

На правах рукописи

Щепелев Роман Михайлович

**Развитие и применение методов вывода из эксплуатации
ядерных установок на примере исследовательского стенда
СО-2М**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

23 ОКТ 2014



005553677

Москва – 2014

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«Московский инженерно-физический институт»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

КУДРЯВЦЕВ

Евгений Михайлович

- Доктор физико-математических наук,
профессор

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

ПРОСКУРЯКОВ

Константин Николаевич

- Доктор технических наук,
профессор НИУ МЭИ

РУБЦОВ

Валерий Семенович

- Кандидат технических наук, начальник
отдела прочности ФБУ «НТЦ ЯРБ»

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Научный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

Защита состоится "12" 11 2014 г. в 16 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Моск-
ва, Каширское шоссе, д.31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан "12" 10 2014 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземпля-
рах, заверенных печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



Чернов И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В реальной практике деятельности предприятий атомной промышленности наблюдаются процессы, которые не нашли достаточного научного объяснения, чтобы воплотиться в нормах жизнедеятельности отечественного ядерно-энергетического комплекса (ЯЭК), особенно это касается проблемы ликвидации последствий от негативных аспектов объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Такие обстоятельства требуют улучшения диагностического анализа влияния негативных факторов внешней и внутренней среды на состояние ОИАЭ и создание новых методов, механизмов и инструментальных средств для ликвидации вредных последствий их практического использования.

В середине прошлого столетия в нашей стране и за рубежом было спроектировано, построено и введено в эксплуатацию значительное число исследовательских ядерных реакторов и стендов. К настоящему моменту многие из них исчерпали свой проектный ресурс. В сложившейся ситуации актуальной, имеющей существенный экономический аспект, является задача конверсии отработавших ресурс исследовательских ядерных установок. Конверсию можно реализовать несколькими способами: путем модернизации и последующего использования по новому назначению систем и элементов выработавших ресурс исследовательских ядерных установок (ИЯУ), обоснованного продления их проектного срока службы и, наконец, вывода из эксплуатации с утилизацией радиоактивных и промышленных отходов за счет проведения реабилитационных мероприятий.

Научная проблема ликвидации вредных для окружающей среды, жизни и здоровья людей последствий эксплуатации ОИАЭ в условиях текущих рыночных отношений в российском ЯЭК обусловлена во многом существующими требованиями по обеспечению безопасности ОИАЭ. Поэтому задача научного обоснования полноты и достаточности технологических процессов и самих методов, средств ликвидации вредных для окружающей среды, жизни и здоровья людей последствий эксплуатации ОИАЭ приобрела новые черты из-за существенного увеличения уровня изменчивости и влияния неопределенности процессов развития и применения методов вывода из эксплуатации ИЯУ. Развитие и

постоянное улучшение методов, инструментов и различных средств практической деятельности по выводу из эксплуатации исследовательских ядерных реакторов и стендов является составной частью системы управления безопасностью национальным ядерным энергетическим комплексом. Эта система должна превентивно обеспечивать целенаправленное воздействие на факторы и условия хозяйственной деятельности, от состояния которых зависит результативность работы конкретного предприятия и национальная безопасность страны. Этим обуславливается актуальность выбора темы настоящего диссертационного исследования и поиска новых путей решения задач по конверсии исследовательских ядерных реакторов и стендов на основе современных требований безопасности при эксплуатации ОИАЭ.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы явилось создание метода выбора инженерных способов и инструментальных средств вывода из эксплуатации и конверсии исследовательских ядерных установок и практическая реализация данного метода на примере подкритического стенда СО-2М.

Для достижения указанной цели в работе решены следующие задачи.

1. Проанализированы известные ранее методы и средства вывода из эксплуатации исследовательских ядерных установок России.
2. Уточнены методы диагностики состояния ИЯУ и предложены технологии и средства конверсии ядерных установок исследовательского назначения на примере подкритического стенда СО-2М.
3. Выполнены работы по диагностике, демонтажу активной зоны и реабилитации производственных помещений подкритического стенда СО-2М с дезактивацией вспомогательного оборудования, сортировкой и подготовкой к утилизации образовавшихся радиоактивных отходов.
4. Разработаны предложения по созданию на освободившихся площадях ИЯУ нового поколения с повышенным уровнем безопасности.

Научная новизна работы

1. Впервые выполнена и апробирована разработка комплексного метода – уникального технологического инструментария вывода из эксплуатации подкритического стенда с уран-полиэтиленовой активной зоной, который обладает свойством инвариантности для пока еще действующих исследовательских ядерных стендов, например ФС-2, ПС-1 и др.

