



Программно-аппаратный комплекс Digital Decommissioning – инновационный подход к выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии

**В.В. Кононов, В.Л. Тихоновский, К.В. Юшицин, Д.В. Чуйко, И.И. Журавлев (АО «НЕОЛАНТ»),
П.А. Блохин (ИБРАЭ РАН),**

**Ю.В. Данейкин (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»)**

Представлен программно-аппаратный комплекс Digital Decommissioning, впервые реализующий инновационные подходы к выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии, основанные на цифровом информационном моделировании, технологиях имитационного моделирования и виртуальной реальности.

Ключевые слова: атомная энергия, ядерная безопасность, вывод из эксплуатации АЭС, проектирование, жизненный цикл, цифровое информационное моделирование, имитационное моделирование, виртуальная реальность.

Одним из основных сдерживающих факторов в развитии атомной энергетики с точки зрения как безопасности, так и экономической эффективности является обеспечение эффективного вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Отличительной особенностью процесса вывода из эксплуатации объектов атомной энергетики и ядерного топливного цикла от иных промышленных предприятий является наличие радиационного загрязнения, создающего угрозы персоналу объекта и населению прилегающих территорий. Это делает невозможным прямое участие персонала при выполнении определенных операциях и его нахождение в зонах объекта при выводе из эксплуатации. Кроме того, необходимо учитывать наличие значительного количества радиоактивных отходов, накопленных за период его эксплуатации и массово образующихся при выводе из эксплуатации.

Необходимость минимизации возникающих угроз приводит к тому, что стадия детального проектирования вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии является обязательной, а сам вывод из эксплуатации достаточно дорогостоящей стадией жизненного цикла объекта.

Проблема обеспечения безопасности вывода из эксплуатации усугубляется и тем, что длительность стадии вывода из эксплуатации ОИАЭ зачастую сопоставима с длительностью стадии эксплуатации объекта — ≥ 40 лет. Это приводит к существенному росту финансовых затрат, связанных с необходимостью поддержания части систем, оборудования, конструкций остановленного объекта в работоспособном состоянии для обеспечения его безопасного сохранения в период подготовки к выводу и на этапе выполнения практических работ по выводу из эксплуатации. Кроме того, длительные сроки вывода

из эксплуатации требуют наличия эффективной технологии накопления, структурирования и передачи знаний как о самом объекте, так и о процессе вывода его из эксплуатации.

Не менее существенным фактором, влияющим на стоимость вывода из эксплуатации, являются затраты на обращение с радиоактивными отходами, массово образующимися при демонтаже, включая затраты на их переработку и захоронение.

Совокупность указанных проблем снижает привлекательность и конкурентоспособность атомной энергетики, являющейся одной из доминирующих отраслей РФ и характеризующейся высоким экспортным потенциалом.

Мировая атомная индустрия движется по пути решения задачи оптимизации дозовых радиационных нагрузок через тщательное планирование и детализацию работ, разработку и применение передовых технологий осуществления демонтажных работ. Вместе с тем оптимального решения соответствующей задачи не найдено во многом из-за того, что проблема вывода из эксплуатации масштабно возникла только в последние десятилетия, когда численность объектов, подлежащих демонтажу, существенно возросла.

В среднесрочной перспективе ближайших 10 лет необходимость совершенствования и оптимизации подходов проектирования вывода из эксплуатации является одним из ключевых направлений развития атомной отрасли как в России, так и за рубежом и вызовом, ответ на который позволит сохранить позиции атомной энергетики на фоне развития иных технологичней энергогенерации.

В рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 г. и на период до 2015 г.» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 г.» запланирован вывод из эксплуатации

к 2030 г. более 50 объектов атомной энергетики и промышленности, в том числе 18 блоков АЭС, 13 промышленных уран-графитовых реакторов, а также 24 исследовательских реакторов.

По оценкам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), наряду с национальным рынком объем мирового рынка вывода из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов в 2015 г. превысил 7 млрд. долл. США, из них объем рынка вывода из эксплуатации в Восточной и Западной Европе составил более 1 млрд. долл. США [1]. При этом мировые объемы вывода из эксплуатации ОИАЭ имеют тенденции быстрого роста, поскольку в ближайшие годы будет сформирован основной объем вывода из эксплуатации ядерных реакторов, построенных в 50-80 годы XX столетия.

