

УМЕНЬШЕНИЕ ЗАПАСОВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОУ В ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

Игорь Матвеевко, Валерий Поплавко, и Геннадий Пшакин

АННОТАЦИЯ

В наследие советской ядерной программы вошли большие количества высокообогащенного урана (ВОУ), которые использовались в различных исследовательских программах. Физико-энергетический институт (ФЭИ), учрежденный в 1946 году, был (и продолжает быть) активно вовлеченным в развитие и применение атомной энергии, в том числе, реактора-размножителя на быстрых нейтронах, реакторов для военно-морского флота и для космических систем. В ФЭИ построен специальный экспериментальный комплекс, включающий критические сборки и исследовательские реакторы. В течение пятидесяти лет исследовательской деятельности накопилось большое количество топлива с ВОУ. Некоторая часть ВОУ все еще используется в критических сборках, в особенности БФС (Быстрый Физический Стенд), и значительное количество материала остается в хранилищах. Некоторая часть ВОУ была вывезена для разбавления, и другая часть может быть использована для изготовления нового топлива с уменьшенными уровнями обогащения. В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к уменьшению использования ВОУ в исследовательских установках ФЭИ – в особенности для критическихборок БФС.

Авторы статьи работают в Физико-энергетическом институте, Обнинск, Российская Федерация.

Почтовый адрес для корреспонденций: Геннадий М. Пшакин, Физико-энергетический институт, 1, пл. Бондаренко, Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация, 249033.

Адрес электронной почты: pshakin@ippe.ru

Статья получена 18 января 2013 года и принята к публикации 8 июля 2013 года.

ВВЕДЕНИЕ

Первые исследовательские реакторы (в США в 1942 году и в СССР в 1946 году) были критическими сборками, предназначенными для демонстрации цепной реакции в реакторе на природном уране и графите. После того, как стал доступен обогащенный уран, исследователи спроектировали компактные и мощные реакторы для предоставления нейтронов для исследований. В течение этого периода все исследования реакторов проводились в рамках военных ядерных программ и в их интересах. Ученые и инженеры, проектировавшие новые военные реакторы, не рассматривали потенциал и сложные последствия для распространения, когда реакторы с топливом с ВОУ поставлялись в страны, не обладающие ядерным оружием.

Физико-энергетический институт (ФЭИ), один из первых в СССР ядерных исследовательских центров, был учрежден для:

- исследования поведения материалов под облучением для определения их пригодности для применения в реакторах;
- макетирования различных типов атомных энергетических установок для гражданской энергетики, военно-морских двигательных установок, транспортируемых атомных электростанций и космической энергетики;
- испытания ядерных топливных элементов; и
- проведения тепловых и гидравлических исследований систем охлаждения с использованием жидких металлов (Hg, Na, Na-K, Pb-Bi, и т.п.), а также воды.

В этих исследованиях использовались значительные количества ВОУ (тысячи килограммов) в различных физических и химических формах; после окончания исследовательских программ они помещались в хранилища. Сегодня перед ФЭИ встала проблема утилизации или ликвидации этого наследия.

ИСТОРИЯ РЕАКТОРОВ И КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК ФЭИ

С самого начала, как и в Соединенных Штатах, ученые, вовлеченные в советскую программу ядерного оружия, рассматривали идею использования ядерной энергии для генерации электроэнергии. После первого успешного испытания атомной бомбы в 1949 году лидеры советской ядерной программы предложили советскому руководству программу атомной энергетики. На первой советской атомной электростанции, вступившей в строй в 1954 году в ФЭИ, был установлен реактор с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, использующий уран, обогащенный ураном-235 до 5%.