2. Впервые выработаны рекомендации конверсии исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ» и предложены способы дальнейшего использования части его систем и элементов путем реализации разрабатываемого проекта электроядерной установки под задачи использования нейтронного потока для решения материаловедческих задач и накопления информации для пополнения базы данных в указанной предметной области знаний.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость и ценность работы заключается в:

- получении новых научных данных, необходимых для правильного решения инженерных задач конверсии исследовательских реакторов и стендов, в том числе подкритического стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ»;
- обосновании возможности обеспечить комплексное использование пучка заряженных частиц (с реализацией вариации энергии пучка) вместе с нейтроноактивационным и рентгено-флуоресцентным анализом, что открывает перспективу проводить исследования технологических образцов с использованием обратного резерфордского рассеяния заряженных частиц от поли- и монокристаллических мишеней; проводить исследования с применением мгновенных ядерных реакций типа (p,γ) , (p,α) и др., решать задачи исследования пленочных структур, в том числе при разработке тонкопленочных технологий в энергетике (например, в солнечной энергетике с применением микроморфных покрытий – тонких пленок на основе кремния);
- обосновании целесообразности конверсии исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ», что позволит проводить качественный и количественный анализ изучаемых образцов при разработке и усовершенствовании

нии технологии получения ядерных материалов (нитрид урана из металла и оксидов различной стехиометрии), их переработки и утилизации;

- подготовке технического предложения для создания электроядерной установки на базе выведенного из эксплуатации стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ».

Практическая и научная значимость результатов настоящей диссертации подтверждается разработанными методическими рекомендациями, использованными в ОАО «ВНИИХТ» по обоснованию безопасности вывода из эксплуатации подкритического стенда СО-2М.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные методики конверсии исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ и их обобщение для ликвидации ядерного наследия ИЯУ подобного типа.

2. Разработанные методы, инструментальные средства и технологии для вывода из эксплуатации исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ».

3. Разработанные положения и рекомендации по конверсии исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ» путем его модернизации в новое состояние современной электроядерной установки на основе современных требований безопасности при эксплуатации ОИАЭ.

4. Результаты практического применения методов, инструментальных средств и технологий для вывода из эксплуатации исследовательского ядерного стенда СО-2М ОАО «ВНИИХТ».

5. Результаты конверсии подкритического стенда СО-2М и условия его применения по новому назначению.

Апробация работы

Основные результаты исследований доложены на следующих российских и международных научных конференциях и семинарах: VI Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: правовое и кадровое обеспечение инновационного развития атомной отрасли», Санкт-Петербург, 2011;

XIII, XIV Российское совещание «Безопасность исследовательских ядерных установок России», Дмитровград, 2011, 2012; Конференция «Атомэко-2011», Москва, 2011; Отраслевой семинар-совещание по обсуждению вопросов, связанных с обеспечением безопасности и повышением эффективности использования экспериментальной базы атомной энергетики Госкорпорации «Росатом», Обнинск, 2011; Отраслевой семинар-совещание по вопросам вывода из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла России, Обнинск, 2011; Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва, 2012; Всероссийское рабочее совещание «Торий-2012», Москва, 2012; Конференция «Вывод-2012» в рамках выставки «АтомЭко-2012», Москва, 2012; 10-я Курчатовская молодежная научная школа, Москва, 2012; Конкурс «УМНИК», Москва, НИЦ «Курчатовский институт», 2012.

Публикации по теме диссертации:

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 4 в рецензируемых научно-технических журналах, рекомендованных ВАК.

Достоверность научных результатов и выводов определяется приоритетными публикациями в признанных научных изданиях и публичной апробацией работы на различных научных форумах: конференциях, отраслевых совещаниях, инновационных и инвестиционных комитетах Госкорпорации «Росатом», а также научно-техническими отчетами и методическими рекомендациями фонда ОАО «ВНИИХТ» по обоснованию безопасности вывода из эксплуатации подкритического стенда СО-2М.

Структура. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы, включающий 14 источников, 8 приложений. Общий объем текста диссертации составляет 144 машинописных страниц (с учетом приложений), включая 7 таблиц и 66 рисунков.

Личный вклад автора заключается в совершенствовании методологических положений и пополнении базы знаний, направленных на повышение качества формирования методов и механизмов, важных для устойчивого развития методологии конверсии ОИАЭ в составе промышленных и энергетических предприятий ЯЭК; в разработке комплексного метода оценки эффективности мероприятий по выводу из эксплуатации исследовательской ядерной установки

СО-2М и модернизации производственной площадки ОАО «ВНИИХТ» в разрезе управления внутрифирменной стратегией устойчивого научного и экономического развития научно-исследовательской организации атомной отрасли.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой части диссертации приведен обзор литературы по типам ИЯУ и особенностям планирования, выполнения работ и технологическим ограничениям при их выводе из эксплуатации. Показано, что планирование вывода из эксплуатации ИЯУ требует учета особенностей и проблем, характерных для этого класса ОИАЭ. ИЯУ отличаются большим разнообразием конструкций и условий эксплуатации, обусловленными проводившимися научными исследованиями. На основе выполненных анализов установлено, что для типовой процедуры вывода из эксплуатации ИЯУ в соответствии с современными представлениями о безопасности можно выделить несколько основных этапов:

- комплексное инженерное и радиационное обследование текущего технического состояния и безопасности ИЯУ и детальное описание их результатов в заданном классификационном формате;
- экспертиза результатов обследования, оценок технического состояния и прогнозов безопасности ИЯУ, на основе которых формулируются базовые требования к проекту технического задания для проведения мероприятия по выводу из эксплуатации потенциально ядерно-опасного объекта или его критических компонентов;
- разработка и утверждение в установленном порядке технического задания, выполнение комплекса мероприятий по выводу из эксплуатации ИЯУ, в том числе путем проведения реабилитационных работ по ликвидации негативных последствий использования ядерной установки;
- практическая деятельность по реализации плана мероприятий по выводу из эксплуатации ИЯУ путем проведения диагностических, демонтажных реабилитационных и других работ;

- анализ достигнутых результатов и демонстрация итогов выполнения плана мероприятий по выводу из эксплуатации ИЯУ и проведения реабилитационных работ.

При проведении указанных работ должен использоваться максимально возможный набор качественных инженерных методов и инструментальных средств конверсии ИЯУ. Их выбор, в свою очередь, проводится на базе заранее принятых и апробированных принципах качества, рациональной реализуемости, а также обеспечении радиационной безопасности при ведении конверсионных и реабилитационных работ: обоснования, оптимизации и нормирования. При этом сам процесс выбора должен быть детально задокументирован. К сожалению, нормативно установленной документации для выбора методов и инструментальных средств конверсии ИЯУ с признаками инвариантности относительно их типоразмерного различия пока не существует, каждый раз приходится создавать оригинальную методику с учетом конструктивных особенностей и практического применения на завершающем этапе жизненного цикла конкретного исследовательского стенда или ядерного реактора. В заключении по результатам выполненного анализа уточнена постановка задачи на развитие методов вывода из эксплуатации ядерных установок и их применения на примере исследовательского стенда СО-2М.

В основной части диссертации представлены информационная модель комплексного метода и краткое описание рабочих методов и средств вывода из эксплуатации ИЯУ и методов диагностирования этих установок на примере подкритического стенда СО-2М. Уточнены свод критериев для выбора условий и средств вывода из эксплуатации ИЯУ.

Подкритический стенд (ПКС) СО-2М входил в состав технологического комплекса для проведения нейтронно-активационных аналитических работ при разработках технологий обогащения руд. Производственный комплекс имел биологическую защиту из тяжелого бетона и размещался в отдельно стоящем лабораторном здании. Комплекс включал рудоподготовительное отделение, подкритический стенд СО-2М, пульт управления установкой, рудосортировочное и сортировочное отделения; отделение готовой продукции, отделение контроля процесса и экспресс опробования продуктов сепарации; отделение активационного анализа.

Критическая и потенциально опасная компонентная часть ПКС СО-2М – активная зона с тепловыделяющими элементами в виде урановых дисков, обогащенных до 36% по U-235, диспергированного в полиэтилене. Уровень тепловой мощности активной зоны составлял до 10 Вт. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Физический пуск ПКС СО-2М был проведен летом 1975 г., а в августе 1976 г. весь комплекс введен в эксплуатацию. С февраля 1995 г. в силу физического износа и морального старения оборудования исследовательские работы на установке были прекращены. К 2000 г. проектный ресурс внешних нейтронных источников был полностью исчерпан. ПКС СО-2М был остановлен, и тогда же был дан старт работам по выводу ПКС СО-2М из эксплуатации.

Все работы по выводу из эксплуатации ПКС СО-2М проводились с учетом требований ядерной и радиационной безопасности в соответствии с разработанным специальным проектом производства работ на демонтаж активной зоны подкритического стенда. Основным содержанием работ являлось: демонтаж и перевод в безопасное состояние подкритического стенда, подготовка к транспортировке и транспортировка активной зоны ПКС СО-2М для дальнейшей утилизации.

