Скворцов Александр Иванович. Обращение с радиоактивными отходами при выводе из эксплуатации реактора на быстрых нейтронах : диссертация... кандидата технических наук : 05.14.03 Санкт-Петербург, 2007 182 с. РГБ ОД, 61:07-5/2423

Федеральное государственное унитарное предприятие  
**"Головной институт "Всероссийский проектный и научно-  
исследовательский институт комплексной энергетической технологии"**

На правах рукописи



СКВОРЦОВ Александр Иванович

**ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ  
ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА  
НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор Н.И.Ампелогова

Санкт-Петербург - 2007

**СОДЕРЖАНИЕ**

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 5**

[**ВВЕДЕНИЕ 7**](#bookmark1)

[**ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 13**](#bookmark3)

1. Характеристика реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим

НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ 13

1. [Основные положения и опыт вывода из эксплуатации АЭС 19](#bookmark5)

[**ГЛАВА 2 ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ НА АЭС 24**](#bookmark6)

* 1. [Обращение с жидкими радиоактивными отходами 24](#bookmark7)
     1. [***Характеристика основных способов переработки ЖРО*** ***26***](#bookmark9)
     2. [***Сорбционные методы очистки жидких радиоактивных отходов*** ***29***](#bookmark10)
     3. [***Отверждение ЖРО*** ***31***](#bookmark11)
  2. [Способы обращения с твердыми радиоактивными отходами 33](#bookmark12)
     1. [***Требования к обращению с ТРО*** ***33***](#bookmark13)
     2. [***Характеристика методов переработки ТРО*** ***35***](#bookmark14)
  3. [Заключение. Формулировка задач работы 38](#bookmark15)

**ГЛАВА 3 ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ**

**ОТХОДОВ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 42**

1. Характеристика жидких радиоактивных отходов, накопленных за период

ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 42

1. Жидкие радиоактивные отходы, образующиеся на 1-м этапе вывода РУ БН из

ЭКСПЛУАТАЦИИ 46

1. Характеристика твердых радиоактивных отходов, накопленных за время

ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН 46

1. ***Характеристика ТРО, находящихся на хранении в инженерных сооружениях***

***хранилигца и здании реактора*** ***47***

1. [***Классификация ТРО, накопленных в период эксплуатации РУ БН.*** ***50***](#bookmark17)
2. Оценка массы и состава ТРО, образующихся на первом этапе ВиЭ

[реактора БН 52](#bookmark19)

1. Сравнительный анализ объемов и характеристик радиоактивных отходов

РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 55.

[**ГЛАВА 4 МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 67**](#bookmark33)

**ГЛАВА 5 ОБРАЩЕНИЕ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 85**

* 1. **Выбор и обоснование технологии переработки неорганических жидких**

РАДИОАКТИВНЫХ отходов **85**

* 1. **Разработка технологии переработки жидких неорганических радиоактивных**

ОТХОДОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ **96**

* 1. [**Технико-экономическая оценка стоимости переработки ЖРО 107**](#bookmark25)

**ГЛАВА 6 ОБРАЩЕНИЕ С НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫМИ ТВЕРДЫМИ**

**РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 110**

1. **Технология извлечения ТРО из траншейных хранилищ 110**
2. **Основные технологии обращения с ТРО и оборудование для сортировки,**

КОМПАКТИРОВАНИЯ И УПАКОВКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ **118**

1. [**Упаковка твердых радиоактивных отходов в контейнеры НЗК 121**](#bookmark28)
2. [**Характеристика хранилищ упаковок кондиционированных РАО 125**](#bookmark29)
3. **Радиационная и экологическая безопасность обращения с РАО при выводе из**

ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ **127**

1. [***Радиационная безопасность при обращении с ЖРО и ТРО*** ***129***](#bookmark31)
2. [***Выбросы радиоактивных газов и аэрозолей, вторичные РАО*** ***131***](#bookmark32)
3. **Обращение со специфическими твердыми радиоактивными отходами при выводе**

ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ **133**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 145**

[**ВЫВОДЫ 150**](#bookmark38)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 152**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1 СХЕМА УСТАНОВКИ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ 169**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2 СХЕМА УСТАНОВКИ КОНДИЦИНИРОВАНИЯ СОЛЕВОГО**

**РАСТВОРА 171**

[**ПРИЛОЖЕНИЕ 3 СХЕМА УСТАНОВКИ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ 173**](#bookmark39)

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4 ПЛАН КОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНИЛИЩА 175**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА СОРТИРОВКИ**

**ТРО 177**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ.. 179**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 7 АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ 181**

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

атомная электрическая станция бассейн выдержки реактор на быстрых нейтронах высокоактивные отходы вывод из эксплуатации допустимая объемная активность жидкий радиоактивный концентрат жидкие радиоактивные отходы источник ионизирующих излучений коллективная доза облучения















































комплексное инженерно-радиационное обследование коэффициент использования установленной мощности контур многократной принудительной циркуляции комплекс переработки ЖРО комплекс переработки ТРО

малогабаритный адсорбер для выведения радионуклидов из натриевого теплоносителя Мангистауский Атомэнергокомбинат минимально значимый уровень активности МОХ-топливо - смешанное уран-плутониевое топливо металлические радиоактивные отходы низко-активные отходы

нормативная (нормативно-техническая) документация невозвратный защитный контейнер никель-железо-ферроцианидный адсорбент сорбент на основе ферроцианида никеля и железа научно-исследовательская работа отработавшее ядерное топливоотработавшие тепловыделяющие сборки

поверхностно-активные вещества

отвс







пмс























хло







поливинилхлорид

продукты коррозии

пеногасители

полифункциональная комплексная добавка (при цементировании) радиоактивное вещество радиоактивные отходы реактор быстронейтронный радионуклидный источник радиоизотопный электрогенератор реакторная установка среднеактивные отходы система радиационного контроля система управления и защиты средства индивидуальной защиты турбогенератор

твердые радиоактивные отходы уровень вмешательства установка ионоселективной очистки фильтр-контейнер

хранилище жидких радиоактивных отходов холодная ловушка оксидов химическое поглощение кислорода хранилище твердых радиоактивных отходов центральный зал

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность работы определяется Федеральной целевой программой "Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007-2010 гг. и на перспективу до 2015 г.", утвержденной Постановлением Правительства РФ от 06.10.2006 г. №605. С целью развития инновационных технологий атомной энергетики программа предусматривает продолжение строительства блока №4 Белоярской АЭС с реактором БН-800 и ввод его в эксплуатацию в 2012 г. Опытный реактор БН-800 предназначен для отработки технологии замкнутого ядерного топливного цикла с использованием смешанного уран-плутониевого (МОКС) топлива. Планируется также выполнение обоснования проекта энерго­блока с реактором БН-1800. Развитие технологий с реакторами БН укрепляет лидерство России в этом направлении атомной энергетики.

Однако в проектах первого поколения отечественных реакторов БН дей­ствовавшими в то время нормами требования к выводу реакторной установки из эксплуатации и созданию комплексов переработки и кондиционирования ра­диоактивных отходов не предусматривались. Федеральная программа рассмат­ривает создание мощностей по обращению с радиоактивными отходами и под­готовку к выводу из эксплуатации энергоблоков АЭС как важные задачи со­вершенствования атомного энергопромышленного комплекса. Для разработки проектов вывода из эксплуатации конкретных блоков АЭС необходимы ин­формационно-аналитическое обеспечение и исходные данные. Таким образом, анализ объемов и состава, методология обращения с радиоактивными отходами (РАО) и разработка технологий переработки и кондиционирования жидких и твердых РАО при выводе из эксплуатации реактора БН приобретают важней­шее значение для отечественной атомной энергетики.

