

Имитационное моделирование для верификации работ по ВЭ ЯРОО и по обращению с РВ, ОЯТ и РАО

ГК «РОСАТОМ» Ядерная и радиационная безопасность России. Выпуск 15

Боронин В.В. (ФГУП «ПО» «МАЯК»), П. А. Бунто, В. В. Кононов, Д. В. Свиридов, В. Л. Тихоновский, В. Е. Трифонов, Д. В. Чуйко (ЗАО «НЕОЛАНТ»)

Проект вывода из эксплуатации (ВЭ) ядерно и радиационно опасного объекта (ЯРОО) – это документация и работы, индивидуальные даже для однотипных энергоблоков, находящихся на площадке одной АЭС. По сути, ВЭ ЯРОО сегодня – это каждый раз масштабный инженерный эксперимент. Но эксперимент, ставить который допускается лишь при условии гарантий безопасного выполнения работ и эффективного расходования средств.

Для обоснования выполнимости и безопасности нестандартных решений проектов по ВЭ ЯРОО нужны технологии верификации, отличающиеся максимальной наглядностью и минимальной затратностью. Именно поэтому одним из инструментов проверки проектов по ВЭ и соблюдения при этом норм безопасности труда и радиационной безопасности стало [имитационное компьютерное моделирование](#) хода работ.

Результаты [имитационного компьютерного моделирования](#) используются в проектах [атомной отрасли](#) для верификации технологических операций разной степени сложности. Одни из них кажутся «простыми» с обывательской точки зрения, сложность других понятна даже непрофессионалу. Но все операции с РВ, ОЯТ и РАО одинаково ответственны с точки зрения обеспечения радиационной безопасности для персонала ЯРОО, населения и окружающей среды.

В качестве примера компьютерного моделирования «рутинной», казалось бы, операции можно привести разработку транспортно-технологической схемы (ТТС) по вывозу контейнеров с радиоактивными отходами при выполнении проекта по экологической реабилитации пункта временного хранения (ПВХ) ОЯТ и РАО в Гремихе, одном из объектов некогда разветвлённой инфраструктуры Краснознамённого Северного флота СССР.

В связи с тем, что у участников работ отсутствовал опыт комплексного решения задач реабилитации таких ЯРОО, предварительно был выполнен большой объем научно-исследовательских и конструкторских работ. В том числе – динамическое моделирование ТТС. Трёхмерная динамическая модель ТТС использовалась при определении возможных коллизий при транспортировке: определялась максимальная допустимая скорость движения транспортного средства на различных участках дороги для предотвращения заносов и опрокидывания.

Для решения задач информационного обеспечения работ по реабилитации ПВХ в Гремихе в РНЦ «Курчатовский институт» была разработана информационно-аналитическая система (ИАС), аккумулирующая в себе информацию по проекту и обеспечивающая возможность оперативного решения задач, возникающих перед проектной командой на всех этапах выполнения работ. В состав ИАС входит трёхмерная модель ПВХ, включающая в себя модели рельефа местности, дорог, зданий и сооружений, объектов реабилитации и технического оборудования, модель акватории залива и средства визуализации модельных данных. Эти данные в полном объеме используются для моделирования технологических схем обращения с радиоактивными отходами в ПВХ, включая и ТТС.

Следует отметить в связи с этим, что использование технологии [имитационного компьютерного моделирования](#) для масштабных проектов по ВЭ ЯРОО становится возможным не только благодаря развитию вычислительной техники как таковой. Важным фактором для успешного использования [имитационного моделирования](#) стало наличие информационных систем (ИС) класса [ИС БДВЭ ЛАЭС](#) [1]. Такие информационные системы сегодня внедрены «НЕОЛАНТ» не только на ряде АЭС, но и на выводимых из эксплуатации объектах топливного цикла на ФГУП «Сибирский химический комбинат» и ФГУП «ПО «Маяк».

Первичное наполнение информационных хранилищ этих ИС осуществляется с помощью технологий [лазерного сканирования](#) и трёхмерного моделирования, создания [информационных моделей](#) (ИМ). И такие достоинства этих технологий, как:

- высокая точность воспроизведения 3D моделями геометрии реальных объектов, подлежащих ВЭ, и оборудования и механизмов, используемых при этом;
- наличие коммерчески доступных программных средств, позволяющих имитировать взаимодействие 3D моделей всех этих объектов при их взаимных перемещениях в пространстве с учётом их жёсткости, воздействия гравитации и т.д.;

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

Сегодня создание динамической 3D модели процесса вывода из эксплуатации предусматривается нормативно-техническими и руководящими документами Ростехнадзора и Концерна «Росэнергоатом». За счёт своевременного, ещё до выполнения реальных операций по демонтажу или строительству, выявления опасных коллизий и устранения их причин имитационная модель работ по ВЭ позволяет избежать

- не предусмотренных проектом затрат;
- угрозы нарушения запланированного безопасного хода работ и опасного радиационного воздействия на людей и окружающую среду.

