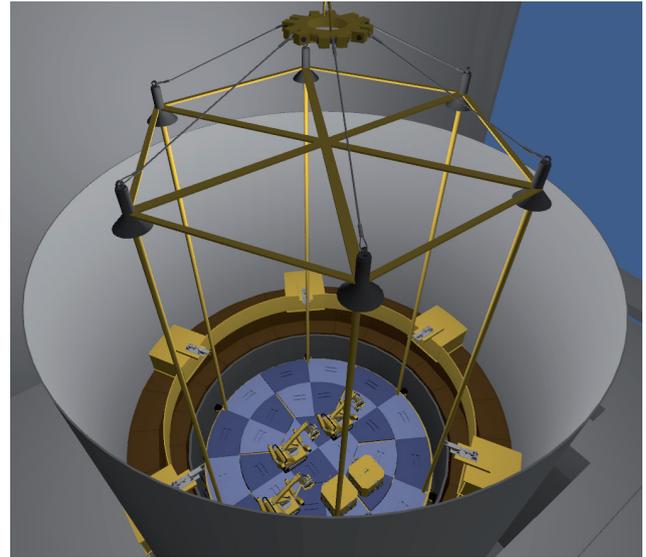


Рис. 1. Общий вид карусели

ключает «проникновение» объектов друг в друга, имитирует действие силы тяжести на объекты, а также движение гусениц, манипуляторов и навесных инструментов роботов.

Программный комплекс выполнен в двухэкранной конфигурации. На одном экране располагается окно с трехмерной моделью, визуализирующей сценарий рабочего процесса демонтажа. На другом экране располагается окно с графическим интерфейсом, предоставляющим дополнительные возможности по управлению моделированием, установкой камер, осуществлением записи, воспроизведением записанных сценариев и т. д.

Для реализации требуемой функциональности комплекс работает в двух режимах: имитации и воспроизведения.

В *режиме имитации* пользователь с помощью устройств ввода управляет роботами в режиме реального времени, осуществляя операции, необходимые для демонтажа кладки. Этот режим позволяет проверить выполнимость технологических операций, удобство работы оператора в условиях моделируемой конфигурации оборудования (размещение обзорных камер, элементов освещения и т. д.), а также моделировать различные аварийные ситуации с извлекаемыми блоками.

В *режиме воспроизведения* пользователь может просматривать ранее записанные сценарии, имея возможность в любом месте сценария остановить воспроизведение и продолжить имитацию. Этот режим предназначен для анализа отработанных операторами технологических операций и выявления про-

блемных мест моделируемой технологии с целью ее дальнейшего улучшения.

Трехмерная модель. Окно трехмерной модели позволяет отображать информацию с различных камер наблюдения для моделирования условий, приближенных к предполагаемым условиям в ходе демонтажа графитовой кладки.

В окне трехмерной модели можно расположить до 4 камер наблюдения одновременно, управляя их размещением с помощью элемента управления камерами, расположенного на экране графического интерфейса (рис. 2).

Камеры могут быть как стационарно расположенные, так и размещенные на насадках робота.

Также имеется возможность управлять *свободной камерой*, которая может перемещаться в любых направлениях по «сцене», однако, поскольку при реальном рабочем процессе такой камеры не будет, она носит вспомогательный характер, в основном для обозрения сцены в режиме воспроизведения

записанного сценария. В режиме имитации свободная камера может использоваться 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 текущее расположение камер не подходит, и его необходимо изменить.

Управление реальными роботами BROKK осуществляется с помощью пульта управления.

В имитационной модели реализовано управление роботами с помощью пульта управления BROKK, подключаемого к компьютеру. Но для случаев, если этот пульт по какой-либо причине отсутствует, роботами можно управлять с помощью клавиатуры и двух игровых устройств, *геймпадов*, имитирующих взаимодействие с пультом управления BROKK. Все элементы управления