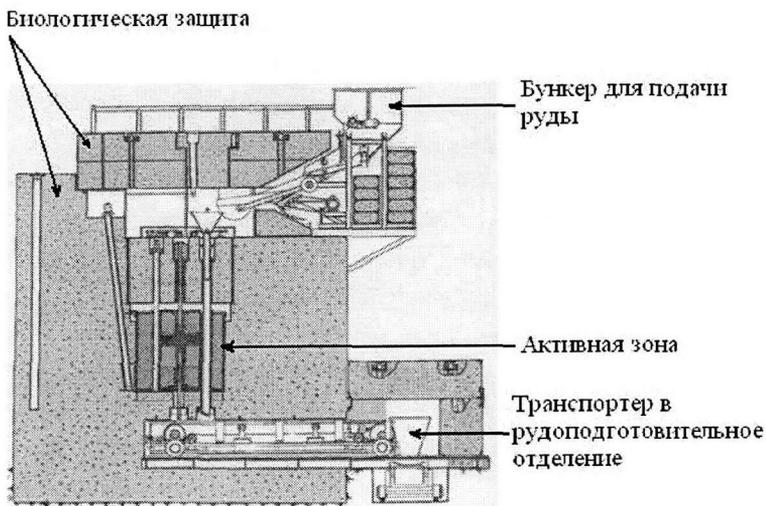


Рис. 1. Технологическая схема ИЯУ СО-2М

В рамках процедуры удаления ядерных материалов из активной зоны ПКС СО-2М был проведен демонтаж технологического оборудования и крышки активной зоны (рис. 2, 3). Извлечен верхний торцевой графитовый отражатель и вместо него загружен вытеснитель из коррозионно-стойкой стали. Произведено поочередное извлечение из активной зоны стержней аварийной защиты и ручного регулирования с кадмиевыми поглотителями, их обрезка и последующее закрепление и фиксация в активной зоне в положении максимальной эффективности. Извлечен корпус активной зоны из блока бокового графитового отражателя, а затем загружен во внутренний пенал транспортного упаковочного комплекта. Процесс выемки активной зоны, все технологические операции, а также последующие работы по загрузке ядерных материалов в спецтранспорт проводились под контролем службы радиационной безопасности предприятия и при непосредственном участии соискателя.

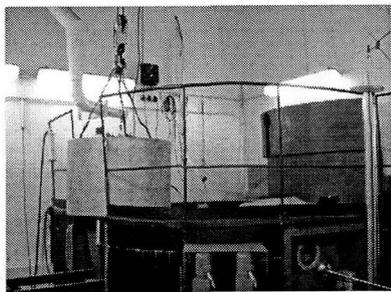


Рис. 2. Снятие
блоков биозащиты

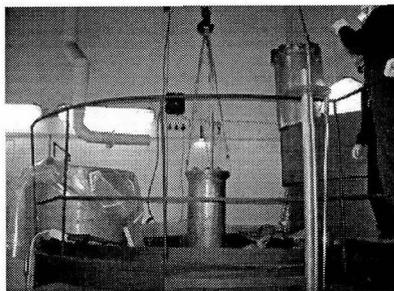


Рис. 3. Подъем корпуса
активной зоны

В рамках реабилитации производственных помещений выводимой из эксплуатации ядерной установки соискателем были выполнены следующие работы:

- обоснована безопасность работ по удалению внешних нейтронных источников из активной зоны ПКС СО-2М и их перегрузке в защитный контейнер. Разработана конструкция защитного контейнера для снижения дозовой нагрузки на персонал и окружающую среду при транспортировке внешних нейтронных источников на захоронение. Отправлены на захоронение в специализиро-

ванную организацию внешние нейтронные источники в специально изготовленном защитном контейнере;

- оптимизирован процесс по реабилитации производственных помещений ПКС СО-2М с применением инструментария «Производственной системы Росатом» (ПСП), что отражено в научно-техническом отчете по обоснованию безопасности проведения реабилитационных работ на ПКС СО-2М от 24.11.2011 г. № 21-02/68. Выполнены сбор и сортировка твердых радиоактивных отходов (графитовый и полиэтиленовый отражатели, стержни СУЗ, экспериментальные устройства и т.д.) по виду (цветные металлы – кадмий и алюминий; сталь, графит; полиэтилен, пластик) и их упаковка в первичную тару (полиэтиленовые или крафт-мешки);

- проведена дезактивация вспомогательного оборудования (экспериментальные каналы, бункер питателя руды, лоток, вибратор) путем максимально возможного удаления радионуклидов с оборудования с применением дезактивирующих средств – растворов с порошком «Защита», смесью кислотных растворов с фторидом аммония и другими;

- определены возможные места и локальные очаги загрязнения рабочих помещений, и проведена их последующая дезактивация.

Общее количество радиоактивных отходов, образовавшихся при выполнении данных работ, составило: жидкие радиоактивные отходы – $0,5 \text{ м}^3 \approx 0,5 \text{ т}$ (низкоактивные водные растворы, образующиеся после проведения дезактивационных мероприятий); твердые радиоактивные отходы – $1,53 \text{ м}^3 \approx 1,26 \text{ тонн}$ (средне- и низкоактивные).

На основании представленного и общего накопленного опыта по выводу из эксплуатации ИЯУ в работе сформулированы научные принципы и положения организации инженерного процесса вывода из эксплуатации и конверсии ИЯУ, базовые критерии и информационная модель практического решения задачи оптимального выбора инженерных методов, технологий и инструментальных средств конверсии исследовательского подкритического стенда СО-2М. В нашем случае научное обеспечение работ по выводу из эксплуатации ИЯУ ориентировано на обоснование реализации следующих главных процессов: создание радиационной защиты для обслуживающего персонала и окружающей среды при демонтаже ядерных стендов; диагностика безопасности и мониторинг радиационной обстановки при проведении работ, в том числе измерительными