Компанией «НЕОЛАНТ» накоплен положительный опыт компьютерного 3D моделирования при подготовке проектов по ВЭ. Он касается верификации разных технологических операций проектов ВЭ, разработанных для энергетических и промышленных ядерных реакторов.

Верификация бесполостного заполнения ПУГР барьерным материалом

ВЭ ЯРОО практически всегда включает сложные и потенциально радиационно опасные строительные операции на площадке АЭС или иного объекта атомной отрасли. Так при ВЭ по варианту «радиационно безопасное захоронение на месте» строительство может быть направлено на создание дополнительных физических барьеров для исключения несанкционированного доступа к опасной зоне и предотвращения выхода радиоактивных веществ и ионизирующих излучений в окружающую среду. При выполнении этих работ необходимо гарантировать отсутствие физических «прорех», полостей, в создаваемых защитных барьерах, а значит исследовать разные варианты подготовки систем и путей подачи барьерных материалов, использования тех или иных материалов с учётом их текучести, сыпучести и иных физических характеристик.

В рамках информационной поддержки ВЭ промышленного уран-графитового реактора (ПУГР) ЭИ-2 на площадке ОАО «Сибирский химический комбинат» (ОАО «СХК») НЕОЛАНТ были проведены моделирование и совместно с ОАО «ОДЦ УГР» экспериментальная проверка технологического процесса создания одного из защитных барьеров – засыпки на основе глины. Она представляет собой природные породы (смесь на основе природных глин с добавлением бентонита или иных сорбционных материалов), засыпаемые в тракты технологических каналов и в металлоконструкции лежащие ниже графитовой кладки. Засыпка является сорбционным барьером, а также смягчает возможные механические воздействия на графитовую кладку.

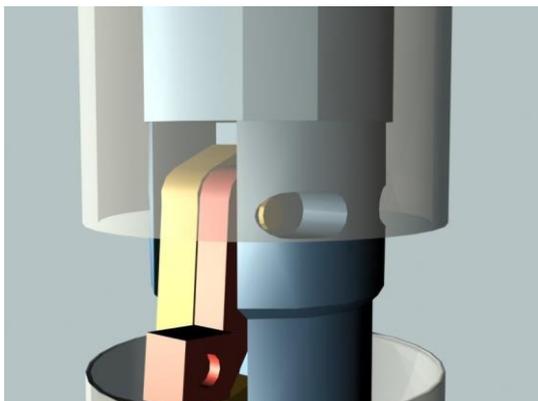
В ходе проекта «НЕОЛАНТ» разработал:

- статические 3D модели ПУГР ЭИ-2 и инструментов и оснастки для вырезки технологических отверстий и заполнения барьерным материалом;
- динамическую 3D модель, отражающая очерёдность этапов технологического процесса по заполнению реакторного пространства барьерным материалом;
- пакет конструкторской документации на инструменты и оснастку, необходимые для практической реализации описанного процесса.

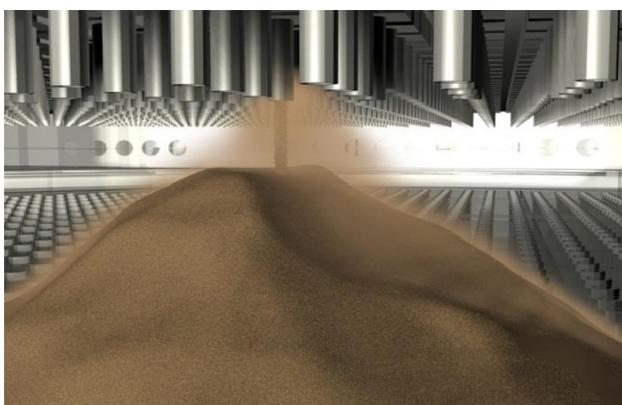
Эти разработки были использованы для:

- моделирования процессов подготовки путей подачи сыпучего материала и заполнения реакторного пространства сухим барьерным материалом (рис. 1);
- расчёта потребных объёмов материалов, времени и рабочих ресурсов.

В дополнение к [имитационному моделированию](#) была проведена экспериментальная проверка технологии заполнения на стендах, имитирующих внутриреакторные пространства. Она подтвердила правильность предложенной технологии контроля отсутствия полостей.