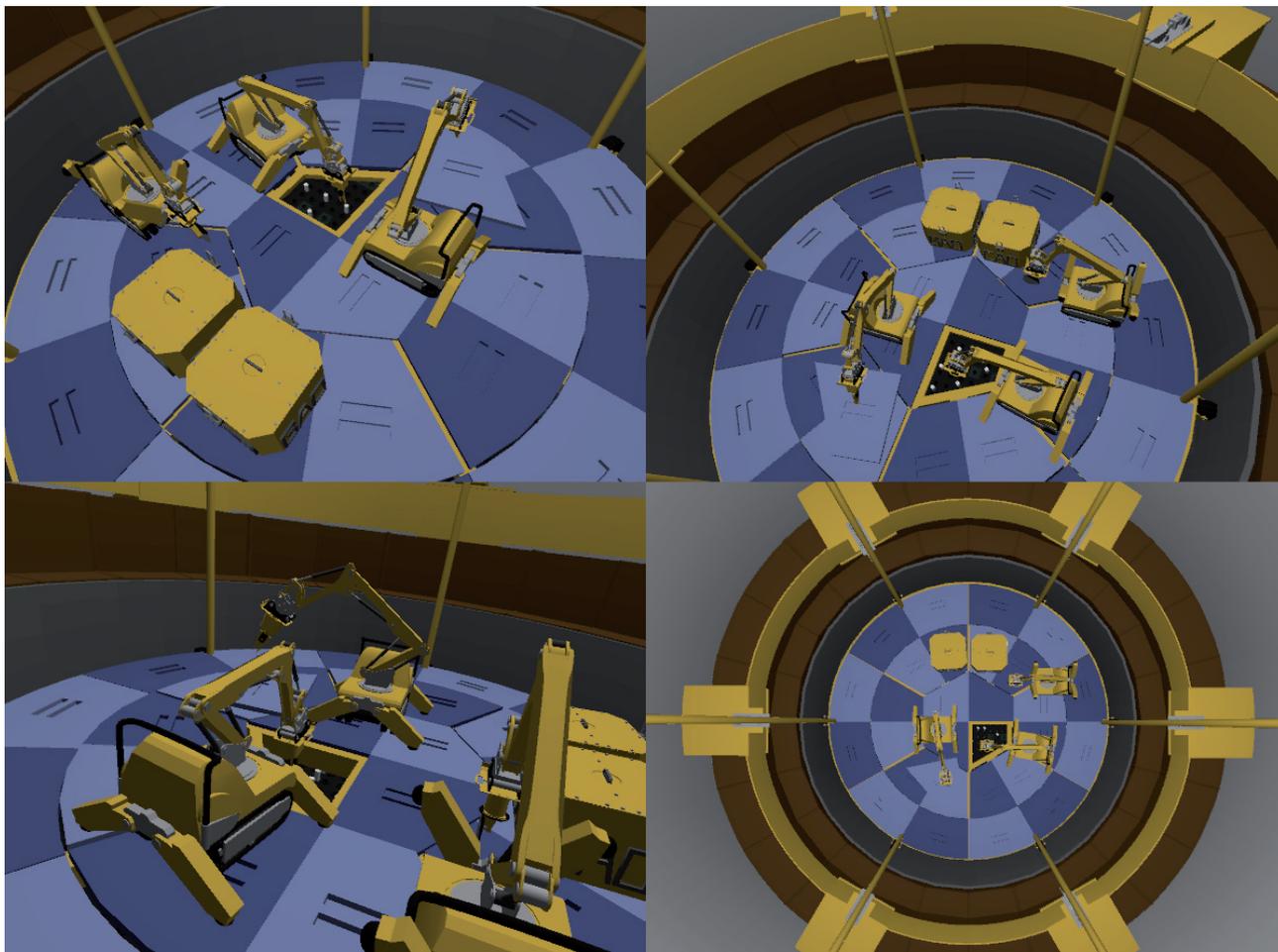


Рис. 2. Имитационная модель, вид с четырех камер

пульта, а также его внутренняя логика работы точно воспроизведены в соответствии с оригиналами.

Элементы управления геймпадов имитируют элементы управления пульта робота, например, рычаги пульта соответствуют рычагам на геймпаде. Также все элементы управления, реализованные на геймпаде, располагаются на клавиатуре вместе с дополнительными элементами управления.

Каждому роботу соответствует свой пульт управления, в программе же имитируются два пульта, поэтому реализована возможность «переключения» каждого из пультов на не управляемый в данный момент робот.

Для упрощения определения элементов конструкции, которые мешают выполнению технологических операций, в программном комплексе реализована система оповещения о коллизиях (столкновениях) объектов. Так, при коллизии движущихся частей роботов с другими объектами на сцене и те, и другие подсвечиваются красным цветом.

Моделирование аварийных ситуаций.

Многие блоки в шахте реактора являются дефектными в результате аварий, произошедших в период эксплуатации энергоблока. Это обстоятельство определило необходимость отработки аварийных ситуаций в шахте реактора при извлечении дефектных блоков, для чего в программе предусмотрен механизм моделирования аварий, который позволяет отработать все возможные сценарии аварийных ситуаций и выработать план действий в случае их возникновения.