В мировой практике опыт вывода из эксплуатации промышленных реак­торов на быстрых нейтронах и комплексной переработки больших объемов РАО, в том числе жидкометаллического натрия, незначителен.- Всего в мире эксплуатировались 9 экспериментальных реакторов-бридеров (6 из них оста­новлены) и 8 энергетических реакторов (остановлены 6). В настоящее время в Европе находятся в эксплуатации только 2 реактора БН: БН-600 и "Феникс". Сооружение реакторов БН средней мощности с натриевым теплоносителем предполагается в Японии, Индии и Китае. Остановленные реакторные установ­ки в основном законсервированы и хранятся под наблюдением. Переработка отработанного натриевого теплоносителя проводилась в ограниченных мас­штабах на экспериментальных установках. Следовательно, разработанная ме­тодология обращения с РАО и технологии переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и твердых радиоактивных отходов (ТРО) на примере вывода из эксплуатации (ВиЭ) реактора БН-350 будут являться прототипами для обраще­ния с РАО энергетических реакторов БН, охлаждаемых жидким натрием, на­пример, БН-600, БН-800, БН-1800, и могут быть использованы на действующих АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, а также в проектах новых энергоблоков.

Целью диссертационной работы является решение научно-технической проблемы, заключающейся в разработке методологии обращения с радиоактив­ными отходами при выводе из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах (на примере БН-350), обеспечивающей приведение РАО в безопасное состояние за счет снижения их объемов и кондиционирования в формы, пригодные для длительного хранения, а также экономичность переработки. Для достижения цели ставятся следующие задачи:

* разработка программы проведения комплекса научных исследова­ний, отработки методологии обращения с РАО и технологий их переработки и кондиционирования;
* анализ объемов, состава и уровня активности РАО, накопленных при эксплуатации и образующихся при ВиЭ реактора БН; разработка классифика­ции РАО по их уровню активности, физико-химической природе, способам пе­реработки и хранения;
* составление материального баланса перерабатываемых ЖРО, низко- и среднеактивных ТРО по объемам и типам отходов;
* проведение сравнения характеристик РАО реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, оценка особенностей РАО реакторов БН;
* разработка методологии обращения с РАО разных категорий по активности и физико-химическим характеристикам при выводе из эксплуатации реактора БН;
* разработка безопасной технологии извлечения ТРО из траншей;
* разработка комплекса эффективных и безопасных технологий перера­ботки и кондиционирования ЖРО, ТРО и жидкометаллического натриевого те­плоносителя реакторов БН.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

* на основе впервые выполненного анализа объемов, состава и уровня активности радиоактивных отходов реактора БН (на примере БН-350) и разра­ботанной классификации установлено, что в составе ТРО преобладают низко­активные отходы (НАО) (>70%), высокоактивные составляют 3-4%. Основная часть (80-82%) низко- и среднеактивных ТРО находится в траншейных храни­лищах. Декантаты и шламы неорганической природы составляют -70% сум­марного объема ЖРО. Объем РАО на 1-м этапе ВиЭ реактора БН - 18000 м3, из них ЖРО - 4000 м3; суммарная гамма-активность - 2,4.1015 Бк, основной ра­дионуклид - 137Cs;
* сравнение характеристик РАО реакторов на тепловых и быстрых нейтронах показало, что состав и уровни активности РАО аналогичны. Опреде­лены особенности РАО реакторов БН: объем ЖРО в 2-2,5 раза ниже, ТРО - в 1,5-3 раза выше, чем на реакторах ВВЭР; специфические ТРО реакторов БН - жидкометаллический натриевый теплоноситель, ловушки и адсорберы, содер­жащие натрий;
* составлены материальные балансы перерабатываемых ЖРО и ТРО по их объемам, типам, уровню активности, способам обращения.
* ' разработана методология обращения с РАО, в том числе с жидкоме­таллическим натрием, при ВиЭ реактора на быстрых нейтронах, включающая последовательность переработки РАО разных категорий и типов, обоснование необходимости извлечения и переработки низко- и среднеактивных ТРО из траншей и критериев выбора технологий переработки РАО, экономическое обоснование выбора способа компактирования и технологий переработки низ­коактивных ТРО; обоснование экологически безопасной технологии удаления и кондиционирования металлического натрия;

- разработана новая технология извлечения ТРО из траншей с лока­лизацией радиоактивных загрязнений.

