

В статье описывается программный комплекс виртуальной реальности, содержащий имитационные модели оборудования и систем и позволяющий моделировать штатные и нештатные ситуации, которые возникают при эксплуатации АЭС. Такой симулятор дает возможность обучать персонал и разрабатывать технологии выполнения ремонтных работ, в том числе с применением специальных роботов. В базе данных симулятора содержится вся необходимая эксплуатационная документация, доступная в интерактивном режиме.

Средства виртуальной реальности и имитационные модели способствуют эффективной и безопасной эксплуатации промышленных объектов

П.А. Бунто, В.А. Куликов (ЗАО «НЕОЛАНТ»)

Похвала виртуальным тренажерам

Сегодня всё больше и больше экспертов приходят к мнению, что обучать сотрудников и поддерживать их профессиональные навыки гораздо эффективнее на основе работы с виртуальными моделями, чем с помощью видеокурсов. Таким образом, тренировки в условиях “виртуальной реальности” становятся необходимым дополнением к практике работы на реальном оборудовании в реальной обстановке.

Такие свойства виртуальных тренажеров, как мультимедийность и интерактивность, позволяют вести обучение и тренировку персонала в условиях, максимально приближенных к “боевым”. Использование в этих устройствах виртуальных моделей – оборудования, технологических процессов, рабочих ситуаций – обеспечивает возможность многократных репетиций без привлечения реального оборудования, что экономит его ресурсы и исключает риск нарушения норм промышленной безопасности и возникновения техногенных угроз. Персонал, проходящий обучение и повышающий квалификацию с помощью виртуальных моделей, достигает должного уровня знаний и умений в более сжатые сроки. По мнению компании *Haskett Consulting*, люди запоминают всего лишь 20% того, что они видят, 40% – того, что они видят и слышат и целых 70% того, что они видят, слышат и делают.

Современная электронная документация – интерактивная, мультимедийная, обладающая удобным интерфейсом для быстрого поиска нужной информации и её просмотра – это не только наглядное учебное пособие, но и компактный справочник по оборудованию, технологиям и приемам работы.

Инвестиции в создание компьютеризированных тренажеров и интерактивной электронной документации – это инвестиции в квалификацию и промышленную безопасность, причем весьма эффективные. Цифровая подоснова компьютеризированных тренажеров и электронной документации не только поддерживает гибкие возможности для формирования методик обучения отдельных сотрудников и коллективов, но и предоставляет способ для многократного использования зарекомендовавших себя наработок в отношении “содержания” (то есть информационного и ситуационного наполнения, алгоритмов работы

устройств и программных реализаций этих алгоритмов) при совершенствовании и развитии тренажерных комплексов и актуализации документации.

Что мы понимаем под термином “симулятор”

Симулятор – это программно-аппаратная система, реализующая какую-то виртуальную модель.

Можно выделить два класса симуляторов. Первые (рис. 1) обеспечивают вычисление параметров процесса как реакции на имеющийся набор начальных значений (исходных данных); их принято называть имитационными моделями (симуляторами) устройств. Синонимом этого термина можно считать понятие “программная реализация математической имитационной модели устройства”.

Симуляторы второго класса обеспечивают моделирование деятельности оператора, поддерживающего своими действиями установленный “правилами” режим функционирования моделируемого устройства (рис. 2). Здесь появляется важный дополнительный блок, позволяющий оператору управлять изменяемыми параметрами, основываясь на анализе результатов вычислений в традиционных

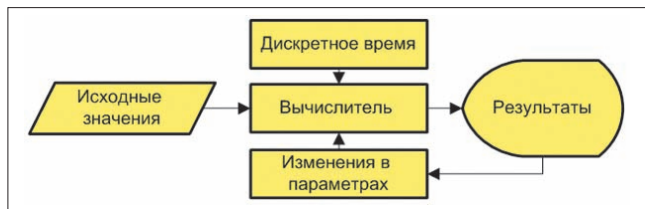


Рис. 1. Симулятор устройства

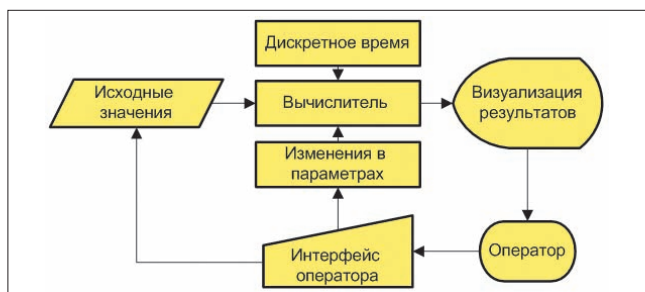


Рис. 2. Симулятор с управлением устройством

для симулятора блоках. Таким образом, добавление блока управления, осуществляемого через интерфейс оператора, формирует из “симулятора устройства” интерактивный “симулятор средств управления”.