Программный комплекс моделирует следующие типы дефектных блоков графитовой кладки реактора: трещиноватые блоки и блоки, образовавшиеся при козловых авариях (слипание нескольких блоков).

При попытке захвата трещиноватого блока цанговым захватом существует вероятность, что блок может треснуть, развалившись на несколько частей.

При козловых авариях происходит слипание несколько соседних блоков в пределах одного или нескольких слоев в единый массив. Поскольку манипулятор робота имеет ограничение в грузоподъемности, то поднять достаточно крупный массив слипшихся блоков не представляется возможным. В этом случае необходимо с помощью ударных насадок разбить такой массив на части и поднять каждую из частей.

Графический интерфейс. Экран графического интерфейса содержит элементы управления для работы с моделируемыми ситуациями.

На этом экране расположены следующие элементы управления: элемент управления сценариями; элемент управления камерами; элемент управления аварийными состояниями блоков; элемент управления комментариями; элемент отображения управляющих воздействий; элемент отображения извлеченных отходов.

Элемент управления сценариями предназначен для выбора начальных состояний кладки реактора при отработке технологических операций, а также сохранения отработанных последовательностей и сохранения новых сцен для последующей отработки технологических операций. В элементе управления отображается иерархическое дерево сохраненных сцен с дополнительной информацией о них и их запуском в режимах имитации и воспроизведения. По каждому сценарию приводится сводная информация – продолжительность сценария, количество извлеченных блоков, изображение сцены с одной из камер и т. д.

Элемент управления камерами предназначен для выбора камер, изображение с которых будет выводиться на экран трехмерной модели. Он позволяет разместить на экране трехмерной модели от одной до четырех выбранных камер.

Элемент управления аварийными состояниями блоков позволяет в режиме имитации, «на лету», изменять аварийные состояния блоков, делая их трещиноватыми, нормальными или создавая слипшиеся массивы блоков. В режиме воспроизведения данный элемент управления отображает динамику изменения состояния блоков без возможности их изменения.

Элемент отображения управляющих воздействий предназначен для наглядной демонстрации, какие управляющие воздействия реального пульта BROKK производятся в данный момент.

Элемент управления комментариями предназначен для добавления в процессе выполнения технологических операций дополнительных текстовых или звуковых комментариев, которые бы поясняли события, происходящие на трехмерной модели при анализе отработанных операций.

Элемент отображения извлеченных отходов отображает массу и объем извлеченных

графитовых и металлических отходов, а также динамику извлечения этих отходов.

Результаты верификации технологии демонтажа графитовой кладки. В процессе разработки и применения имитационной модели разборки кладки реактора Белоярской АЭС был выявлен ряд сложностей в реализации первоначальной версии технологии демонтажа блоков, разработанной специализированной организацией.

Смена насадок. Первоначальная версия технологии предлагала использование одного робота, который в любой момент времени работает только одной из насадок, при этом робот снабжается такой насадкой с помощью средств автоматической смены насадок.

В процессе моделирования операций было выявлено, что в рамках процессов, происходящих при демонтаже, невозможно осуществить автоматическую смену насадок, поскольку эта операция требует высокой точности расположения манипулятора робота относительно устанавливаемой насадки, которой невозможно достичь в условиях управления роботом BROКК, используя обзор с телекамер. Кроме того, взвесь графитовой пыли, образующаяся в процессе демонтажа кладки, будет оседать на контактах устройства автоматической смены насадок, что делает смену насадок невозможной.

В результате была предложена модификация первоначального варианта технологии, предполагающая использование трех роботов, на которых сразу будут установлены нужные

насадки, без необходимости их смены в процессе демонтажа.

Сложность работы с неподвижными камерами. Работа с имитационной моделью позволила выяснить, что набор неподвижных камер не позволяет организовать достаточный обзор для выполнения ряда операций. В основном эти операции связаны с извлечением блоков графитовой кладки из шахты реактора. Телекамеры, располагающиеся на карусели, практически не позволяют наблюдать за ситуацией под настилом. Камеры на насадках предоставляют приближенное изображение, которое не позволяет увидеть картину в целом. По этой причине в процессе работы с трехмерной моделью приходилось использовать в основном свободную камеру, которая не реализуема в рамках реального технологического процесса. Вследствие этого на основе анализа требуемых ракурсов камер пришлось переработать схему их расположения с помощью моделирования технологических операций на имитационной модели.

Низкий процент блоков, которые возможно извлечь с помощью предложенной технологии. Некоторые блоки невозможно извлечь из кладки по одной из причин: мешает конструкция карусели; не хватает длины манипулятора робота.