устройствами с пороговыми детекторами; фрагментация крупных частей сооружений и оборудования ядерного стенда для последующей их утилизации; извлечение потенциально опасных ядерных материалов и веществ, радиоактивных элементов конструкций ядерных стендов и их фрагментов; сортировка демонтированных конструкций и извлеченных изделий; упаковка демонтированных конструкций их фрагментов и частей в контейнеры, удаление радиоактивных отходов демонтажа в специальные контейнеры, вывоз контейнеров и утилизация их содержимого; дезактивации сооружений и строительных конструкций исследовательского стенда; формирование плана и технического задания конверсии исследовательского стенда, а также предложений по использованию строительных конструкций, вспомогательного оборудования и инфраструктуры по новому назначению. Поэтому основными научными положениями для всех перечисленных процессов является контроль качества работ, соблюдение норм безопасности и охраны труда, окружающей среды, а также приоритетное следование принципам стратегического планирования работ, приемлемости и развития технологий превентивного предупреждения процессов, явлений и факторов техногенного или природного происхождения на всех этапах жизненного цикла ИЯУ. В первую очередь, необходимо применять принципы системного планирования, верификации, постоянного контроля правильности выполнения программы работ по демонтажу и утилизации радиоактивных компонентов исследовательских ядерных стендов. Следует учесть при конверсии ИЯУ обязательное требование – применение апробированных методов и технологий, позволяющих минимизировать время нахождения персонала в зонах проведения радиационно-опасных работ и обеспечить ему необходимую радиационную защиту и безопасность. Основным критерием качества выбора инженерных методов и инструментальных средств конверсии ИЯУ становится минимизация дозовой нагрузки на персонал при выполнении комплекса практических работ по выводу установок из эксплуатации до такого уровня, который разумно достижим с учетом экономических и социальных факторов (критерий оценки минимизации вредного воздействия ионизирующей радиации ALARA). Поэтому становится важным уточнить и улучшить методики расчета дозовых нагрузок, применяемых при выводе из эксплуатации подкритического стенда СО-2М.

В нашем случае конверсии подкритического стенда СО-2М для оценки гамма-излучения, воздействующего на персонал при демонтаже его активной зоны,

по инженерным методикам и по программе МНСР, были проведены расчёты мощности эквивалентной дозы (МЭД) над активной зоной при отсутствии верхнего бетонного блока защиты. До удаления верхней бетонной защиты мощность дозы соответствовала фону в помещении 0,1 – 0,2 мкЗв/ч. После удаления верхней защиты МЭД гамма-излучения от активной зоны на срезе бетонной защиты составляла 0,3 мкЗв/ч. Таким образом, все работы до извлечения активной зоны выполнялись при МЭД не более 0,3 мкЗв/ч.

Также был проведен расчет МЭД гамма-излучения вокруг корпуса активной зоны в воздухе после её извлечения из ПКС. Максимальные значения МЭД – около боковой поверхности корпуса напротив центра активной зоны. На расстоянии 0,1 м от корпуса МЭД составила 340 мкЗв/ч, а на 1 м – 15 мкЗв/ч. Активная зона после извлечения была помещена в первичную ёмкость транспортного контейнера, а затем удалена из помещения. Даже при консервативной оценке, что трудоёмкость аналогичной работы может составить 10 чел. часов, коллективная доза облучения не превысит 1 мЗв/чел.

Внутреннее облучение персонала не рассматривалось, так как вероятность образования и выброса радиоактивных аэрозолей отсутствует.

Для отправки закрытых нейтронных источников (Cf-252, 2 шт.) в ГУП МосНПО «Радон» спецтранспортом необходимо было подготовить защитный контейнер, размеры которого ограничиваются размерами емкости в спецтранспорте (550×860 мм). При помощи метода длин релаксации была определена толщина защитного слоя транспортного контейнера для обеспечения предельно допустимой МЭД на поверхности.

Верификация методик расчета дозовых нагрузок при демонтаже активной зоны и удалении внешних нейтронных источников показала, что полученные значения мощности дозы ионизирующего излучения в процессе работ по выводу из эксплуатации совпадают с расчетными в пределах 20 % погрешности. Таким образом, результаты расчета определили возможность формирования типовой методики выбора инженерных методов и инструментальных средств конверсии ИЯУ. Эта методика в нашем случае представляет собой перечень приемов и порядок выполнения технико-технологических процессов и конкретных процедур конверсии ПКС СО-2М.

В рамках данной работы рассматривались методики подбора наиболее приемлемых методов конверсии ПКС СО-2М без детализации и полного процесс-

ного описания. Следует отметить, что в период длительной эксплуатации стенда уже была сформирована база данных о различных событиях, которые необходимо было учитывать при выборе информационных и инструментальных средств конверсии исследовательского стенда. Выбираемые средства также необходимо было оценивать и с точки зрения обеспечения безопасности будущей конверсионной ИЯУ. Барьеры безопасности новой конверсионной установки было предложено формировать так, чтобы минимизировать влияние опасных природных и техногенных воздействий, деградации служебных свойств, развития дефектов, а также ошибок, связанных с человеческим фактором, на качество проведения будущих научных исследований на вновь создаваемом экспериментальном ядерном стенде. Отбор инструментальных средств в нашем случае проводился на основе научных принципов: независимости, взаимного дополнения, частичного дублирования и разнообразия, функциональной полноты и приемлемой достаточности.