Как показывает анализ, включение в симулятор интерактивных средств, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютерной имитационной моделью, может существенно изменить облик конечного изделия.

В зависимости от целей, поставленных перед разработчиками, симулятор может быть адаптирован для решения задач аналитических, верификационных, валидационных и/или дидактических (задач обучения).

Аналитические возможности симулятора развиваются за счет расширения функций по отображению связанных процессов в виде совмещенных графиков, таблиц, индикаторов, а также внедрения методов выявления скрытых взаимозависимостей.

Дидактические способности симулятора формируются благодаря надлежащей имитации средств управления, а также включением в него блоков заданий и оценки действий оператора (обучаемого специалиста) в сложившейся обстановке. **Симулятор, оснащенный развитым дидактическим блоком, принято называть тренажером** (рис. 3).

Анализ множества объектов, к которым применим термин “симулятор”, позволяет построить некую иерархию, в которой отражен генезис изделий “от простого к сложному”. Как показывает иллюстрация (рис. 4), иерархия симуляторов представляет собой цепочку уровней с ответвлениями. На нижнем

уровне иерархии находятся простые симуляторы, имитирующие функции устройств. На верхнем уровне размещаются тренажеры – интерактивные симуляторы – визуализаторы деятельности. Отраслевая специфика создаваемого тренажера зависит от той математической имитационной модели, которая “загружается” в вычислитель.

3D-модели как основа виртуальной реальности

Многие промышленные объекты характеризуются существенной территориальной рассредоточенностью производственных и административных служб. К примеру, площадь промплощадки атомной электростанции (АЭС) может измеряться десятками и сотнями гектаров.

Освоение “секретов” функционирования таких промышленных комплексов – сложный процесс. При этом эффективность и безопасность здесь напрямую связана со степенью понимания сотрудниками территориального устройства родного предприятия. Ускорить усвоение этой информации позволяет её представление в простом и наглядном виде. Большую роль в этом играют технологии информационного моделирования промышленных объектов [1] и виртуальной реальности, построенной на основе 3D-моделей промышленных предприятий.

Высокоточные детализированные трехмерные модели позволяют быстро и понятно получить и усвоить информацию о физическом расположении объектов предприятия, их внутреннем устройстве. При этом данные о технологических схемах и характеристиках технологического оборудования и инженерных систем, хранимые в информационной модели предприятия, позволяют детально изучить технологические процессы.

Применение имитационных моделей на практике

Рассмотрим практическое применение имитационных моделей для решения разных задач, относящихся к эксплуатации АЭС.

✓ Верификация опасных технологических процессов

Значимой областью применения методов “виртуальной реальности” является моделирование хода выполнения сложных “безлюдных” технологических процессов. Один из примеров, который наглядно иллюстрирует выгоды использования имитационных моделей для верификации таких технологий – модель демонтажа графитовой кладки шахты реактора АМБ-100 Белоярской АЭС.

Понятно, что проведение подобных радиационно опасных работ возможно только с помощью дистанционно управляемого робота. Нештатное (не предусмотренное проектом) развитие событий чревато не только дополнительными финансовыми и временными затратами на выполнение корректирующих действий, но и негативным радиационным воздействием на персонал и окружающую среду.