Реакторы на быстрых нейтронах рано рассматривались в советской программе из-за потенциала предоставления топлива для атомных электростанций реакторами-размножителями на быстрых нейтронах с плутониевым топливом. В 1950 году по предложению научного руководителя ФЭИ А.И. Лейпунского было принято решение по созданию технологической базы для будущих реакторов-размножителей на быстрых нейтронах в ФЭИ. Были быстро построены исследовательские реакторы БР-1, БР-2 и БР-5/10. БР-1 и БР-2 работали недолго (от 1 до 2 лет), используя топливо с ВОУ, но БР-5/10 работал в течение более 40 лет. Его программа исследований включала испытания нитридных, карбидных, металлических и оксидных топлив на базе урана и плутония. После облучения топливные элементы из реактора БР-5/10 исследовались в горячих камерах для определения влияния облучения. Использованное топливо и отходы от этого исследования собирались в хранилище ФЭИ.

В середине 1950-х годов было принято решение по расширению экспериментальных возможностей ФЭИ для исследования реакторов-размножителей на быстрых нейтронах и других типов реакторов¹. Некоторые из этих критических сборок и исследовательских реакторов все еще работают или были выключены совсем недавно:

- **БР-1**, первый советский реактор на быстрых нейтронах (1955 год) с топливом из плутония оружейного качества, ставший уникальным калиброванным нейтронным источником. Он выводится из эксплуатации.
- **БФС-1 и БФС-2** (большие физические стенды) – критические конструкции, используемые для моделирования возможных активных зон реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с использованием дисков, изготовленных из ВОУ и плутония, перемежающихся дисками из природного или обедненного урана (смотрите рисунок 1).



Рисунок 1. Критическая установка БФС-2. Машина над критической сборкой используется для размещения и удаления топливных сборок и трубок.

- **КОБРА** была критической сборкой с топливом с ВОУ от БФС, используемой для измерения фундаментальных констант физики реакторов (например, эффектов реактивности маленьких образцов различных материалов). Она была выключена и находится в процессе вывода из эксплуатации².
- **МАТР**, критическая сборка с топливом с НОУ, все еще используемая для изучения различных режимов замедления нейтронов в реакторах ВВЭР с водяным замедлением и водяным охлаждением.
- **БАРС-6**, импульсный реактор с топливом из ВОУ с обогащением 90%, используется для фундаментальных исследований и экспериментов по лазерам с ядерной накачкой.

Другие критические сборки

За более, чем пятидесятилетний период исследований в ФЭИ было установлено и работало около тридцати различных типов критическихборок. Некоторые из них работали на топливе с НОУ, а некоторые – на топливе с ВОУ с обогащением от 21 до 90%. За исключением перечисленных выше, все они были выключены, а их топливо было переведено в центральное хранилище, или в хранилище облученного ядерного материала. Их здания либо выводятся из эксплуатации, либо используются для других целей.

Ядерные реакторы для двигательных установок

В начале 1950-х годов Советский Союз, так же, как и Соединенные Штаты, начал разрабатывать ядерные реакторы для подводных лодок. В Советском Союзе две критических сборки с топливом с ВОУ, 27/ВМ и 27/ВТ, работали более 60 лет с целью подготовки операторов реакторов подводных лодок. Сейчас они выключены и ожидают окончательного решения по их выводу из эксплуатации. Их облученное топливо находится в хранилище ФЭИ.

Транспортируемая атомная электростанция

В конце 1950-х годов ФЭИ разрабатывал транспортируемую атомную электростанцию на топливе с ВОУ, известную как Проект ТЭС-3. Опытная электростанция испытывалась между 1960 годом и началом 1970-х годов. Вывод из эксплуатации закончился в 1978 году и отработавшее топливо было помещено в хранилище ФЭИ.

Космические реакторы

В середине 1950-х годов ученые из ФЭИ и других советских ядерных институтов работали над космическим ядерным реактором. Реакторы, разработанные в ФЭИ, были построены, испытаны на специальной установке в ФЭИ, и запущены в космос. Эта программа была прекращена после развала Советского Союза, но некоторые из этих реакторов с умеренно облученным ядерным топливом, все еще находятся в хранилище ФЭИ.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ФЭИ

Начиная с 1995 года, были достигнуты существенные улучшения безопасности ядерных материалов в ФЭИ благодаря российско-американской программе физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ). Программа ФЗУК ЯМ началась в 1994 году, когда группа экспертов из Министерства энергетики США и американских национальных ядерных лабораторий впервые посетили ФЭИ. В начале 2013 года сотрудничество все еще продолжалось.