а)



б)

Рис. 1. Моделирование работы расточного инструмента для расточки тракта технологического канала(а) и подачи сухого барьерного материала в подреакторное пространство (б)

Проект реконструкции системы сброса грунтовых вод в водоём на площадке ФГУП «ПО «Маяк»

При ВЭ ПУГР по варианту «радиационно безопасное захоронение на месте» важным условием долговременности и безопасности захоронения реактора является, помимо создания надёжных физических барьеров, ещё и защита хранилища от грунтовых вод для предотвращения выноса радионуклидов (РН) в водоносные горизонты из-за нарушения целостности защитных барьеров и выщелачивания РН из графитовой кладки. Для этого наряду с созданием физических барьеров – бетонных, металлических, на основе глины – реализуют дополнительные мероприятия для предотвращения затопления шахты-хранилища.

Для обеспечения водоотвода при захоронении на месте ПУГР АВ-1 и АВ-2 ФГУП «ПО «Маяк», в частности, планируется реконструировать подземные туннели («метро») ныне существующей штатной системы отвода грунтовых вод (системы гидросброса) от этих реакторов. Для этого была проанализирована возможность создания необслуживаемого, долговременного (не менее 1000 лет) водоотводящего канала на основе щебня крупных фракций.



Рис. 2. Моделирование доставки дренажного материала



Рис. 2. Моделирование доставки дренажного материала

Компьютерное моделирование выполнения работ в этом проекте (рис.2) необходимо для выявления возможных коллизий в ходе работ по реконструкции, способных негативно повлиять на сроки и стоимость работ при их практической реализации.

«НЕОЛАНТ» в этом проекте разработал технологии и планы проведения следующих работ:

расчистка туннелей и демонтаж конструкций оголовков («киосков») и изношенных лестниц в 6-ти действующих вертикальных шахтах до отметки +0,5м;

- монтаж новых лестниц и лестничных маршей в этих вертикальных шахтах для безопасного и удобного доступа в туннели;
- монтаж оборудования и технологической оснастки для доставки дренажного материала (щебня);
- разравнивание дренажного материала при помощи специализированной техники;

Командой «НЕОЛАНТ» был создан и проект организации опытного участка для подбора оптимальной толщины засыпки туннеля щебнем.

Для верификации проекта «НЕОЛАНТ» разработал:

- 3D модели туннелей гидросброса, используемой техники, оборудования и оснастки;
- динамическую 3D модель хода работ по заполнению туннелей щебнем.

Динамическая 3D модель позволила провести проверку на наличие коллизий:

- основных процессов по демонтажу;
- работы техники при проведении засыпки туннелей щебнем.

Статические 3D модели, разработанные в ходе проекта, используются при этом не только для верификации хода работ проекта, но и позволяют упростить и ускорить проведение расчётов потребности в материалах.

Верификация технологии демонтажа конструкций реактора АМБ-100 Белоярской АЭС

Проект по ВЭ может предусматривать демонтаж конструкций ЯРОО и вывоз радиоактивных отходов (РАО). Так, для блоков № 1 и № 2 Белоярской АЭС, которые выработали свой ресурс и остановлены, проект ВЭ предусматривает демонтаж реакторных конструкций. Одна из наиболее технически сложных и радиационно опасных технологических операций демонтажа этих реакторов – разборка их графитовой кладки.

Проведение подобных работ возможно только с использованием дистанционно управляемого робота. Нештатное (не предусмотренное проектом) развитие событий при её выполнении чревато не только дополнительными финансовыми и временными затратами на выполнение корректирующих действий, но и негативным радиационным воздействием на персонал и окружающую среду. Это обстоятельство в купе с требованиями нормативно-технических и руководящих документов Ростехнадзора и Концерна «Росэнергоатом» привело к необходимости проведения виртуального [имитационного моделирования](#) для верификации исполнимости и безопасности работ по разборке, предусмотренных проектом по выводу из эксплуатации остановленных реакторов Белоярской АЭС.

Для верификации технологии демонтажа кладки реактора с помощью робота модели BROKK, предложенной разработчиками проекта ВЭ энергоблока Белоярской АЭС на основе реактора АМБ-100, компанией «НЕОЛАНТ» были созданы:

- 3D модель шахты реактора со всеми содержащимися в ней объектами и модель робота BROKK;
- имитационная динамическая 3D модель хода работ по демонтажу с помощью робота, работа которого в пространстве шахты реактора обеспечивалась специальной конструкцией, называемой каруселью.