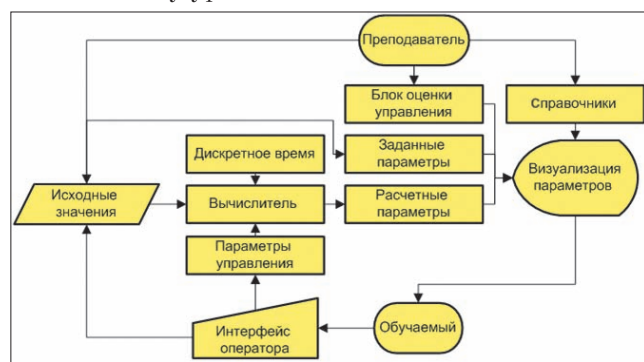


Рис. 3. Общая схема тренажера

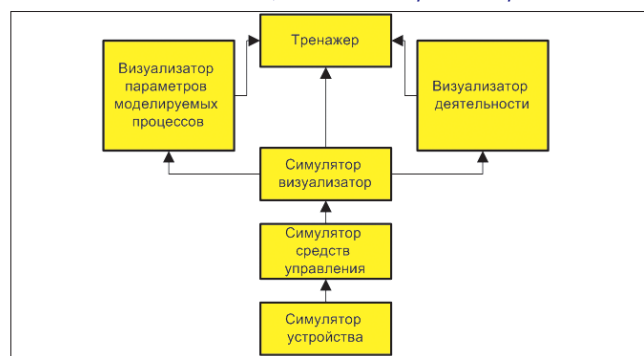


Рис. 4. Иерархия симуляторов

Это обстоятельство, вкупе с требованиями нормативно-технических и руководящих документов Ростехнадзора и Концерна “Росэнергоатом”, привело к необходимости верифицировать процесс демонтажа на предмет исполнимости и безопасности работ по разборке, применив для этого арсенал виртуального имитационного моделирования. С этой целью специалисты компании “НЕОЛАНТ” подготовили:

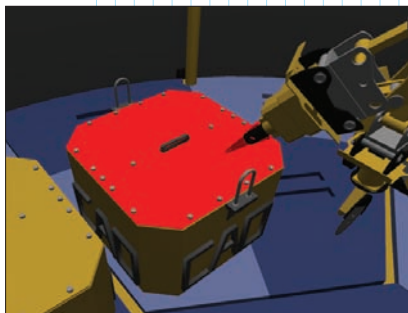
- 3D-модель шахты реактора со всеми содержащимися в ней объектами, а также модель робота *BROCK*;

- имитационную динамическую 3D-модель хода работ по демонтажу, в которых был задействован робот, выполняющий операции в шахте реактора при помощи специальной конструкции под названием “карусель”.

При имитации процесса демонтажа была использована модель взаимодействия твердых тел, исключая “проникновение” объектов друг в друга; также учитывалось действие силы тяжести на объекты, вовлеченные в процесс. Для упрощения определения элементов конструкции, которые мешают выполнению технологических операций, в программном комплексе реализована система визуального оповещения о коллизиях (столкновениях) объектов: при соприкосновении движущихся частей роботов с другими объектами на сцене и те, и другие подсвечиваются красным цветом (рис. 5). Более подробно возможности имитационного комплекса описаны в [2].

Верификация с помощью имитационной модели выявила проблемы с реализацией предложенной технологии демонтажа графитовой кладки. Для устранения обнаруженных коллизий понадобилось внести ряд изменений в первоначальный вариант технологии, разработанный сторонней организацией.

Самыми серьезными оказались проблемы с автоматической сменой рабочих насадок трех типов, которые нужны роботу в процессе разборки кладки. В частности, эти проблемы возникали из-за недостаточной точности позиционирования манипулятора робота относительно устанавливаемой насадки – добиться нужной точности при управлении роботом на основе картинка с телекамер оказалось невозможно. Модифицированный вариант технологии предусматривает использование трех роботов, на которых требуются насадки будут установлены сразу, что устраняет необходимость в операциях замены.



*Рис. 5. Красный цвет сигнализирует о незапланированном соприкосновении цангового захвата робота *BROCK* и крышки контейнера*

Кроме того, имитационное моделирование позволило предложить:

- улучшенную схему расположения телекамер, изображение с которых позволяет оператору управлять роботом;

- новую конструкцию “карусели”, позволяющую извлечь все блоки (старая конструкция обеспечила бы извлечение лишь 30% блоков графитовой кладки реактора);

- ряд других усовершенствований, которые в совокупности обеспечивают выполнение задачи по демонтажу.

Помимо верификации технологии, имитационная модель демонтажа графитовой кладки шахты реактора АМБ-100 Белоярской АЭС позволила решить и задачи обучения. Мы получили действующий имитационно-обучающий тренажер для подготовки операторов робота *BROCK*, поскольку в рамках этой модели точно реализован процесс управления роботом, и в нее включена система видеонаблюдения, предназначенная для наблюдения за его работой. Имитационная модель позволяет воспроизводить в виртуальной реальности различные аварийные ситуации и обучать операторов действиям в таких обстоятельствах.