В заключительной части диссертации приведены основные тезисы предложений по конверсии выведенного из эксплуатации подкритического стенда СО-2М.

После вывода из эксплуатации опытно-промышленной ИЯУ СО-2М предложено создать исследовательский реактор нового поколения с повышенным уровнем безопасности, состоящий из системы подкритического стенда и ускорителя протонов.

Модернизация производственных площадей ИЯУ СО-2М предполагает увеличение в 1000 раз мощности (с 10 Вт до 10 кВт) активной зоны. В связи с этим была проведена оценка радиационной обстановки за защитной композицией в новых условиях. На основании расчетов получено, что имеющаяся защитная композиция не обеспечивает выполнения требований по радиационной безопасности персонала, а в условиях более высоких уровней мощности активной зоны ИЯУ СО-2М требует соответствующей модернизации.

В результате того, что предполагается использование биологической защиты выведенной из эксплуатации установки ПКС СО-2М, к компонентам электроядерной установки выдвигаются следующие основные требования: мощность установки –10 кВт; плотность потока тепловых и эпитепловых нейтронов в экспериментальных каналах должна быть не менее $5 \cdot 10^9$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; удельное

объемное энерговыделение $qV = 221 \text{ кВт/м}^3$; эффективный коэффициент размножения $K_{\text{эфф}} = 0,998$.

Требования к ускорителю протонов: энергия пучка протонов на выходе – 5 МэВ; ток пучка (средний) – 3 мкА; ток пучка (импульсный) – 30 мА; длительность импульса – 100 мкс; частота повторения – 1 Гц; охлаждение резонаторов ускорителя – воздушно/водяное; система транспортировки при высокой энергии с возможностью разводки пучка на два канала.

Для конверсии ИЯУ СО-2М в электроядерную установку проведена оценка энерго- и водопотребления, уточнение требований к системе спецвентиляции и оценка требований к промышленным помещениям выведенного из эксплуатации подкритического стенда:

- энергопотребление: система управления защитой – 12 кВт, освещение – 1 кВт, вентиляция – 40 кВт, ускоритель протонов – 150 кВт, ускоритель протонов на этапе монтажа – 500 кВт;
- водопотребление: бытовые нужды – 4 м³/сут., охлаждение инженерных узлов и систем ускорителя – 15 – 20 м³/сут.;
- и другие показатели.

Для оценки рентабельности и получения необходимого финансирования на разработки был инициирован инвестиционный проект «Исследовательская ядерная установка нового поколения с повышенным уровнем безопасности для использования в медицине и разработки новых промышленных технологий». Стоимость проекта в ценах 2013 года составила 414,1 млн. руб. со сроком окупаемости в 34 года. В рамках расчета финансовых показателей рассматривались два сценария развития событий: базовый и оптимистический. Как базовый, так и оптимистический сценарии требуют финансирования на создание исследовательской установки в первые 4 года.

Ключевыми факторами успеха базового сценария проекта с момента строительства и в течение 34 лет являются:

- проведение активационного анализа и нейтронной радиографии в рамках центра коллективного пользования. Предположительное число проведения анализов составит 5 000 анализов в год с равномерным увеличением их количества до 34 000 анализов в год к последнему году.;
- наработка короткоживущих радионуклидов для радиационной диагностики онкологических заболеваний. Загрузка производства будет проходить в 2 сме-

ны в день, 22 дня в месяц. Средняя производительность будет составлять 0,57 Ки/сут.

Оптимистический сценарий проекта позволит увеличить эффект в 3 раза до 641 368 тыс. руб. за счет: проведения активационного анализа и нейтронной радиодиагностики; наработки короткоживущих радиоизотопов для радиационной диагностики онкологических заболеваний; проведения операций по нейтронной и нейтронозахватной терапии. На рис. 5 отражен суммарный чистый дисконтированный доход по двум сценариям (с учетом отчислений Государственной Корпорации «Росатом» – 7%, и создание резервного фонда на проведение ремонта и реновации ИЯУ – 5%) с 2016 по 2045 годы (нарастающим итогом). Соответственно, по базовому сценарию общий объем чистой прибыли к 2045 году достигает 542 396 тыс.руб. При оптимистическом – 984 494 тыс. руб.

Дисконтированный срок окупаемости (срок окупаемости вложенных инвестиций с учетом момента времени) по базовому сценарию составляет 20,8 лет, по оптимистическому – 14,5 лет.