Чтобы определить процент блоков, которые возможно извлечь, используя предложенную технологию, были проведены полномасштабные испытания по извлечению бло-

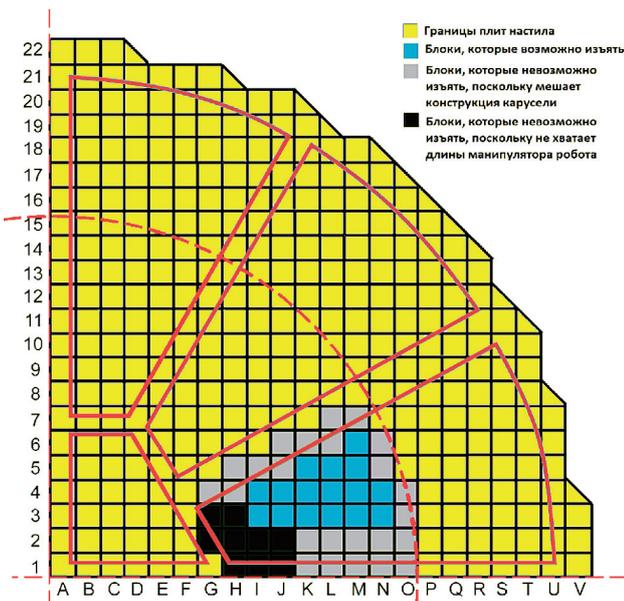


Рис. 3. Схема расположения блоков

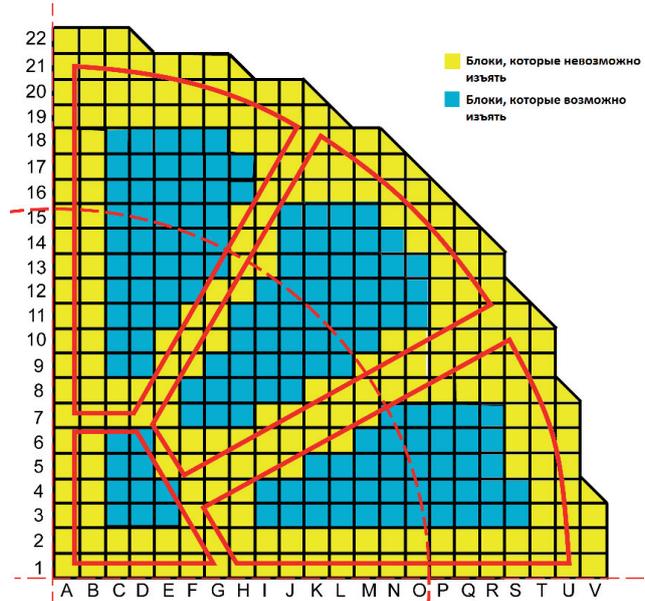


Рис. 4. Общая схема расположения блоков

ков кладки реактора в условиях различных ситуаций и составлен технологический паспорт, в котором были рассмотрены различные варианты расстановок роботов для изъятия блоков.

Для каждого варианта расстановки роботов при удалении блоков была составлена схема, позволяющая определить возможность захвата блоков. На рис. 3 представлен пример такой схемы.

По результатам анализа технологии было выявлено, что для извлечения доступно около 30 % блоков. Общая схема расположения блоков кладки реактора, доступных для извлечения, представлена на рис. 4.

С целью модификации технологии извлечения блоков была предложена другая конструкция карусели, предполагающая использование монолитной круглой плиты с отверстием в виде сектора круга с центром в центре плиты. Конструкция плиты является поворотной – плита может поворачиваться вокруг своей центральной оси.

В результате проведения анализа было также выявлено, что при наличии в кладке слипаний из трех или более блоков извлечение таких слипшихся частей графитовой кладки невозможно вследствие недостаточной грузоподъемности манипулятора робота BROKК.

Для удаления слипшихся частей кладки предложено раскалывать такие части, для чего следует либо предусмотреть использование дополнительного робота со специаль-

ной насадкой типа «отбойный молоток», либо обеспечить необходимую прочность насадки-захвата с тем, чтобы эту насадку можно было использовать также и для раскалывания блоков серией ударов.

Итак, с помощью имитационной модели было проведено моделирование первоначальной версии технологии разборки кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС и верификация первоначально разработанной технологии демонтажа графитовых блоков реактора.

В результате верификации был выявлен ряд недостатков первоначальной технологии и предложены соответствующие модификации технологии.

Проводимые в настоящее время работы по развитию имитационной модели позволят вывести ее на следующий технологический уровень, на котором будет возможно решение более широкого спектра задач, возникающих в процессе вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. 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.