Рассмотрим еще один пример опасных работ, выполнимость которых проверялась на имитационной модели: бесполостное заполнение внутриреакторных пространств промышленных уран-графитовых реакторов (*ПУГР*) барьерным материалом – глино-содержащими или бетонными смесями. Это важный элемент обеспечения радиационной безопасности при выводе *ПУГР* из эксплуатации по технологии “захоронение на месте”.

Доступ во внутриреакторное пространство, которое предстоит заполнить барьерным материалом, затруднен и опасен – замкнутый объем заполнен частотолком из вертикально установленных пустотелых труб и характеризуется высоким уровнем радиационного загрязнения. Это исключает присутствие людей и делает необходимым применение мобильного роботизированного устройства (*МРУ*) в технологическом процессе демонтажа труб и иных конструкций, препятствующих распространению барьерного материала.

С целью верификации инженерных аспектов технологии таких работ, снижения издержек и обеспечения безопасности, специалистами компании “НЕОЛАНТ” было проведено компьютерное имитационное моделирование:

- технологии роботизированного демонтажа конструкций, мешающих заполнению барьерным материалом;

- процесса собственно засыпки защитных барьеров.

В результате применения имитационного моделирования удалось:

- 1 Обеспечить проверку геометрической доступности всех элементов для демонтажа. Проверка геометрической доступности проводилась с учетом геометрических и кинематических характеристик *МРУ*

и внутренней геометрии и структуры внутриреакторных пространств (схем).

2 Сформировать оптимальную последовательность выполнения работ.

3 Гарантировать исключение нештатных ситуаций и избежать связанных с ними потерь времени и материальных ресурсов.

Итогом стало создание документированной технологии освобождения подреакторного пространства от конструкций, верифицированной с помощью компьютерной имитационной модели.



Рис. 6. Положение манипулятора МРУ с насадкой-захватом и зажатым в ней обрезком для прохождения через трубу

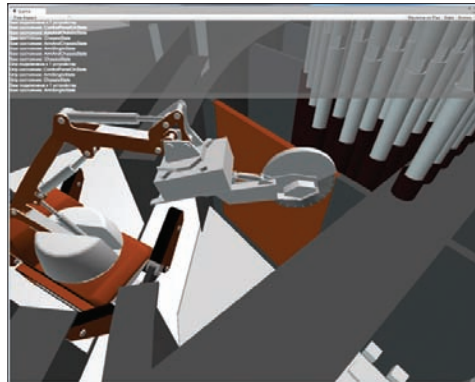


Рис. 7. МРУ обрезает внутренние перегородки схемы "Р"

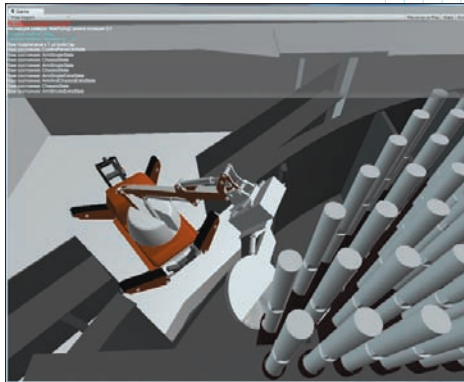


Рис. 8. Демонтаж труб с помощью МРУ

Применение имитационной модели для верификации технологического процесса демонтажа труб иллюстрирует рис. 6÷8.

✓ Обучение персонала

Важнейшим фактором, гарантирующим безопасную и надежную эксплуатацию сложных технологических объектов, является высокий уровень компетентности персонала, знание конструктивных особенностей оборудования, умение эксплуатировать технику в штатных режимах и принимать обоснованные решения в нештатных ситуациях.

Если говорить об АЭС, то к числу наиболее сложных задач обучения и повышения квалификации персонала относится формирование и совершенствование навыков работы с уникальными эпизодически используемыми устройствами. Одно из них – гайковёрт для автоматической одновременной вытяжки всех шпилек (ГОВШ) главного разъема реактора (ГРР) ВВЭР-1000. Эта операция проводится при монтаже/демонтаже реактора.