Основными факторами, усложняющими поиск технических решений для вывода из эксплуатации, являются:

- существенная топологическая и конфигурационная сложность объектов атомной энергетики, не позволяющая эффективно описать их структуру стандартными способами;
- значительный объем «бумажной» документации и утрата ряда сведений об особенностях сооружения и режимах эксплуатации объектов;
- отсутствие адекватных математических моделей, позволяющих получить актуальные оценки обязательств по выводу из эксплуатации;
- многообразие методов и технологий переработки, дезактивации, транспортировки и захоронения радиоактивных отходов при отсутствии устоявшихся практик по их применению [2].

Более того, в настоящее время нет и единого подхода к архитектуре процессов вывода из эксплуатации. В настоящий момент приняты следующие варианты вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

- Немедленный демонтаж после остановки объекта атомной энергии и краткой выдержки под наблюдением (5...10 лет) для обеспечения распада основных короткоживущих загрязняющих радионуклидов в конструкциях, оборудовании и других элементах (DECON).
- Отложенный демонтаж объектов атомной энергетики после длительной (>50...60 лет) выдержки под наблюдением. За этот период должны распасться наиболее характерные загрязняющие радионуклиды — ^{60}Co , ^{137}Cs и др., что существенно снижает радиационный фактор при последующем выводе из эксплуатации (SAFESTORE).
- Захоронение на месте без демонтажа, но с обеспечением герметизации радиоактивных конструкций для воспрепятствования выхода радионуклидов во внешнюю среду (ENTOMB) [3].

Процесс подготовки к выводу из эксплуатации в соответствии с национальными требованиями не зависит от выбранного варианта и включает:

- 1) разработку локальной концепции вывода из эксплуатации и программы вывода из эксплуатации. Со-

ответствующие требования определяют необходимость проработки различных вариантов вывода из эксплуатации, а также обоснованный выбор оптимального варианта как с точки зрения экономической эффективности, так и соблюдения требований радиационной и промышленной безопасности.

Результатом выбора оптимального варианта является укрупненная оценка стоимости вывода из эксплуатации, а также программа вывода из эксплуатации объекта атомной энергетики и мастер-план вывода из эксплуатации с детализацией до уровня целей (план-график работ 1-го уровня);

- 2) проведение комплексного инженерного и радиационного обследования. Соответствующее требование определяет необходимость сбора и анализа актуальной информации об инженерном и радиационном состоянии объекта;

3) разработку проекта вывода из эксплуатации. Соответствующее требование определяет необходимость разработки основных проектно-технологических решений с учетом выбранного варианта вывода из эксплуатации и полученных данных комплексного инженерного и радиационного обследования.

Результатом разработки проекта должна являться точная проектная оценка стоимости работ по выводу из эксплуатации и сводный сметный расчет;

- 4) разработку рабочей документации по выводу из эксплуатации. Соответствующее требование предполагает детализацию проектно-технологических решений и разработку локальных смет на выполнение отдельных видов работ.

В соответствии с установленными национальными требованиями, а также требованиями МАГАТЭ, укрупненная оценка стоимости вывода из эксплуатации должна осуществляться на основе имеющихся данных об объекте, отраженных в его проектной и эксплуатационной документации [4]. Ее дальнейшая детализация, то есть оценка реальной стоимости выполнения практических работ по выводу из эксплуатации, формируемая в проекте вывода из эксплуатации, должна базироваться на анализе результатов комплексного инженерного и радиационного обследования.

При этом из-за отсутствия методов достоверного совмещения данных радиационной обстановки на объекте атомной энергетики с его инженерно-топологической конфигурацией как укрупненная, так и оценка реальной стоимости выполнения практических работ по выводу из эксплуатации имеют значительную погрешность, поскольку полностью зависят от экспертных оценок специалистов, производящих анализ результатов обследования.

Более того, ситуация усугубляется тем, что в отсутствие методов и инструментов реальной оценки влияния радиационного загрязнения специалисты в целях формального соблюдения требований безопасности производят максимально консервативные оценки, зачастую на порядок завышая влияние радиационного фактора и объемов образования радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации объектов атомной энергетики [5].