Инициативы, предпринятые по программе ФЗУК ЯМ, включали консолидацию ядерных материалов с выведенных из эксплуатации и выключенных установок в центральном хранилище, содержащем более 90% ядерных материалов института, и находящегося внутри сильно защищенного «ядерного острова» ФЭИ. В острове также находятся критические установки БФС и центральное хранилище свежих ядерных материалов, т.е. необлученного топлива.

Несколько критическихборок и других установок располагается за пределами ядерного острова, и некоторые из них содержат значительные количества ядерных материалов, например, импульсный реактор БАРС-6, учебный центр РМТЦ, в котором студенты проводят неразрушающие анализы материалов, и здание, в котором обрабатываются ядерные материалы. Их защита и безопасность также были усилены и улучшены – либо по российско-американской программе, либо за счет собственных ресурсов ФЭИ. Улучшения включали уstra-

нение ненужных дверей и окон, укрепление дверей, системы контроля доступа и порталные мониторы, системы видеонаблюдения и т.п.

Все облученные ядерные материалы хранятся в отдельном хранилище, которое также было модернизировано. Все старые двери были заменены на новые укрепленные двери. Замки были заменены более современными; были установлены системы обнаружения и контроля доступа. Тем не менее, обеспечение безопасности этого наследия было опасным и дорогим.

РАСПОРЯЖЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫМИ ЯДЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Количество (приблизительно 11,5 тонн урана), объем, физические характеристики, и химическая форма накопленного в ФЭХИ облученного топлива, изменяющегося по размеру от сантиметров до метров; оно содержит стержни, таблетки, и сплавы; оно может находиться в форме металла, оксида, карбида, нитрида, металлокерамики и т.п.; уровни облучения могут быть различными; времена охлаждения и объемы доступной документации также могут изменяться. Около 10% приходится на ВОУ; оставшаяся часть – это НОУ со степенью облучения до 5 до 10%.

Прежде чем перейти к распоряжению этими накопленными материалами, следует предпринять несколько подготовительных действий:

1. Должны быть получены ресурсы для обработки (человеческие, финансовые, оборудование и т.п.).
2. Должна быть собрана и проанализирована вся доступная информация для определения точного расположения, геометрии, характеристик, уровне облучения и временах охлаждения, и т.п.
3. Следует проинспектировать материал для подтверждения этих данных.
4. Должна быть получена или разработана технология для перегрузки позиций из их мест хранения в транспортные контейнеры, которые могут быть либо стандартными, либо специально разработанными для конкретных случаев.
5. Следует определить специальное место для загрузки этих материалов, принимая во внимание, что некоторые позиции могут быть радиоактивными или поврежденными.

Следует подготовить административные распоряжения для транспортировки материалов на предприятие Маяк РТ-1 в Озерске для хранения и переработки³.

По соглашению между Министерством энергетики США и Росатомом в 2009 году была начата специальная программа по помощи России в сборе и распоряжении облученным ВОУ из исследовательских реакторов и критическихборок. ФЭИ было выбрано в качестве площадки для опытного проекта⁴. Эта работа проводилась как часть российской федеральной программы по ядерной и радиационной безопасности. Первая партия уже была переправлена в Маяк для переработки и преобразования в НОУ. Ожидается, что программа будет завершена за 5 – 10 лет. Однако, имеется некоторая неопределенность в отношении будущего соглашения между Министерством энергетики США и Росатомом, и программы физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ) в целом. Если эта программа будет прекращена, то программа переработки и преобразования может быть отсрочена.

УСТАНОВКИ БФС

Эксперименты, относящиеся к проектированию реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, начались в конце 1940-х годов⁵. Главной целью этих экспериментов было определение нейтроники таких реакторов. Первыми исследовательскими реакторами были БР-1 (1955 год) и БР-2 (1956 год).

Примерно в то же самое время началось проектирование, производство оборудования и строительство критической сборки БФС.