Представить сложность задачи помогут следующие данные:

- масса гайковёрта – 41 500 кг;
- диаметр окружности расположения осей шпилек – 4.264 м;
- количество шпилек – 54.

Устройство, как мы видим, не миниатюрное, да и реакторы разбираются не каждый день. Поэтому для эффективной подготовки персонала в части выполнения операций по уплотнению/разуплотнению

ГРР с помощью ГОВШ компанией “НЕОЛАНТ” был создан программный тренажерный комплекс по отработке навыков обращения с гайковёртом. В этом комплексе имитируется работа оператора центрального пульта управления гайковёрта, а также наиболее важные операции, выполняемые другими специалистами. Тренажер обеспечивает контроль действий обучаемого персонала и разбор допущенных ошибок.

В ходе создания тренажерного комплекса специалистами “НЕОЛАНТ” были разработаны:

- структура базы данных тренажера;
- интерфейс тренажера, максимально точно воспроизводящий рабочее место оператора (рис. 9);
- штатные сценарии с возможностью регулирования их уровня сложности;
- модельные реализации

аварийных ситуаций для отработки действий специалистов в условиях нештатных режимов работы;

- встроенная база типовых ошибок.

Еще одним средством обеспечения должного качества знаний персонала о конструктивных особенностях оборудования являются интерактивные электронные руководства, предназначенные для изучения оборудования и получения информационной поддержки при работе с ним.

В качестве примера подобной электронной документации рассмотрим Руководство для изучения