Модели и методы точного определения стоимостных оценок затрат по выводу из эксплуатации объектов атомной энергетики, а также возможность точной оценки операций, связанных с демонтажем таких объектов, на сегодняшний день отсутствуют по объективным причинам. До настоящего момента не решена задача построения комплексной инженерно-радиационной модели объекта использования атомной энергии, интегрирующей как актуальную и детализированную пространственно-топологическую конфигурацию объекта, так и данные радиационной обстановки об объекте.

Однако на современном этапе развития информационно-компьютерных технологий в части возможности создания высокоточных трехмерных моделей технологических объектов, появления человеко-независимых способов получения конфигурационной (лазерное сканирование) и радиационной (гамма-сканирование) информации о состоянии объекта атомной энергии обуславливает возможность получения комплексной исполнительской инженерно-радиационной модели, наличие которой позволит устранить неопределенность и субъективный («экспертный») подход в оценках значимости радиационного фактора при выводе из эксплуатации.

При условии создания комплексной исполнительской инженерно-радиационной модели остановленного для вывода из эксплуатации ОИАЭ на базе современных технологий цифрового моделирования, виртуальной реальности и имитационного моделирования в реальном времени, возможно создание программно-аппаратного комплекса, решающего задачу отработки оптимальных проектно-технологических решений для получения детального проекта вывода из эксплуатации. При этом разработка проекта ВЭ, поиск оптимальных проектно-технических решений может совмещаться с процессом предварительного обучения демонтируемого персонала и верификацией разрабатываемых решений.

Для создания комплексной исполнительской инженерно-радиационной модели и ее использования в комплексе проектирования вывода из эксплуатации и имитационного моделирования демонтажа объекта атомной энергетики необходимо решить следующие приоритетные научные задачи.

1. На основе высокоточной актуальной трехмерной модели объекта и частичных данных радиационного обследования (α , β , γ — составляющие радиационного загрязнения) посредством решения обратной задачи получить достоверную картину распределения источников радиационного загрязнения на объекте, тем самым построив модель пространственно-распределенного радиационного источника. Задача усложняется необходимостью построения трехмерного распределения радиоактивного загрязнения по поверхности и объему типовых элементов оборудования с учетом особенностей инженерных систем и строительных конструкций.

2. На основе полученной модели пространственно-распределенного радиационного источника разработать методы динамического пересчета радиационных полей и самого пространственно-распределенного источника в реальном времени при изменении топологии объекта при имитации его поэтапного демонтажа.

В настоящий момент указанные научные задачи решает ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск) и ИБРАЭ РАН (Москва) в рамках НИОКТР, выполняемых в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Создание программно-аппаратного комплекса проектирования, оптимизации и управления выводом из эксплуатации российских и зарубежных объектов использования атомной энергии». Результаты НИОКТР совместно с использованием цифрового и имитационного моделирования, а также с применением технологий виртуальной реальности позволят непосредственно в ходе обучения персонала подсчитывать и оптимизировать дозовые нагрузки на персонал, точно рассчитывать объемы образования радиоактивных отходов и фактически полностью устранить существующие сегодня ограничения и недоверие проектов по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии, разрабатываемых сложившимися за прошлые десятилетия методами.

Проект выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии на государственную поддержку кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

В результате реализации данного проекта АО «НЕОЛАНТ» создаст высокотехнологичное производство и обеспечит поставку, внедрение и обучение применению специалистами широкого круга организаций-участников рынка вывода из эксплуатации программно-аппаратного комплекса Digital Decommissioning (ПАК DD).

Создаваемый продукт включает четыре основных программных модуля.

1. Планирование и проведение комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО). Обеспечивает планирование проведения радиационного обследования ОИАЭ, решение обратной задачи на основе данных радиационного обследования — идентификацию потенциальных источников ионизирующих излучений, включение их и отображение на исполнительской трехмерной модели объекта.