**Достоверность** научных положений и технологических разработок бази­руется на использовании методов научного анализа и обобщения, статистиче­ской обработки данных; на нормативных документах по обращению с радиоак­тивными отходами, радиационной и экологической безопасности, охране окру­жающей среды и защите населения и персонала; подтверждена эффективно­стью предложенных методов и технологий, их апробацией и результатами ис­пытаний. '

**Практическая ценность работы.**

Разработанная методология обращения с РАО, выполненный анализ со­става и уровня активности РАО, их классификация и материальный баланс яв­ляются существенным вкладом в информационно-аналитическое обеспечение и подготовку исходных данных для разработки проектов ВиЭ и обращения с РАО реакторов БН. Предложенные технологии переработки и кондиционирования ЖРО, низко- и среднеактивных ТРО реактора БН обеспечивают сокращение их объемов в 2-5 раз с получением конечных нерадиоактивных продуктов и упа­ковок РАО, пригодных для длительного хранения. Новая технология извлече­ния ТРО из траншей представляет интерес для решения проблемы ликвидации "исторических" траншейных хранилищ. Методология обращения с РАО и ком­плекс технологий их переработки внедрены в проекты комплексов переработки ЖРО и ТРО БН-350 и хранилища твердых и отвержденных -РАО и могут быть использованы на реакторах БН-600, БН-800 и т.п. и АЭС с водоохлаждаемыми реакторами как при эксплуатации, так и при ВиЭ, а также в проектах новых энергоблоков.

Личный вклад автора включает составление программы научных ис­следований, технологических и проектно-конструкторских разработок по об­ращению с РАО применительно к энергетическим установкам с реакторами БЫ и разработку методологии обращения с РАО при ВиЭ реакторов БН. Автор разработал классификацию и составил материальные балансы РАО; экономиче­ски обосновал технологию компактирования ТРО; предложил комплекс техно­логии переработки жидких и твердых РАО; обосновал необходимость извлече­ния ТРО из траншей и разработал для этой операции новую технологию; дис­сертант выполнил сравнительный анализ РАО реакторов на тепловых и быст­рых нейтронах.

На защиту выносятся:

* характеристики объемов, состава, уровня активности ЖРО и ТРО, классификация РАО реактора БН по их активности, физико-химическим свой­ствам, способам переработки и хранения; материальные балансы ЖРО и ТРО;
* результаты сравнения характеристик РАО реакторов на тепловых и быстрых нейтронах и оценки особенностей РАО реакторов БН;
* методология обращения с РАО различных типов и категорий ак­тивности; •
* обоснование необходимости извлечения и переработки ТРО из траншейных хранилищ и новая технология их извлечения;
* комплекс технологий переработки жидких и твердых низко- и сред­неактивных отходов и жидкометаллического натриевого теплоносителя реакто­ра БН.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доклады­вались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и совещаниях:

* Международном семинаре по выводу из эксплуатации реактора БН- 350 (г.Алматы, ЦБЯТ, июль 2000);
* 4-й Международной конференции "Радиационная безопасность: экология атомной энергетики" (Санкт-Петербург, сентябрь 2001);
* Международном совещании по разработке проекта КП ЖРО РУ БН- 350 (Санкт-Петербург, январь 2002);
* Форуме "Ядерные энергетические технологии с реакторами на бы­стрых нейтронах" (г.Обнинск, ГНЦ ФЭИ, декабрь 2003);
* Международных совещаниях по проектированию КП ЖРО и ТРО РУ БН-350(г.Актау,май 2004; Санкт-Петербург, июль 2005);
* VIII Международной конференции "Безопасность ядерных техноло­гий: экономика безопасности и обращение с источниками ионизирующих излу- чений"(Санкт-Петербург, сентябрь 2005);
* Международном техническом совещании по проекту КП ЖРО РУ БН-350, (ЗАО "МЭТР", Москва, сентябрь 2005).

По теме диссертации опубликовано 5 статей, 2 тезиса докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов и 7 приложений, изложена на 168 страницах основ­ного текста, содержит 22 рис., 39 табл. Список литературы включает 165 на­именований.

**выводы**

1. Впервые выполнен анализ объемов, состава и уровней активности РАО, накопленных в течение эксплуатации реактора БН (на примере БН-350), пред­ложена классификация их по уровню активности, физико-химической природе, способам переработки и хранения. Установлено, что объем ЖРО составляет

Л

-2750 м , из них ЖРО и шламы неорганического типа составляют -70%; сум­марная гамма-активность - 3,4-1014 Бк.

Объем накопленных ТРО -13000 м3, активность - 1,9\*1015Бк; низкоактив­ные ТРО составляют >70%, высокоактивные - 3-4% и около 93% по активно­сти. Основная часть низко- и среднеактивных ТРО (80-82%) хранится в тран­шеях, не соответствующих современным нормативным требованиям.

1. Выполнен сравнительный анализ характеристик РАО, образующихся при эксплуатации реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. Показано, что составы ЖРО и ТРО и уровни их активности практически одинаковы. Установ­лено, что объем ЖРО на реакторах БН в 2-2,5 раза ниже, объем ТРО - в 1,5-3 раза выше, чем на реакторах ВВЭР; специфические отходы реакторов БН - жидкометаллический теплоноситель - натрий и специальное оборудование (ад­сорберы, ловушки), содержащее металлический натрий.
2. Составлены материальные балансы перерабатываемых ЖРО, низко- и среднеактивных ТРО по их объемам, типам, уровню активности, способам пе­реработки с целью сокращения объемов РАО и разделения их на группы по способам переработки, оценки масштабов переработки.
3. Разработана методология обращения с РАО, в том числе с жидкометал­лическим натрием, при ВиЭ реактора на быстрых нейтронах (на примере БН- 350): определена очередность переработки РАО разных категорий и типов; обоснована необходимость извлечения и переработки ТРО из траншей; эконо­мически обоснована технология компактирования низкоактивных ТРО.
4. Предложена технология переработки ЖРО и шламов, включающая озонирование декантатов, фильтрацию осадков, ионоселективную очистку фильтратов от радионуклидов цезия, выпаривание очищенного фильтрата до сухих солей, цементирование шламов и осадков. Опытная проверка технологии показала, что конечный продукт- 9,2 м сорбента - содержит ~97% суммарной активности. В целом, объем перерабатываемых ЖРО сокращается в 5 раз, с учетом объема упаковки сорбента и отвержденных шламов - в 2 раза.
5. Предложен комплекс технологий переработки и кондиционирования низко- и среднеактивных ТРО. Разработана новая технология извлечения ТРО из траншейных хранилищ. Предложена транспортно-технологическая схема обращения с ТРО, включающая сортировку, фрагментацию, прессование и упа­ковку ТРО в контейнеры типа НЗК. Объем ТРО сокращается в 3,8 раза, с уче­том объема упаковок - в 2 раза. Кондиционирование металлического натрия превращением его в щелочь NaOH и иммобилизацией в виде геоцементного камня увеличивает объем радиоактивных отходов натрия в 2 раза.

Разработанная методология обращения с РАО реактора БН и комплекс технологий переработки и кондиционирования РАО внедрены в проекты ком­плексов переработки жидких и твердых РАО реактора БН-350 и хранилища для безопасного длительного хранения (50 лет) твердых и отвержденных РАО.