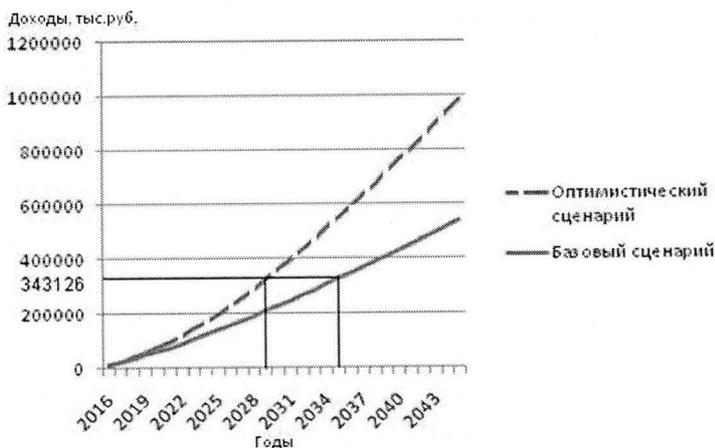


Рис. 5. Суммарный чистый дисконтированный доход по оптимистическому и базовому сценарию

Для дальнейшей подготовки проекта конверсии ИЯУ СО-2М проведена оценка оптимального инструмента для расчета мишенной ускорителя протонов

компактной электроядерной установки с энергией выхода протонов ускорителя менее 5 – 10 МэВ. Был выбран программный комплекс Geant4 – универсальный и общедоступный продукт, разработанный для решения широкого спектра задач в области физики элементарных частиц, радиационной медицины и астрофизике.

В качестве материала мишени были использованы цельнометаллические пластины тория, нептуния, свинца, лития и бериллия. При моделировании мишеней из тяжелых материалов с энергией протонов в диапазоне до 100 МэВ получено, что преобладающими процессами взаимодействия протонов с ядрами мишени являются рассеяние протонов и ионизация материала мишени, но не (p,n) -реакция.

Моделирование мишени из материалов с небольшим атомным весом также показало отсутствие (p,n) -реакции, что полностью противоречит аналогичному исследованию, проведенным Сибирским отделением ИЯФ РАН им. Г.И. Будкера (табл. 1).

Таблица 1. Выход нейтронов при облучении мишени из Ве-9 протонами различной энергии

Энергия протонов, МэВ	Число историй	Выход нейтронов на один протон	
		Geant4	Результаты работы Сибирского отделения ИЯФ РАН им. Г.И. Будкера
		нейтрон на 1 протон	нейтрон на 1 протон
2,2	$1 \cdot 10^7$	0	$1,6 \cdot 10^{-6}$
2,5	$1 \cdot 10^7$	0	$9,6 \cdot 10^{-6}$
3	$1 \cdot 10^7$	0	$4,8 \cdot 10^{-5}$

На этапе верификации данной вычислительной программы была получена информация, что на данный момент модели взаимодействия протонов с веществом не способны адекватно функционировать при входных энергиях ниже, чем 100 МэВ, что в настоящее время объясняется недоработкой моделей адрон-ядерных взаимодействий, используемых в Geant4. Ожидаемые и возможные ошибки при верификационном применении программного комплекса Geant4 потребовали создания новых вариантов различных математических моделей,

удовлетворяющих условиям настоящей цели конверсии ИЯУ. Для этого стал использоваться универсальный и общедоступный программный комплекс MCNPX, являющийся сочетанием транспортного кода MCNP с программой Lahet.

На основании созданных оригинальных расчетных моделей для условий конверсии ИЯУ СО-2М установлено соответствие выхода нейтронов на один протон источника энергией 2,2 МэВ, 2,5 МэВ и 3 МэВ для мишеней из Li-7 и Be-9 с результатами исследовательской работы, выполненной Сибирским отделением ИЯФ РАН им. Г.И. Будкера (табл. 2).

В результате расчета были определены следующие параметры для мишеней из Li-7 и Be-9 (табл. 3):

- выход нейтронов на один протон (на 1 мкКл) источника;
- выход нейтронов за 1 с при облучении мишени пучком протонов с током пучка 3 мкА (стационарный режим);
- выход нейтронов за 100 мкс при облучении мишени пучком протонов с током пучка 30 мА (импульсный режим).

Таблица 2. Выход нейтронов при облучении мишени из Li-7, Be-9 протонами различной энергии

Энергия протонов, МэВ	Число историй (nps)	Выход нейтронов на один протон				Погрешность, %
		MCNPX 2.6.0		Результаты работы Сибирского отделения ИЯФ РАН им. Г.И. Будкера		
		n/p	1/мкКл	n/p	1/мкКл	
Li-7						
2,2	$1 \cdot 10^7$	$7,08 \cdot 10^{-5}$	$4,425 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^8$	11,5
2,5	$1 \cdot 10^7$	$1,671 \cdot 10^{-4}$	$1,044 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^9$	4,4
3	$1 \cdot 10^7$	$3,005 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^9$	$2,88 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^9$	4,4
Be-9						
2,2	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,625 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$	37,5
2,5	$1 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$6,06 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^7$	1,04
3	$1 \cdot 10^7$	$5,03 \cdot 10^{-5}$	$3,14 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^8$	4,78

Таблица 3. Выход нейтронов при облучении мишеней из Li-7 и Be-9 протонами с энергии 5МэВ

Тип мишени	Выход нейтронов		Выход нейтронов за 1с при токе пучка 3мкА (стационарный режим)	Выход нейтронов за 100мкс (1 импульс) при токе пучка 30МА (импульсный режим)	Средняя энергия нейтронов
	п/р	1/мкКл	н/с	нейтрон	МэВ
Li-7	$1,198 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^9$	$2,27 \cdot 10^{10}$	$2,27 \cdot 10^{10}$	1,982
Be-9	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$6,06 \cdot 10^7$	$9,245 \cdot 10^9$	$9,245 \cdot 10^9$	0,676

Помимо этого, исследовано распределение получаемых на мишени нейтронов по энергии. Рассмотрено энергетическое распределение в интервале от 0 до 10 МэВ и показано, что выход нейтронов на мишени из лития по сравнению с мишенью из бериллия больше, поэтому использовать ее предпочтительнее.