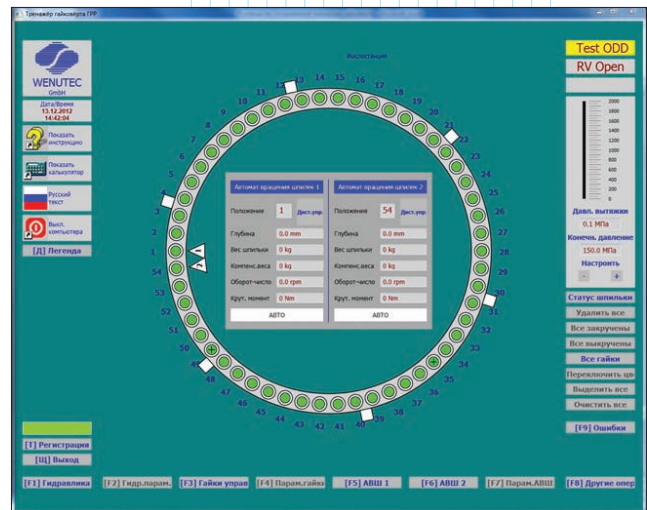


Рис. 9. Экран центрального пульта тренажера управления гайковёртом

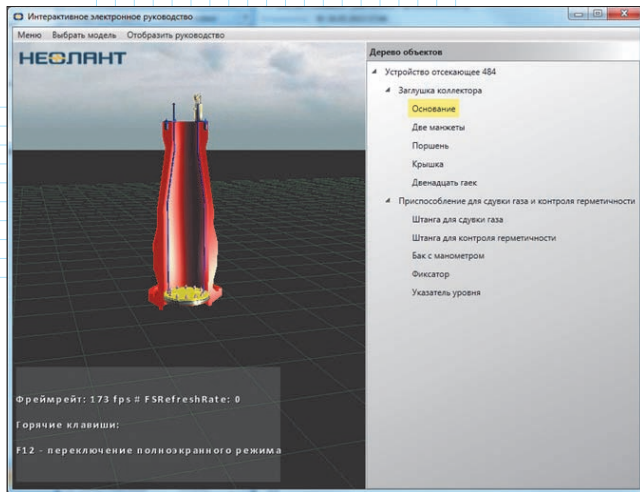


Рис. 10. Интерактивное руководство: окно просмотра 3D-модели

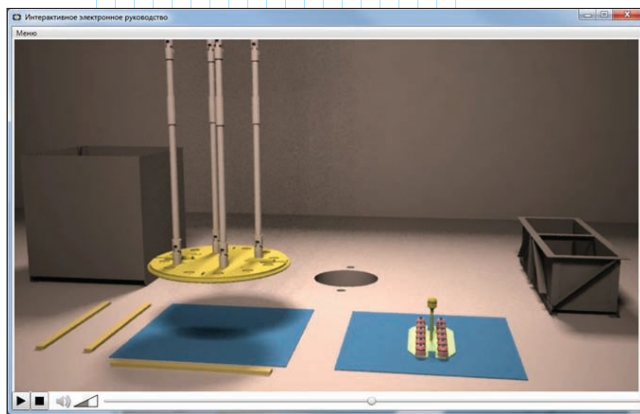


Рис. 11. Интерактивное руководство: окно воспроизведения анимации

устройства, отсекающего первый контур парогенератора от атомного реактора во время проведения ремонтных и профилактических работ. Применение Руководства существенно расширяет возможности формирования навыков работы за счет наглядного представления конструкции оборудования и интерактивного обучения эксплуатации на базе реалистичной 3D-графики.

Для изучения конструкции интерактивное Руководство предлагает окно просмотра 3D-модели (рис. 10). В правой части находится так называемый экран отображения дерева объектов (ЭДО), где в иерархическом дереве можно выбирать составные части устройства – они будут подсвечиваться на модели.

Предусмотрена и удобная возможность просмотра документации по изучаемому устройству. Для просмотра анимированного процесса эксплуатации “Устройства отсекающего” используется окно, в

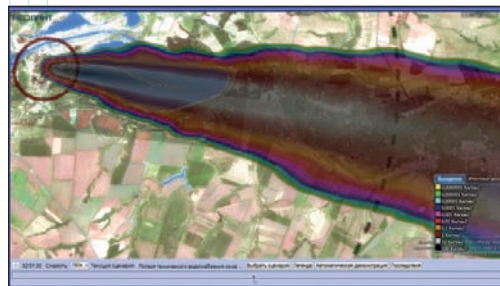


Рис. 12. Визуализированная модель развития ситуации радиоактивного заражения в зоне наблюдения АЭС

котором демонстрируются видеоролики со звуковыми комментариями, отображающие процессы монтажа и демонтажа устройства (рис. 11).

Помимо прочего, для проверки знаний обучаемых сотрудников в Руководстве реализована система тестирования. Отчеты по прохождению тестов сохраняются в базе данных, и их можно получить в любой момент.

✓ Моделирование развития аварийных ситуаций

Как уже было сказано, в зависимости от задач, поставленных перед разработчиками, симулятор может быть адаптирован для разных целей: аналитических, верификационных, валидационных и/или дидактических. К этому можно добавить, что вариативны и масштабы решаемых с помощью имитационного моделирования задач – от анализа частных технологий, обучения специалистов конкретных специальностей до отработки действий ряда служб регионального масштаба.

Примером здесь могут послужить системы имитационного моделирования для анализа развития зон радиационного загрязнения в случае аварии на АЭС. В их информационном основе – трехмерные модели обстановки, формируемые на различных этапах жизненного цикла аварийной ситуации, и система визуализации этих моделей, обеспечивающая “погружение” обучаемых специалистов в виртуальную реальность моделируемых событий и управление ими. Ввиду того, что в случае аварии радиационное загрязнение может покрывать обширные территории, в качестве области моделирования выбирается вся зона наблюдения АЭС [3]. Такие тренажеры используются для отработки действий персонала станции, сотрудников МЧС, органов государственного управления в условиях модельного развития ситуации. Их можно применять и в качестве систем поддержки проактивного принятия решений в реальных чрезвычайных ситуациях.

При создании симулятора для анализа развития радиационного загрязнения зоны наблюдения конкретной АЭС создается подробная карта местности с рельефом и наложенными на этот рельеф спутниковыми снимками высокого разрешения. На этой карте подробно отображается дорожная сеть, карта водных ресурсов, карта лесных массивов. На эту модель наложены трехмерные модели промплощадки АЭС, населенных пунктов, входящих в зону наблюдения, датчиков системы автоматического контроля радиационной обстановки (АСКРО). В результате получается информационно насыщенная и реалистичная модель зоны наблюдения АЭС (рис. 12).

Для моделирования развития ситуации радиационного загрязнения в зоне наблюдения используется программный

комплекс “НОСТРАДАМУС”, разработанный ИБРАЭ РАН (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН), и визуализатор, разработанный специалистами “НЕОЛАНТ”.