2. Концепция вывода из эксплуатации. Автоматизирует комплекс задач, решаемых при разработке Локальной концепции вывода из эксплуатации ОИАЭ, в том числе предоставления натуральных характеристик объекта для оценки стоимости по различным

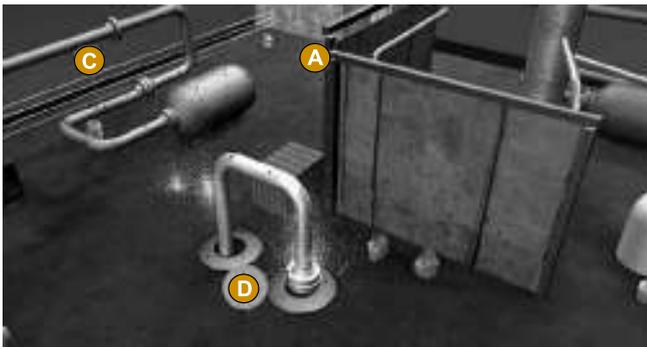


Рис. 1. Расчет конфигурации радиационных полей и степени радиационного загрязнения помещений и элементов ОИАЭ

вариантам вывода из эксплуатации, включая затраты на вывод из эксплуатации, обращение с радиоактивными отходами от вывода из эксплуатации и мероприятия по реабилитации загрязненных территорий.

3. Проектирование вывода из эксплуатации. Является, по сути, впервые создаваемой на рынке системой автоматизированного проектирования для задач вывода из эксплуатации, учитывающей фактор радиационного загрязнения (рис. 1).

4. Подготовка персонала. Обеспечивает подготовку демонтируемого персонала к выполнению работ средствами виртуальной реальности на основе разработанных в модуле «Проектирование вывода из эксплуатации» проектно-технологических цепочек вывода из эксплуатации ОИАЭ.

Проект по созданию высокотехнологического производства ПАК DD в полной мере соответствует приоритетам научно-технологического развития РФ, определенных в подпунктах «а» и «б» пункта 20 «Стратегии научно-технологического развития РФ» (утверждена Указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642).

В первую очередь создание ПАК Digital Decommissioning непосредственно решает задачу перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике (подпункт «б» пункта 20 Стратегии), поскольку обеспечивает эффективную реализацию наименее проработанного, но наиболее критичного этапа жизненного цикла объектов атомной энергетики — вывода из эксплуатации.

Одновременно реализация проекта обеспечивает формирование комплекса технологий, имеющих самостоятельное значение для реализации приоритета научно-технологического развития, определенного подпунктом «а» пункта 20 Стратегии, а именно перехода к передовым цифровым, интеллектуальным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. Набор технологий, полученных в ходе реализации проекта, в частности, технологий:

- построения и управления в реальном времени высокоточными трехмерными информационными моделями (рис. 2).
- имитационного мульти-размерного динамического моделирования;

- построения проектов демонтажа опасных промышленных объектов непосредственно в процессе обучения персонала;

- полномасштабного безлюдного контроля и управления выполнением работ на заключительной стадии жизненного цикла объекта, имеют самостоятельную ценность, могут иметь правовую охрану на зарубежных рынках и лицензироваться для использования в других отраслях промышленности — химическом производстве, глубокой переработке углеводородного сырья и т. д.

Кроме высокой экономической эффективности применение указанных технологий и сам основной продукт — ПАК Digital Decommissioning является прямым ответом на два больших вызова, определенных Стратегией научно-технологического развития РФ. Во-первых, ПАК Digital Decommissioning является способом предотвращения возрастания антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и связанного с их неэффективным использованием роста рисков для жизни и здоровья граждан (подпункт «в» пункта 19 Стратегии).

Во-вторых, ПАК Digital Decommissioning стабилизирует одну из ключевых отраслей РФ — атомную энергетику, нивелируя угрозу утраты позиций страны как поставщика технологий сооружения и эксплуатации атомных станций в условиях сверхдинамичного развития альтернативных технологических решений выработки энергии.

Решение задачи безопасного обращения с радиоактивными отходами, в том числе и на завершающей стадии жизненного цикла объекта — вывода из эксплуатации, повышает привлекательность атомной энергетики как одного из наиболее безопасных, экологически чистых и компактных способов генерации энергии, что в полной мере отвечает вызову, определенному подпунктом «д» пункта 20 Стратегии — качественное изменение характера глобальных и локальных энергетических систем, рост значимости энерговооруженности экономики и наращивания объема выработки и сохранения энергии, ее передачи и использования.

Применение ПАК Digital Decommissioning обеспечивает достижение принципиально нового качественного уровня проектирования вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии на базе мульти-размерного динамического моделирования радиационно-опасного объекта и технологических процессов, обеспечивающих проведение демонтажных работ, ликвидацию радиоактивных загрязнений и обращение с образующимися радиоактивными отходами, оптимизированных по критериям безопасности, надежности и экономической эффективности. Достижение принципиально нового качественного уровня управления работами по выводу из эксплуатации, включая демонтаж и обращение с радиоактивными отходами, за счет применения динамических имитационных моделей для детального планирования работ, сопоставления с базовыми проектными решениями, обучения персонала при подготовке к выводу и при выводе из эксплуатации.