БФС-1 вступил в строй в июне 1961 года. Его первой активной зоной была модель импульсного быстрого реактора (ИБР), строящегося в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. За ней последовали модели реакторов БОР, которые позднее были построены в Научно-исследовательском институте ядерных реакторов (НИИАР) в Димитровграде, и энергетического реактора на быстрых нейтронах БН-350, который позднее был построен в Шевченко-Актау в Казахстане.

В середине 1960-х годов стало ясно, что нужна критическая установка большего объема. БФС-1 мог вместить активные зоны с диаметром до 2 метров и высотой до 2,2 метра (общий объем 6 м³) и достаточное количество ядерных и неядерных материалов для моделирования реактора на быстрых нейтронах с полной мощ-

ностью до 1000 МВт (тепл.). Однако, он не был достаточно большим для моделирования более мощных коммерческих реакторов на быстрых нейтронах. Поэтому было принято решение построить новую критическую установку, БФС-2, которая могла бы быть использована для моделирования реакторов на быстрых нейтронах с мощностью 2500 – 3000 МВт (тепл.).

БФС-2, вступивший в строй в 1971 году, может вмещать активные зоны диаметром до 5 м и высотой до 3,2 м при полном объеме до 60 м³ с двумя дополнительными объемами для экранов.

БФС использовался для моделирования активных зон реакторов БОР, БН-350, БН-600, БН-800, CEFR (Китайский экспериментальный быстрый реактор), и для предлагаемого южнокорейского реактора на быстрых нейтронах KALIMER.

БФС-1 использовался для моделирования малых и средних реакторов с различными типами охладителей, а также для специальных моделей, применяемых для верификации расчетных методов и уточнения данных по ядерным поперечным сечениям (базовые эксперименты).

БФС-2 использовался для моделирования полномасштабных моделей активных зон коммерческих реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, таких, как БН-800 (в стадии строительства) и предлагаемый БН-1200.

БФС-1 и БФС-2 оборудованы вертикальными трубами диаметром 50 мм с открытыми верхними концами, в которые могут быть загружены диски со стальной оболочкой диаметром 47 мм, содержащие различные ядерные материалы (обедненный, природный, или высокообогащенный уран, или плутоний), и другие материалы реактора (натрий, сталь, алюминий, и т.п.) для моделирования активных зон реактора на быстрых нейтронах. Установки используются для измерения параметров ядерной безопасности реакторов на быстрых нейтронах, таких, как:

- Критичность.
- Эффекты реактивности образцов ядерных материалов, доплеровские коэффициенты⁶, и эффективность управляющих и аварийных стержней.
- Распределения потоков нейтронов и мощности.
- Кинетика.
- Эффекты реактивности пустот в натриевом охладителе.
- Спектр нейтронов и параметры размножения.
- Эффективность защиты; и
- Другие параметры по запросу проектировщиков.

БФС работает в две смены по 6 часов в каждый рабочий день. Когда он не работает, он выключается и принимаются дополнительные меры безопасности.

В будущей программе исследований БФС-2 будет использоваться для моделирования БН-800 с различными загрузками активной зоны, БН-1200 и реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым и свинцово-висмутовым охладителями. Существуют планы использования установок БФС для международных кооперативных исследовательских программ. Поэтому представляется, что установка будет полностью занята по крайней мере в течение ближайших 10–15 лет.

Учитывая, что импульсный электронный ускоритель (МИ-30) может управлять БФС-1 (а ранее, критической сборкой КОБРА) с прецизионным осцилляторным устройством, созданным в кооперации с Институтом ядерных исследований (Россендорф, Дрезден, ГДР)⁷, это позволило создать уникальный экспериментальный комплекс для исследований в широком спектре задач физики ядерных реакторов.

Комплекс критических установок ФЭИ (включающий БФС-1, БФС-2 и КОБРА) включают общий склад не используемых в данный момент ядерных материалов, и временные хранилища рядом с каждой критической установкой для загрузки и разгрузки ядерных материалов в ходе экспериментов.

ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АКТИВНЫХ ЗОН БФС

Размеры активных зон реакторов на быстрых нейтронах, моделируемые на установке БФС, соответствуют значительным количествам расщепляющихся материалов⁸. Установка позволяет исследовать преобразующие активные зоны, которые производят плутоний с урановым топливом, так же как и размножающие активные зоны со смешанным уран-плутониевым топливом. На 2013 год исследователи обладали примерно 0,9 тонны плутония в металлической форме, приблизительно 8,7 тонны ВОУ, обогащенного до 90% и 36% в металлической форме и форме диоксида, более 250 тонн обедненного диоксида урана, 20 тонн обедненного урана в металлической форме, и около 10 тонн тория в металлической форме⁹. Диаметр всех дисков равен 47 мм, но толщина

ядерных материалов лежит в пределах от 0,5 мм до 150 мм для урана, и от 0,5 мм до 10 мм для плутония. Кроме того, имеется полноразмерная субсборка активной зоны БН-600, содержащая диоксид урана, обогащенный до 21%, субсборка МОХ-топлива, содержащая 17% плутония, смешанного с обедненным ураном, и субсборка из обедненного урана в металлической форме¹⁰. И, наконец, имеется 250 дисков, в которых в целом содержится 10 кг диоксида нептуния.

ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ВОУ В ДИСКАХ БФС

Авторы участвовали в исследованиях на БФС, начиная с середины 1960-х годов. В 1950-х и 1960-х годах проблема распространения ядерного оружия и пригодных для оружия ядерных материалов обсуждалась на межправительственном уровне, но в советской программе реакторов на быстрых нейтронах она не рассматривалась как проектное требование. Индийское испытание «мирного ядерного взрывного устройства» в 1974 году также широко не затрагивалась в советских средствах массовой информации и не обсуждалась среди советских ядерных ученых и инженеров. То же самое относилось к потере или к несанкционированному использованию потенциально пригодных для ядерного оружия ядерных материалов. Охрана и контроль государственной безопасности за лицами, работающими с ядерными материалами, считались достаточной защитой от кражи. После развала Советского Союза стало ясно, что такой уровень защиты недостаточен. После того, как Россией и Соединенными Штатами была инициирована программа физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ), как часть более широких усилий помощи России в обращении с наследием холодной войны, начались обсуждения укрепления безопасности ядерных материалов ФЭИ для предотвращения несанкционированного доступа к этим материалам.

Террористические акты в Соединенных Штатах 11 сентября 2001 года вызвали чрезвычайную обеспокоенность в отношении потенциала ядерного терроризма. Научный и технический анализ международным сообществом специалистов показал, что террористы обладают возможностью спроектировать примитивное (импровизированное) ядерное взрывное устройство – в особенности с применением высокообогащенного урана. Основным препятствием является получение достаточного количества пригодного ядерного материала. Ядерные ученые и инженеры ФЭИ понимают, что некоторые ядерные материалы ФЭИ могут быть приспособлены для такой цели. В ситуации после 11 сентября ФЭИ должен был сделать выбор между двумя вариантами:

1. Удалить все пригодные для оружия материалы из института и закрыть большую часть своих исследовательских программ; или
2. Улучшить и усилить систему безопасности для защиты от внутренних и внешних угроз, используя программу физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ) как основной источник программирования и финансирования.

В 1992 году в соответствии с российско-американской программой физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ), американские партнеры были информированы о типах и количествах используемых ФЭИ ядерных материалов – в особенности в БФС. В трудах нескольких конференций были опубликованы общие данные, которые вызвали интерес в экспертном сообществе управления ядерными материалами, потому что некоторые из используемых в БФС материалов были тем, что МАГАТЭ характеризует как «материалы прямого использования»¹¹.

В разные моменты во время этой работы обсуждался вопрос о возможной конверсии российских исследовательских реакторов (включая критические сборки) на низкообогащенное топливо. Операторы исследовательских реакторов и ученые, использующие эти реакторы как инструменты, не были готовы определенно заявить о возможности (или невозможности) конверсии¹². Поставленные вопросы включали следующее:

- Можно ли сохранить характеристики исследовательских реакторов при замене топлива с ВОУ на топливо с НОУ?
- Каков лучший тип топлива с НОУ?
- Как много времени понадобится на переход с одного топлива на другое?
- Каковы будут расходы на замену?
- Поскольку в России НОУ, так же, как и ВОУ, подпадает под программу физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ), уменьшит (или увеличит) ли такая замена проблемы управления этой программой?

Идея конверсии установок БФС на топливо с НОУ ставит дополнительные вопросы¹³.

Есть два типа дисков, являющихся кандидатами на замену:

1. ВОУ с обогащением до 90% в форме металла или диоксида; и
2. ВОУ с обогащением до 36% в форме металла или диоксида.

Металлический ВОУ с обогащением до 90% наиболее привлекателен для оружия, поскольку у него самая маленькая критическая масса. ВОУ с обогащением до 90% в форме диоксида также довольно привлекателен, потому что его можно сравнительно быстро преобразовать в металл. Уран, обогащенный до 36%, не столь привлекателен из-за его большей критической массы.

Физики, проводящие исследования на БФС, и менеджеры установок БФС высказывают несколько различных мнения о том, какие степени обогащения потребуются для того, чтобы БФС позволил моделировать активные зоны будущих реакторов на быстрых нейтронах. Принимая во внимание прогноз программы исследований, можно сформулировать следующий подход к понижению уровня обогащения урана, используемого в БФС:

- Для экспериментов, планируемых на БФС-1 (малые модульные реакторы, базовые эксперименты), необходимо иметь от 0,5 до 1,5 тонны ВОУ в форме диоксида со степенью обогащения по крайней мере 36%.
- На основании расчетов, оптимальным обогащением для полномасштабного моделирования активных зон будущих коммерческих реакторов на быстрых нейтронах, будет $20\% \pm 2\%$, что может несколько превышать уровень обогащения в 20%, который принимается как граница между НОУ и ВОУ. Менеджеры программ, работающих над конверсией реакторов с топливом с ВОУ, сопротивлялись компромиссу с обогащением выше 20%, по причине размытия международной принятой границы.

В то же время, менеджеру БФС может понравиться уменьшить количество ВОУ и металлического плутония в установке, поскольку они считаются материалами Категории 1 для целей физической защиты и учета. Сокращение количества этих материалов позволит уменьшить частоту проведения физической инвентаризации и уменьшить риски радиационной защиты и безопасности для работников. Уран с обогащением ниже 20% – это материал с менее ограничивающими требованиями по охране здоровья и безопасности, и меньшим риском для здоровья¹⁴.

На основании прогнозируемой программы будущих исследований также представляется, что замена металлического ВОУ на оксидный ВОУ будет лучше как для моделирования, так и для уменьшения притягательности материалов. В то же время следует окончательно определить размеры партий материала с уменьшенным обогащением, график замены, технические требования к заменяемым дискам, и некоторые другие подробности.

На рисунке 2 представлен пример моделирования обогащения около 20% ураном оружейного качества, перемешанным с обедненным ураном и ураном, обогащенным до 22%. Точная корректировка с понижением обогащения от 22% может быть проведена добавлением дисков обедненного урана. Например, если толщина топлива в дисках, обогащенных до 22%, равна 10 мм, то диск с обедненным ураном толщиной 0,5 мм уменьшит среднее обогащение на 1%, или один диск на каждые два диска, обогащенных на 22%, уменьшит среднее обогащение на 0,5%. Общее количество урана в колонке можно оставить постоянным, добавляя тонкие диски с натрием.

Преимущества и недостатки ВОУ с уменьшенным обогащением

Уменьшение степени обогащения ВОУ в дисках БФС имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам относятся:

- Уменьшение эффектов неоднородности от чередования дисков с ураном, обогащенным на 90%, и дисков с обедненным ураном для достижения обогащения около 20%;
- Увеличение ядерной безопасности за счет повышения отрицательной обратной связи по температурному доплер-эффекту реактивности из-за температурного уширения резонансного поглощения нейтронов ураном-238; и
- Уменьшение рисков по здоровью и безопасности для работников во время обязательной ежемесячной физической инвентаризации материалов Категорий 1 и 2.

В то же время, имеются расходы, связанные с уменьшением обогащения ВОУ:

- Четырехкратное увеличение количества ядерного материала в хранилищах БФС, связанное с изменением обогащения ВОУ с 90% до 22%, и необходимость увеличения объема хранилища; и
- Прямые финансовые и трудовые затраты, связанные с заменой ВОУ на НОУ.

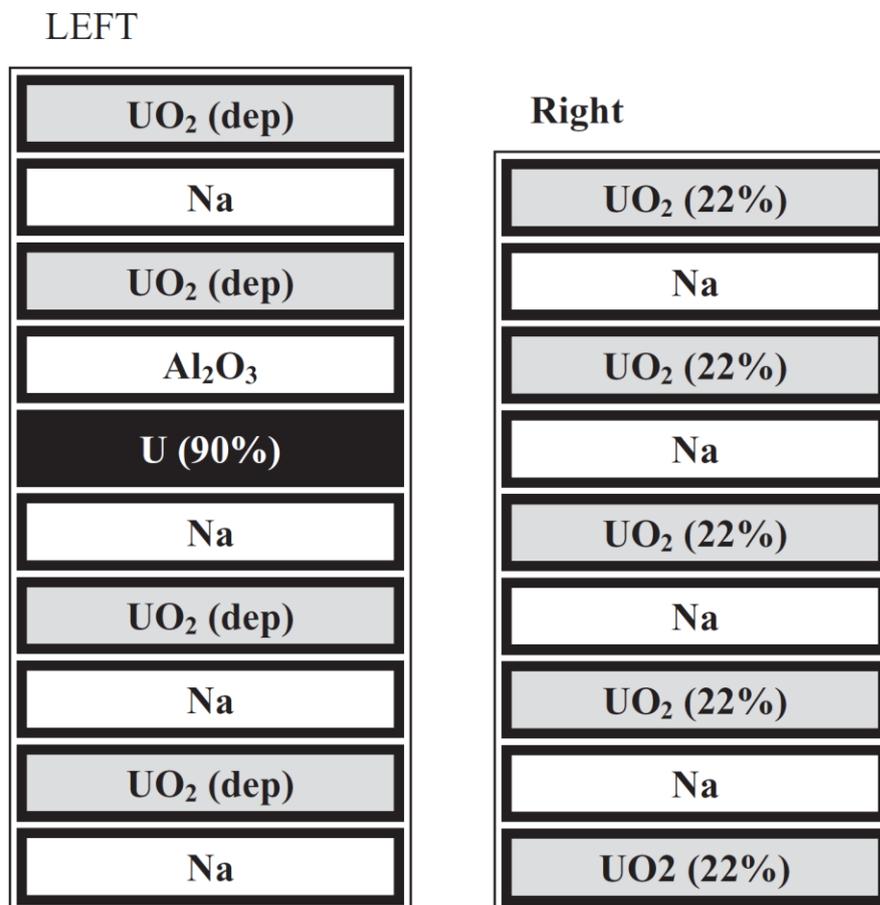


Рисунок 2. Пример моделирования топлива с обогащением примерно 18% смесью текущих дисков с 90% ВОУ и дисков обедненного урана (слева), и дисков с ураном, обогащенным до 22% (справа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не вызывает сомнений, что риски от использования ВОУ в гражданском ядерном секторе должны быть уменьшены в наиболее возможной степени. Для того, чтобы иметь дело с этими рисками, ФЭИ занимается консолидацией и разбавлением ВОУ, наряду с улучшением мероприятий программы физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУК ЯМ) на базе современной технологии, улучшенной безопасности и культуры безопасности, и расширяющейся международной кооперации. Хотя в данный момент еще не было принято твердого решения по ликвидации ВОУ, и ФЭИ планирует продолжать использовать свои исследовательские установки с ВОУ, институт начал реализовывать программу, нацеленную на вывод из строя некоторых своих исследовательских установок и удаления отработавшего топлива с ВОУ из института.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. «Ядерные установки и стенды», Физико-энергетический институт, <http://www.ippe.ru/ibasa/ust.php>.
2. В.И. Голубев и др., «Эксперименты для измерения K_{inf} для U-235 и различных конструкционных материалов», препринт ФЭИ-2692, Обнинск; «Результаты для расчетных и экспериментальных параметров мультипликации смесей U-Th с различным содержанием замедлителя на критической сборке КОБРА», препринт ФЭИ-2698, Обнинск 2004; и С.М. Бедняков и др., «Проверка некоторых реакторных функционалов в экспериментах на быстрых критических сборках», Атомная энергия, 69, 1 (1990): 3.

3. Предприятие Маяк РТ-1 в Озерске – это промышленный комплекс и одно из самых больших ядерных предприятий в Российской Федерации. В качестве части российской программы ядерного оружия Маяк раньше был известен как Челябинск-40, и позднее как Челябинск-65.
4. Смотрите «Десять лет программы РРРФР», <http://www.sosnycompany.com/10rrrfr.en.html>; и «Подготовка и удаление отработавшего топлива из Физико-энергетического института», <http://sosnycompany.com/ippe-article-en.html>. Эта деятельность отделена от программы Министерства энергетики США «Программа консолидации и конверсии материалов» (МСС). По программе МСС собирается и разбавляется на предприятии ПО «Луч» в Подольске, Московская область, только свежий ВОУ. Некоторая часть свежего ВОУ из ФЭИ была удалена по программе МСС.
5. С. Белов, В. Дулин, А. Звонарев, и И. Матвеевко, «Труды конференции «ФЭИ 50 лет»», Обнинск, 1997.
6. У сборок БФС нет внешней системы нагрева и допустимый уровень внутренних источников энергии очень мал (несколько сотен ватт), но без вентиляции их температуры может увеличиться достаточно сильно для того, чтобы эффект реактивности от доплеровского уширения резонансного поглощения урана-238 стал измеримым.
7. В.И. Голубев и др., (ссылка 2); и С.М. Бедняков и др. (ссылка 2).
8. «Proceedings of International conferences on MPC&A,» Obninsk, Russia, 1997, 2000, 2005, 2009.
9. I. P. Matveyenko et al., «Physical Inventory of Nuclear Materials in BFS Facility,» Proceedings of 3rd MPC&A Conference, Obninsk, Russia, 2000.
10. Для более точного исследования физических параметров активных зон реакторов несколько труб БФС заменяются одной сборкой (шестигранной трубой, содержащей 127 топливных стержней). Геометрии топливных сборок БН-600 и БН-800 аналогичны.
11. «Proceedings of the International Conferences on MPC&A,» Obninsk, Russia, 1997, 2000, 2005, and 2009; V.V. Kuzin, G.M. Pshakin et al., «MPC&A System in IPPE,» Proceedings of the 37th Annual International Nuclear Materials Management (INMM) Meeting, Naples, FL, August 1996; and S. Belov, et al., *op. cit.* (ссылка 5).
12. А.С. Дьяков, «Конверсия исследовательских реакторов в России», *Moscow Center for Arms Control Studies*, 21 June 2012 <www.armscontrol.ru/pubs/conversion-of-research-reactors-in-russia.pdf>.
13. Смотрите, например, Proceeding of International Symposium «Science and Society History of the Soviet Atomic Project,» Dubna, Russia, 1 (1996): 80–93, и обсуждения на семинарах Академий наук России и США: Progress, challenges and opportunities for converting U.S. and Russian research reactors from highly enriched to low enriched uranium fuel, Washington, 29–30, November 2010 and Moscow, 8–11 June 2011.
14. Категоризация ядерных материалов в России (ОПУК) и в Министерстве энергетики США (Order 5603) похожи. К Категории 1 относятся большие определенных пределов количества ВОУ, плутония, урана-233. Природный и обедненный уран относятся к Категории 4.