Визуализатор обеспечивает отображение:

- динамики распространения радиационного загрязнения в приземных слоях воздуха;
- сводного графика и таблицы показаний всех датчиков АСКРО. При превышении показаниями датчиков пороговых уровней на трехмерной модели наглядно выделяется местоположение датчика, зафиксировавшего превышение порогового уровня;
- данных, полученных машиной радиационной разведки;
- схемы оповещения министерств и ведомств, на которой в каждый момент времени видно, какие министерства получили сообщения о возникновении аварии, а какие еще нет;
- мест размещения, функций и ресурсов подразделений, участвующих в ликвидации аварийной ситуации.

После завершения моделирования развития аварийной ситуации на пространственной модели зоны аварии отображаются картины поверхностных выпадений радиационного загрязнения и числовые значения итоговых радиационных доз, а также результаты анализа, касающиеся необходимости проведения защитных мероприятий и их конкретного содержания.

Лицам, ответственным за эвакуацию, наряду с камерными ситуациями (сцены в штабе, на пунктах сбора и приема людей, в точках маршрута), тренажер показывает виртуальную реальность в масштабе всей зоны эвакуации, все маршруты движения. На основе анализа этой информации можно сформировать общее представление о текущей обстановке и принять обоснованное управленческое решение.

Таким образом, симулятор для анализа развития ситуации в зоне радиационного загрязнения при аварии на АЭС, поддержки процесса принятия решений и отработки действий персонала позволяет:

- 1 Получать целостную и наглядную картину развития аварийной ситуации.
- 2 Проводить тренировку персонала, отвечающего за организацию эвакуации. Для этого выбираются

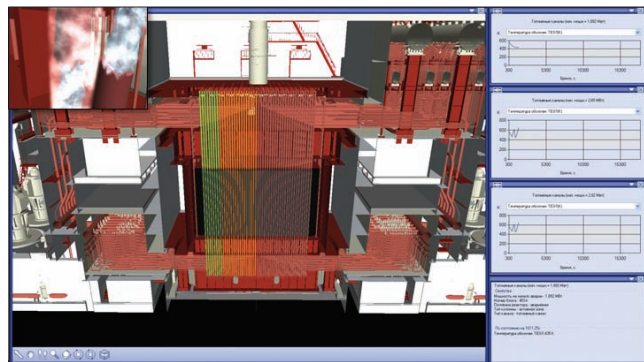


Рис. 13. Так ведется анализ развития ситуации при разрыве опускающего трубопровода на энергоблоке АЭС

характеристики аварии, система “рисует” картину развития ситуации, а обучаемые сотрудники составляют план эвакуационных мероприятий, обеспечивающих минимизацию дозы облучения для населения. Тренажер оценивает правильность и своевременность действий обучаемого.

Визуализатор, созданный специалистами компании “НЕОЛАНТ”, является универсальным инструментом для отображения результатов моделирования аварийных ситуаций. Наряду с применением для отработки действий персонала по эвакуации населения, он успешно используется в симуляторе развития аварийной ситуации с технологическим оборудованием АЭС (рис. 13).

Заключение

На основе вышеизложенного можно сделать заключение, что ПО, основанное на системах виртуальной реальности, трехмерных информационных и имитационных моделях, дает возможность обеспечить:

- наглядное отображение сложных технических объектов и технологических операций;
- наглядное представление процесса протекания аварийных ситуаций;
- верификацию сложных технологических процессов;
- эффективное обучение специалистов работе со сложным техническим оборудованием.

Всё это позволяет повысить степень безопасности эксплуатации сложных промышленных объектов за счет повышения уровня подготовки сотрудников, что обеспечивает более глубокое понимание ими технологических процессов. 🧐

Литература

1. Концепция научно-информационного обеспечения программ и проектов государств-участников СНГ в инновационной сфере // www.viniti.ru/download/russian/MKSNTI/conceptfinal.pdf. Одобрена решением Экономического Совета Содружества Независимых Государств от 13 марта 2009 г. // www2.viniti.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=293&Itemid=83.
2. Былкин Б.К., Кононов В.В., Бунто П. А., Гуляев О.В., Свиридов Д.В., Трифионов 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.
3. СП 2.6.1.2216-07. Санитарно-защитные зоны и зоны наблюдения радиационных объектов. Условия эксплуатации и обоснование границ.

Авторы

- Бунто П.А. – главный инженер проектов направления имитационных моделей и тренажеров ЗАО “НЕОЛАНТ”
- Куликов В.А. – ведущий аналитик ЗАО “НЕОЛАНТ”