Рис. 2. Наложение результата гаммы сканирования на информационную инженерно-радиационную 3D модель

Использование ПАК Digital Decommissioning принципиально меняет технологию вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, поскольку:

- совмещает процедуру обучения персонала и разработки проекта вывода из эксплуатации за счет использования имитационного моделирования, основанного на модели пространственно-распределенного радиационного источника, а также методах динамического пересчета радиационных полей и самого пространственно-распределенного источника в процессе изменения его конфигурации (концепция Play & Design);
- обеспечивает высокую точность технико-экономических параметров проекта вывода из эксплуатации за счет решения задачи построения пространственно-распределенного радиационного источника на основе исполнительной трехмерной модели объекта атомной энергетики и данных радиационного обследования (α , β , γ) — составляющие радиационного загрязнения);
- максимально повышает безопасность выполнения работ по выводу из эксплуатации за счет современных информационно-компьютерных методов предварительной подготовки персонала, методов планирования и контроля выполнения практических работ, включая непрерывный контроль отклонений от принятых проектных решений.

ПАК Digital Decommissioning не имеет аналогов в отечественной и зарубежной практике проектирования и управления выводом из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Наличие ПАК Digital Decommissioning у российских инжиниринговых компаний в сегменте вывода из эксплуатации обеспечит им существенное конкурентное преимущество перед зару-

бежными компаниями. Важным фактором успешного продвижения ПАК Digital Decommissioning на мировой рынок является получение референтности непосредственно на стадии разработки.

В настоящее время АО «НЕОЛАНТ» в кооперации с компаниями Nukem Technologies GmbH и EWN GmbH (Германия) выполняет разработку проектной документации по выводу из эксплуатации 1...4 энергоблоков АЭС «Козлодуй» (Республика Болгария). Соответствующая работа финансируется за счет средств Европейского банка реконструкции и развития (ЕБРР) и предполагает создание исполнительной трехмерной модели 1...4 блоков станции.

Ведение проекта для АЭС «Козлодуй» создаст уникальные возможности для разработки ПАК Digital Decommissioning, поскольку обеспечивает доступ ко всем необходимым данным по энергоблокам и возможность их использования не только для апробации ПАК Digital Decommissioning, но и для сравнения результатов его применения с результатами стандартного проектирования как по скорости самого проектирования, так и по точности по отношению к реальному процессу вывода из эксплуатации.

Соответствующее сравнение позволит получить необходимые референции для организации продаж ПАК Digital Decommissioning и его внедрения как на российском, так и на европейском рынках, поскольку блоки АЭС «Козлодуй» являются типовыми по конфигурации и для АЭС ряда других европейских стран (Чехия, Словакия, Венгрия, Финляндия).

Список литературы

1. Итоги деятельности государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2015 г. <http://www.gosatom.ru> (дата обращения 6.12.2017).
2. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных установок. М.: МГСУ, 2014. 228 с.
3. 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.
4. Черников О.Г., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л. Создание базы данных для вывода из эксплуатации блоков Ленинградской АЭС // Электрические станции. 2011. № 11. С. 2-5.
5. Былкин Б.К., Тихоновский В.Л. Место и роль информационных технологий при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №4. С. 113-120.

Кононов Виталий Владимирович — ген. директор, **Тихоновский Владислав Леонидович** — канд. техн. наук, первый зам. ген. директора, **Юшицин Константин Владимирович** — канд. физ.-мат. наук, руководитель проектного офиса по обращению с радиоактивными отходами и выводу из эксплуатации,

Чуйко Даниил Вадимович — канд. техн. наук, руководитель службы по информационно-методическому обеспечению производственных процессов,

Журавлев Илья Игоревич — руководитель проекта АО «НЕОЛАНТ»,

Данейкин Юрий Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ФЭУ ФТИ ТПУ ФГАОУ ВО «ТПУ»,

Блохин Павел Анатольевич — младший научный сотрудник ИБРАЭ РАН.

Контактный телефон (499) 999-00-00.

E-mail: info@neolant.ru