При имитации процесса демонтажа была использована модель взаимодействия твердых тел, при которой исключалось «проникновение» объектов друг в друга, учитывалось действие силы тяжести на объекты, вовлечённые в процесс демонтажа. Для упрощения определения элементов конструкции, которые мешают выполнению технологических операций, в программном комплексе реализована система оповещения о коллизиях (столкновениях) объектов: при соприкосновении движущихся частей роботов с другими объектами на сцене и те, и другие подсвечиваются красным цветом (рис. 3). Более подробно возможности имитационного комплекса описаны в [2].

При верификации первоначальной предложенной технологии демонтажа был выявлен с помощью [имитационной модели](#) ряд проблем с реализацией первоначальной версии технологии демонтажа кладки из графитовых блоков, разработанной сторонней специализированной организацией. Для преодоления выявленных коллизий был предложен ряд изменений в первоначально разработанную технологию демонтажа.

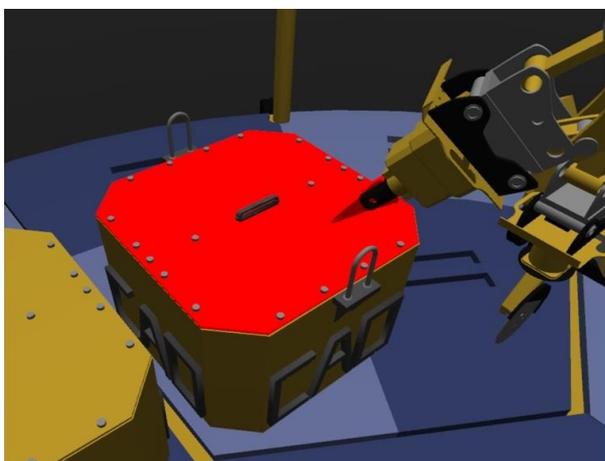


Рис.3. Незапланированное соприкосновение
цангового захвата робота BROKK
и крышки контейнера

В связи с выявленными проблемами осуществления автоматической смены трёх типов рабочих насадок, используемых роботом при демонтаже, была предложена модификация первоначального варианта технологии, предполагающая использование трех роботов, на которых сразу будут установлены нужные насадки, без необходимости их смены в процессе демонтажа. Проблемы со сменой насадок возникали, в частности, из-за недостаточной точности расположения манипулятора робота относительно устанавливаемой насадки, которой невозможно достичь в условиях управления на основе обзора с телекамер.

Имитационное моделирование позволило также предложить:

- улучшенную схему расположения телекамер, изображение с которых позволяет оператору управлять роботом;
- новую конструкцию «карусели», позволяющей извлечь все блоки, тогда как старая конструкция обеспечила бы извлечение лишь 30% блоков графитовой кладки реактора.
- и ряд других усовершенствований, которые в совокупности обеспечивают выполнение задачи по демонтажу.

Выводы

В атомной отрасли России идёт активный процесс внедрения и наполнения данными информационных систем класса ИС БДВЭ для всестороннего информационного сопровождения процесса ВЭ АЭС и других ЯРОО. Систематизация, сохранение и передача знаний – это лишь часть задач, которые могут решать подобные ИС.

Опыт «НЕОЛАНТ» показывает возможность создания динамических компьютерных 3D моделей работ и процессов при проектировании ВЭ ЯРОО и высокую эффективность применения имитационных компьютерных моделей (ИКМ) для верификации проектов ВЭ.

Всеобъемлющий анализ проектов ВЭ с помощью ИКМ позволяет снизить издержки и обеспечить безопасное выполнение работ в ходе выбранного стратегического варианта ВЭ ЯРОО благодаря:

- многофакторному компьютерному имитационному моделированию, обеспечивающему оптимизацию как отдельных наиболее сложных технологических операций, так и всего процесса ВЭ за счёт:
 - предварительной оценки корректности и оптимальности осуществления этапов работ;
 - своевременного выявления пространственно-временных коллизий;
 - обучения персонала на основе наглядных моделей процессов и технологий.
- системного управления требованиями к проекту и итеративной верификации проекта для удовлетворения сформулированных требований.

Задавая в ИКМ ВЭ различные варианты конечных состояний, планов-графиков осуществления работ с указанием конкретных применяемых технологий и технологических процессов ВЭ, на «выходе» получают:

- временные и финансовые характеристики варианта осуществления работ,
- результаты классификации и расчётов объёмов образующихся РАО;
- величины дозовых нагрузок на персонал, выполняющий работы.

В связи с этим формирование ИКМ ВЭ должно являться составной частью создания ИС БДВЭ ЯРОО.

Литература

1. 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»

2. 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, 2012, №2, с. 59-64