Мощность генерации нейтронов на мишени из лития площадью $12,56 \text{ мм}^2$ составляет $2,27 \cdot 10^{10}$ н/с, из бериллия той же площади – $9,245 \cdot 10^9$ н/с. Средняя энергия нейтронов для мишени из лития – 2 МэВ, для бериллия – 0,676 МэВ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проанализированы методы и средства вывода из эксплуатации исследовательских ядерных установок в России и за рубежом. Сформулирована концепция и обоснованы пути развития методов вывода из эксплуатации ядерных установок на примере исследовательского стенда СО-2М.

2. Разработаны оригинальные методы и средства диагностирования и вывода из эксплуатации ИЯУ на примере подкритического стенда СО-2М, включая новые методики расчета дозовых нагрузок на персонал в процессе работ по выгрузке ядерного топлива из активной зоны и реабилитации производственных помещений в процессе вывода из эксплуатации подкритического стенда СО-2М, новую обобщенную типовую информационную модель по выводу из эксплуатации ИЯУ.

3. Выполнены практические работы по диагностированию, демонтажу и перегрузке активной зоны подкритического стенда, по перегрузке внешних нейтронных источников, дезактивации, удалению радиоактивных отходов и реабилитации на производственных площадях подкритического стенда СО-2М.

4. Разработаны методики модернизации и предложения по конверсии ИЯУ на примере подкритического стенда СО-2М.

5. Разработан и апробирован инвестиционный проект по созданию ИЯУ нового поколения с повышенным уровнем безопасности на производственной площадке ОАО «ВНИИХТ».

6. На основе проведенной работы выпущены научно-технические отчеты (рег. №№ ТИ/4395 от 01.09.2009 г., ТИ/4811 от 24.11.2011 г.) и методические рекомендации по обоснованию безопасности работ по выводу из эксплуатации подкритического стенда СО-2М, вошедшие в фонд технической библиотеки ОАО «ВНИИХТ» (рег. № 21-03/41-1 от 01.12.2011 г.).

Основные публикации по теме диссертации

1. Гирченко А.А., Матюшин А.П., Кудрявцев Е.М., Скопин В.П., Щепелев Р.М. Вывод из эксплуатации подкритического стенда СО-2М на производственной площадке ОАО «ВНИИХТ». – Журнал «Вестник НИЯУ МИФИ», 2013, т. 2, № 4, с. 470 – 475.
2. Гирченко А.А., Матюшин А.П., Кудрявцев Е.М., Тюрина Е.С., Щепелев Р.М. Создание исследовательской ядерной установки нового поколения. – Журнал «Вестник НИЯУ МИФИ», 2013, т. 2, № 4, с. 476 – 479.
3. Гирченко А.А., Кудрявцев Е.М., Щепелев Р.М. Обращение с уран-ториевым топливом на стадии его изготовления. – Журнал «Вестник НИЯУ МИФИ», 2014, т. 3, № 1, с. 97 – 100.
4. Гирченко А.А., Кудрявцев Е.М., Матюшин А.П., Родионова А.И., Скопин В.П., Тюрина Е.С., Щепелев Р.М. Вывод из эксплуатации подкритического стенда СО-2М. – Атомная энергия, 2014, т. 116, вып. 2, с. 115 – 117.
5. Матюшин А.П., Кудрявцев В.В., Сарычев Г.А., Щепелев Р.М. Вывод из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов ОАО «ВНИИХТ». – Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2011, № 3, с. 78 – 81.
6. Матюшин А.П., Кудрявцев Е.М., Сарычев Г.А., Щепелев Р.М. и др. Создание исследовательской ядерной установки нового поколения с повышенным уровнем безопасности для наработки изотопов, использования в медицине и разработки новых промышленных технологий. – Атомная стратегия, 2011, № 67, с. 12 – 13.
7. Матюшин А.П., Кудрявцев В.В., Сарычев Г.А., Щепелев Р.М. Участие ОАО «ВНИИХТ» в ФЦП «Ядерная и радиационная безопасность России». – Ядерная и радиационная безопасность России, 2011, № 11, с. 92 – 110.
8. Кудрявцев В.В., Кольцов В.Ю., Матюшин А.П., Щепелев Р.М. и др. Участие ОАО «ВНИИХТ» в реализации ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». – Ядерная и радиационная безопасность России, 2012, № 12, с. 121 – 138.

Подписано в печать: 25.06.2014

Заказ № 10089 Тираж - 120 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru