

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИЙСКИХ ЗАПАСОВ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА

Олег Бухарин

Производство и использование высокообогащенного урана (ВОУ) и плутония изначально опасно потому, что имеется возможность его утечки к группам террористов или «негодяйским» странам. В этом плане ВОУ вызывает наибольшие опасения. Во-первых, ВОУ имеет широкое применение и поэтому более доступен. Во-вторых, во многих случаях ВОУ может быть более уязвим к утечке. Необлученный ВОУ не требует герметизации и работающий с ним персонал зачастую имеет законный и длительный прямой доступ к материалу. Кроме того, он менее радиоактивен и поэтому его сложнее обнаружить обычными пассивными методами регистрации излучения, применяемыми на проходных для персонала и транспортных средств на ядерных предприятиях. В-третьих, хотя арсеналы современных ядерных держав и основаны на плутонии, ВОУ вполне может оказаться удобным для менее опытного изготовителя ядерного оружия¹. Обращение с ВОУ несколько проще и он представляет сравнительно меньшую опасность для здоровья. Кроме того, вероятность спонтанного деления ВОУ значительно меньше, что несколько упрощает разработку ядерного оружия².

Работа с ВОУ требует строгих гарантий и мер безопасности. Риск утечки можно сократить также, минимизируя: (а) количество площадок, на которых производится хранение или работа с ВОУ, (б) количество ВОУ на площадках, и (в) перевозку ВОУ.

Олег Бухарин — научный сотрудник Центра по исследованию энергии и окружающей среды Принстонского университета, Принстон, штат Нью-Джерси, США.

ОБЗОР ОПЕРАЦИЙ С ВОУ В РОССИИ

По оценкам, между 1949 и 1988 г.г. советский комплекс обогащения урана в России произвел 1200 — 1400 т высокообогащенного урана³. Этот материал использовался для различных целей на многих площадках, расположенных в разных местах (см. рис.1 и табл.1). Более половины произведенного ВОУ было включено в состав ядерного оружия и находится под контролем Министерства обороны. В настоящее время из военных запасов извлекается большое количество ВОУ. Эти материалы извлекаются из снятого с вооружения оружия и передаются на хранение, или преобразуются в НОУ для использования в энергетических реакторах. Заметное количество ВОУ используется для корабельных реакторов и реакторов для производства ядерных материалов, а также для исследовательских целей.

2000 боеголовок в год. Извлечение расщепляющихся материалов производится на сборочных заводах в Арзамас-16 и Свердловске-45, где извлекаются «физические упаковки» — узлы, содержащие расщепляющиеся материалы. ВОУ в форме деталей оружия упаковываются в контейнеры и помещаются на хранение на площадках демонтажа, или перевозятся для хранения или для разбавления в Томск-7 или в Челябинск-65. Предполагая, что в каждой боеголовке содержится 15 — 25 кг ВОУ, можно оценить, что из демонтируемых боеголовок ежегодно извлекается 15 — 50 т ВОУ, в основном оружейного качества⁴. В 1997 г. Россия объявила, что из оборонного использования будет удалено 500 т ВОУ с 90-процентным обогащением⁵.

Из оружия в топливо. Из-за сокращения вооружений очень большое количество ВОУ оружейного качества стало доступно для разбавления и использования в энергетических реакторах. По российско-американскому соглашению от 1993 г. США покупают НОУ, полученный из по крайней мере 500 т оружейного ВОУ. Первая поставка НОУ в США произошла в мае 1995 г. и к концу года было разбавлено и поставлено 6 т ВОУ. С тех пор объемы операций возрастали, и ожидается, что после 1998 г. они достигнут 30 т в год.

Разбавление ВОУ производится на четырех площадках. Термическое окисление ВОУ производится на химических и металлургических заводах в Челябинске-65 и Томске-7, на которых производилось изготовление компонентов ядерных боеголовок из плутония и ВОУ. Каждый завод способен перерабатывать в год 15 т ВОУ или более.

Процесс термического окисления включает следующие основные этапы⁶. Компоненты из ВОУ переводятся в стружку, берутся и анализируются образцы материала. Стружка ВОУ окисляется в специальных печах, окисел размалывается и просеивается для получения однородного порошка. Порошок анализируется, и, если уровень примесей неприемлем, то проводится извлечение примесей в процессе экстракции в растворителе. Иногда требуется более одного цикла экстракции в растворителе. Чистый оксид загружается в контейнеры (примерно по 6 кг) и взвешивается. Транспортные контейнеры помещаются в дополнительную опечатываемую упаковку и перевозятся в охраняемом железнодорожном вагоне в тяжелом сейфе.

Порошок оксида ВОУ перевозится в Свердловск-44 и Красноярск-45 для фторирования и разбавления. Часть материала может разбавляться и в Томске-7.

На площадке обогащения контейнеры с ВОУ взвешиваются и проверяется качество образцов материала.

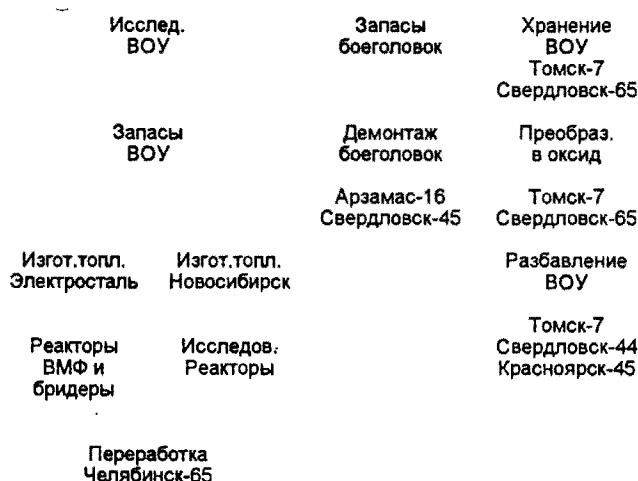


Рис.1. Операции с ВОУ в России.

Оружейный комплекс и демонтаж боеголовок

В настоящее время самой масштабной операцией с ВОУ в России является демонтаж ядерного оружия. Министерство атомной энергии (Минатом) с конца 80-х г.г. демонтирует ядерные боеголовки в количестве 1000 —

После этого оксид ВОУ фторируется в пламенных реакторах и конденсируется в 6-литровых технологических емкостях. Жидкий гексафторид урана переливается в 12-литровые емкости, взвешивается, и берутся образцы материала для проверки концентрации урана-235. Образующиеся при фторировании отходы ВОУ возвращаются в цех окисления для извлечения ВОУ.

Табл. 1. Операции с ВОУ (исключая ядерные операции).

Площадка	Кат.	Работа с ВОУ
Оружейный комплекс		
Завод «Электрохимприбор», Свердловск-45	A/1	Извлечение ВОУ из оружия Хранение компонентов оружия
Электромеханический завод «Авангард», Арзамас-16	A/1	Извлечение ВОУ из оружия Хранение компонентов оружия
Институт экспериментальной физики, Арзамас-16	A/1	Исследования оружия Исследовательские реакторы с ВОУ
Институт технической физики, Челябинск-70	A/1	Исследования оружия Исследовательские реакторы с ВОУ
Установки топливного цикла		
Производственное объединение «Маяк», Челябинск-65	B/1	Хранение компонентов из ВОУ Преобразование ВОУ из металла в оксид Переработка топлива из ВОУ Эксплуатация тритиевых реакторов (хранение и использование топлива из ВОУ)
Сибирский химический комбинат, Томск-7	B/1	Хранение компонентов из ВОУ Преобразование ВОУ из металла в оксид Разбавление ВОУ Эксплуатация плутониевых реакторов (хранение и использование топлива из ВОУ)
Горнохимический комбинат, Красноярск-26	D/1	Эксплуатация плутониевого реактора (хранение и использование топлива из ВОУ)
Уральский электрохимический комбинат, Свердловск-44	C/1	Разбавление ВОУ
Электрохимический завод, Красноярск-45	C/1	Разбавление ВОУ
Машиностроительный завод, Электросталь	C/1	Изготовление топлива для корабельных реакторов
Завод химических концентратов, Новосибирск	C/1	Изготовление топлива для промышленных и исследовательских реакторов
Исследовательские институты и прочие установки		
Институт неорганических материалов, ВНИИМ, Москва	B?/1	Исследования топливного цикла Материаловедение
Институт ядерных реакторов, НИАР, Димитровград	C/1	Технология топливного цикла Исследовательские реакторы с ВОУ
Физико-энергетический институт, Обнинск	C/1	Исследовательские реакторы с ВОУ Обработка и хранение ВОУ
НПО «Радиовый институт», Санкт-Петербург	C/7	Исследования топливного цикла
Курчатовский институт, Москва	C/1	Ядерная технология Исследовательские реакторы с ВОУ
Производственное объединение «Луч», Подольск	C/1	Изготовление топлива для космических реакторов Исследовательский реактор с ВОУ
Томский политехнический институт, Томск	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Ин-т энергетических технологий, Свердловское отделение, Заречный	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Институт физической химии, Обнинск	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Институт приборостроения, Лыткарино	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Московский инженерно-физический институт	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Московский институт теоретической и экспериментальной физики	?	Исследовательский реактор с ВОУ

Продолжение Табл. 1. Операции с ВОУ (исключая ядерные операции).

Площадка	Кат.	Работа с ВОУ
Институт энергетических технологий, Москва	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Институт ядерной физики, Санкт-Петербург	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Исследовательский институт им Крылова, Санкт-Петербург	?	Исследовательский реактор с ВОУ
Площадки ВМФ	?	Хранение и использование топлива с ВОУ
База ледоколов Атомфлота, Мурманск	?	Хранение и использование топлива с ВОУ

12-литровые перевозятся на сублимационную установку, и газообразный гексафторид урана направляется в Т-образный узел трубопроводов для смешивания с обогащенным до 1,5 процента гексафторидом урана для получения требуемой степени обогащения (4,4 и 4,95 процента для Свердловска-44 и Красноярска-45 соответственно). Смесь перекачивается в устройство десублимации. Затем производится анализ, гомогенизация, и закачка в баллоны типа 30-В для отправки в Соединенные Штаты.

Производство ядерных материалов

В российских реакторах для производства плутония и трития используется уран, обогащенный до 90%. Реакторы для производства плутония заправляются топливом из природного урана, между которого помещаются стержни из ВОУ для выравнивания радиального и осевого распределения потока нейтронов и вырабатываемой мощности⁷. В каждом из трех еще действующих реакторов для производства плутония (двух в Томске-7 и одном в Красноярске-26) содержится примерно 80 кг топлива из обогащенного до 90% ВОУ и потребляется примерно 200 кг такого топлива в год⁸.

Тритий производится на двух легководных реакторах в Челябинске-65. Реакторы для производства трития имеют конфигурацию «драйвер-мишень», в которой в топливе с ВОУ образуются нейтроны для облучения мишеней из лития-6. В предположении мощности реактора в 1000 МВт, фактора нагрузки в 60%, и степени выгорания топлива в 30% годовая потребность в ВОУ оценивается в 1,5 т в год⁹. В действительности требования в ВОУ могут оказаться значительно ниже из-за остановок реактора для обслуживания и меньшего фактора нагрузки¹⁰.

Топливо с ВОУ для реакторов для производства материалов изготавливается в Новосибирске. В реакторах используется металлокерамическое топливо на алюминиевой основе, в котором частицы из оксида урана диспергированы в алюминиевой матрице. Топливо производится в стандартном процессе порошковой металлургии¹¹. На первом этапе коммерческий алюминиевый порошок смешивается с пудрой U-308, которая приготавливается распылением и просеиванием U-308. На втором этапе смесь засыпается в изложницу и сжимается под изостатическим давлением. На третьем этапе сердцевинны топливных элементов подгоняются к заготовкам облочков. И, наконец, топливные элементы обезгаживаются, смазываются, протягиваются, разрезаются и обрабатываются в соответствии с действующими требованиями.

В настоящее время объем производства в Новосибирске составляет 2,1 т в год, что меньше 3,5 т в год во времена максимума ядерной производственной программы¹². Возможно, что в прошлом сырье ВОУ поставлялось в Новосибирск с обогащенных предприятий. Настоящий источник ВОУ неизвестен¹³. Однако, сообщают, что в настоящее время сырьевой материал ВОУ поставляется на завод в форме гексафторида урана¹⁴. Возможно, что некоторое количество сырьевого материала ВОУ производится извлечением ВОУ из топлива реакторов для производства плутония и повторным обогащением в Томске-7.

В 1997 г. США и Россия подписали соглашение о

преобразовании активных зон трех реакторов для производства плутония с целью прекращения производства плутония оружейного качества. Согласно текущему предложению, реакторы должны загружаться топливом с 90% обогащением. Общая потребность трех реакторов в ВОО будет составлять примерно 6 т в год до их выключения в какой-то момент времени после 2010 г. Вариант с ВОО потребует увеличения объема производства топлива с ВОО в Новосибирске до 7,5 т в год (с учетом 1,5 т в год для тритиевых реакторов).

Ожидается, что ВОО будет получен из демонтируемого оружия. Некоторые эксперты предполагают «транспортировку ВОО из оружия на установку для производства топлива в Новосибирске». По-видимому, операция должна включать преобразование металлического ВОО из оружия в порошок окислов ВОО (или в гексафторид ВОО) в Томске-7 или в Челябинске-65 и последующую транспортировку в Новосибирск для изготовления реакторного топлива. Однако, в отчете экспертов из Тихоокеанской северо-западной лаборатории предполагалась прямая «транспортировка металлического ВОО из оружия на Новосибирский завод по производству топлива»¹⁵. Еще не решено, что должно происходить с облученным ВОО. Однако, вероятно, что в будущем оно будет переработано для извлечения оставшегося урана, содержащего примерно 80 процентов урана-235.

Основное альтернативное предложение заключается в переводе реакторов на более плотное топливо с 20-процентным обогащением. Очевидно, что технологическая схема для этого варианта еще не определена. Одна из возможностей заключается в переводе металлического ВОО из оружия в раствор, разбавлении раствора ВОО природным или обедненным ураном до 20-процентной степени обогащения, осаждении урана из раствора и его преобразования в окисел. Все эти операции могут проводиться в Челябинске-65 или в Томске-7. После этого порошок окисла может перевозиться в Новосибирск для включения в реакторное топливо.

Топливный цикл корабельных реакторов

Советский Союз построил и эксплуатировал самый большой в мире флот военных кораблей и гражданских ледоколов с атомными двигателями. Атомные подлодки и надводные корабли приписаны к Северному и Тихоокеанскому флотам. Ледоколы эксплуатируются Мурманским морским пароходством (ММП) на базе «Атомфлота» в Мурманске¹⁶.

За исключением подлодок класса «Альфа» с жидкометаллическими реакторами (которые сейчас снимаются с вооружения), на всех российских атомных кораблях используются водяные реакторы под давлением (ВРД). На ВРД подлодок применяется металлокерамическое топливо с ураном среднего обогащения (19 – 45%) в оболочке из циркония или нержавеющей стали¹⁷. (На подлодках класса «Альфа» применяется уран-бериллиевое топливо с ураном, обогащенным до 90%.) Однако, на более мощных реакторах крейсеров ВМФ используется уран, обогащенный до 55 – 90%¹⁸.

Считается, что значительная часть топлива ледоколов изготовлена из урана оружейного качества. Согласно работе по российско-американскому проекту: «Топливо обогащено по урану-235 от 20 до 90 процентов при средней степени обогащения 60 процентов»¹⁹. Большая часть топлива принадлежит к металлокерамическому типу. Исклучением являются примерно 20 активных зон с топливом из цирконий-уранового сплава с обогащением 90% в циркониевой оболочке для ледоколов класса «Арктика». Однако, уран-циркониевое топливо больше не производится и существующие запасы, по-видимому, будут израсходованы до 2000 г.

Топливо для корабельных реакторов ВМФ производится в Электростали (скорее всего, методом экструзии) и перевозится по железной дороге на верфь «Севморпуть» в Мурманске и на базу Шкотово под Владивостоком²⁰. Свежее топливо ВОО для ледоколов поставляются на базу «Атомфлота» по железной дороге и хранится там до загрузки на вспомогательном судне

«Имандра», пришвартованном на базе²¹. Топливо для подлодок поставляется производителем на площадке хранения Северного и Тихоокеанского флотов, где они хранятся до возникновения надобности²². Промежуточное хранение производится также на портовых сооружениях, на вспомогательных судах, и на установках для перезагрузки. После нескольких лет хранения облученное топливо перевозится в Челябинск-65 для переработки.

В прошлом ВМФ и ледоколам требовалось от 5 до 10 активных зон для каждого флота. В последние годы общая потребность флота сократилась до нескольких активных зон в год, поскольку ММП и ВМФ проводят сейчас по 1 – 2 перезаправки в год. Сообщают, что ММП, закупаящее в среднем по 2 активных зоны в год, стало основным потребителем производственной линии корабельного топлива в Электростали. Предположив, что в одной активной зоне содержится 200 кг ВОО, можно оценить поток урана оружейного качества, связанный с корабельным топливным циклом, в 400 кг в год²³.

Использование ВОО для исследовательских целей

ВОО широко используется в исследовательских реакторах и для материаловедения. В России имеется более 100 исследовательских и испытательных реакторов и критических сборок²⁴. В 15 – 30 из них используется ВОО²⁵. Так, например, в больших критических макетах реакторов на быстрых нейтронах с нулевой мощностью в физико-энергетическом институте в Обнинске содержится несколько тонн ВОО.

В большинстве исследовательских реакторов используется металлокерамическое топливо с окислами урана из Новосибирского топливного завода²⁶. Сообщают, что линия по производству топлива для исследовательских реакторов находится в том же здании, в котором производятся другие работы с ВОО. Топливо с ВОО производится также в некоторых больших центрах по разработке реакторов, например, в институте атомных реакторов в Димитровграде.

В нескольких научных институтах с ВОО работают в исследованиях по ядерному топливному циклу и по материаловедению. В большинстве случаев количества ВОО относительно малы: так, в Радиовом институте в Санкт-Петербурге находится примерно 2 кг ВОО²⁷. На некоторых установках, однако, проводятся довольно крупные операции. Так, в институте «Луч» в Подольске, в котором производится исследование и мелкосерийное изготовление космических реакторов и экспериментальных топлив, находится около 100 кг ВОО, обогащенного примерно до 80 процентов²⁸.

Переработка топлива с ВОО

Стандартная российская практика топливного цикла предусматривает переработку облученного топлива с ВОО. Технология переработки отработанного топлива с ВОО была разработана в Челябинске-65 в 60 – 70 г.г. Эта технология предназначена для выделения оставшегося урана, а также плутония и непутия. Линия переработки ВОО из уран-алюминиевого топлива корабельных реакторов начала работать на радиохимическом заводе РТ-1 в 1976 г.²⁹ Впоследствии завод стал перерабатывать топливо с ВОО из исследовательских и промышленных реакторов, а также из реакторов на быстрых нейтронах. (С 1989 – 90 г.г. переработки топлива с ВОО из реакторов для производства плутония в Красноярске-26 и Томске-7³⁰).

Технология переработки ВОО основана на модифицированном процессе ПУРЕКС, в котором топливные стержни разрезаются и растворяются. (Облученные топливные элементы из промышленных реакторов сразу направляются в устройство растворения.) Уран, плутоний и нептуний отделяются от продуктов деления экстракцией из растворителя. Извлеченный ВОО очищается в трех циклах экстракции из растворителя и преобразуется в оксид урана (U-308), конечный продукт завода РТ-1. Извлеченный ВОО повторно используется для изготов-

ления свежего топлива для корабельных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах³¹. Переработанный ВОУ используется также для смешения с ураном, извлеченным из отработанного топлива ВВЭР-440 (обычно содержащего 1,3% урана-235) для изготовления НОУ для реакторов РБМК, и, впоследствии, для ВВЭР-1000³².

УЯЗВИМОСТЬ ОПЕРАЦИЙ С ВОУ

Необлученный ВОУ уязвим в отношении хищений или утечки на всех стадиях производственного цикла. Наибольший риск при обработке заготовок исходит от сотрудников, имеющих прямой законный доступ к материалу³³. При низком уровне мер безопасности работник может просто положить кусочки материала в карман или в рабочую перчатку и выйти с ними с территории предприятия. Грамотный сотрудник может уменьшить риск обнаружения, вынося уран малыми порциями на протяжении долгого времени. Например, инженер института «Луч» в Подольске сумел успешно вынести примерно 1,5 кг ВОУ порциями по 25 – 30 г в течение нескольких месяцев. Такие возможности преступлений могут быть предотвращены современными методами контроля за материалами (МКМ), включающими учет материала, контроль за процессами, контроль и учет за деталями, визуальное наблюдение, контроль на проходных и анализ отходов. Однако, даже передовая система гарантий может быть обманута мотивированным и изобретательным оппонентом³⁴. Трудность гарантий для ВОУ усугубляется следующими факторами:

- Большие потоки ВОУ пропорционально увеличивают неопределенность измерения и учета материалов (если только производственная линия не разбита на небольшие участки контроля).
- Многочисленность потоков материала, включающая

большие потоки лома и отходов, так же, как и множественность физических форм и химического состава ВОУ усложняют процедуры учета и контроля ВОУ.

- Внедрение процедур контроля над материалами усложняется при большой численности рабочей силы, а также на старых и больших заводах³⁵.
- Эффективность МКМ уменьшается при промышленных авариях и разливах материалов.

Контроль над ВОУ в хранилищах проще. Материал хранится в форме легко подсчитываемых единиц (деталей, топливных элементов и т.д.); доступ к хранилищам обычно ограничен; и процедуры контроля, такие, как правило двух человек, просты и легко осуществимы. Однако, для обхода такого контроля сотрудники могут применять такие меры, как сговор персонала, подмену объектов, и другие фальсифицирующие действия.

Другая опасность на предприятиях с ВОУ связана с вторжением извне. Такое нападение может проводиться либо тайно, либо силой, и может опираться на помощь сотрудников. Так, например, по крайней мере в одном случае килограммовое количество топлива среднего обогащения было украдено с хранилища ВМФ в районе Мурманска в 1993 г.³⁶

Внешняя угроза отражается системой физической защиты. Стандартные меры физической безопасности установок с ВОУ основаны на многоуровневом всеобъемлющем подходе и включают в себя следующие элементы: (а) комплексные возможности обнаружения, оценки и связи; (б) технические барьеры (заборы, замки, сейфы); (в) системы контроля на входе (пропуска, детекторы металлов) и (г) силы охраны и обороны. Некоторые из этих мер непригодны для систем транспортировки, и перевозимый ВОУ в принципе защищать труднее, чем находящийся в хранилище.

Таблица 2. Уровни притягательности и категории гарантий из приказа по МЭ 5633.1³⁹

Тип материала	Уровень притягательности	Категории гарантий (I – наибольшие опасения) в зависимости от количества содержащегося материала (в кг)							
		Плутоний или уран-233				Уран-235			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Оружие ^a	A	Любые количества в категории I				Любые количества в категории I			
Чистые продукты ^b	B	>2	0.4-2	0.2-0.4	<0.2	>5	1-5	0.4-1	<0.4
Материалы высокого качества ^c	C	>6	2-6	0.4-2	<0.4	>20	6-20	2-6	<2
Материалы низкого качества ^d	D	-	>16	2-16	<2	-	>50	8-50	<8
Все прочие материалы ^e	E	Любые количества в категории IV				Любые количества в категории IV			

^a Собранные оружие и испытательные устройства.

^b Основные компоненты оружия, крупные детали, слитки, прутки, переплавленный металл и непосредственно преобразуемые материалы.

^c Карбиды, оксиды, растворы с содержанием более 25 г/л, нитраты и т.д., топливные элементы и сборки, сплавы и смеси, тетрафторид и гексафторид урана с обогащением более 50%.

^d Растворы с содержанием от 1 до 25 г/л, отходы процессов, требующие развернутой переработки, умеренно облученные материалы, плутоний-238 (за исключением отходов), тетрафторид и гексафторид урана с обогащением от 20 до 50%.

^e Сильно облученные материалы, растворы с содержанием до 1 г/л, уран в любой форме и количестве с обогащением более 20%. Считается, что материалы категории E вряд ли будут предметом хищения.

Нередко требования физической защиты приводят к увеличению общей стоимости ядерных гарантий и безопасности. Капитальные затраты, связанные с разработкой системы физической защиты, установкой технических барьеров, установкой датчиков и камер наблюдения, и приобретением компьютеров и другой техники для систем безопасности, могут достигать 10 – 15 млн. долларов для предприятия среднего размера³⁷. (Для более крупных предприятий с большей длиной периметра затраты будут больше из-за увеличения стоимости заборов, камер, датчиков проникновения и кабельной сети.)

Уровень гарантий и безопасности зависит от количества и привлекательности ядерных материалов (табл.2). Предприятия категории 1, на которых содержатся количества притягательных материалов (которые легко преобразовать в металлические детали), достаточные для изготовления оружия, вызывают наибольшие опасения³⁸. В российском ядерном комплексе количество предприятий категории 1 велико (примерно вдвое больше, чем в США). Уязвимость ВОУ может заметно меняться от предприятия к предприятию и от одной программы ВОУ к другой.

Основная часть наиболее привлекательных материалов (оружие, детали оружия, металлический ВОУ) находится в работе на предприятиях комплекса производства оружия и считается сравнительно безопасной. Все эти предприятия находятся в закрытых городах; ВОУ в основном находится в работе или хранится в форме деталей (компонентов оружия); и безопасность секретных операций с расщепляющимися материалами на оружейных предприятиях остается строгой. ВОУ из оружия наиболее уязвим во время транспортировки от предприятий демонтажа на площадки хранения и разбавления. Большая часть перевозок производится по железной дороге и путь транспортировки нередко составляет тысячи километров и проходит по малонаселенным местностям.

Преобразование ВОУ в НОУ также проводится в закрытых городах. Однако, они в принципе более опасны из-за работы с большими количествами ВОУ. Разбавление ВОУ также включает крупномасштабную перевозку ВОУ между предприятиями по демонтажу, преобразованию в окислы и разбавлению.

На заводах по изготовлению топлива в Электростали и Новосибирске уязвимость ВОУ может быть еще выше. Оба предприятия расположены в открытых городах, и, помимо производства топлива с ВОУ, на них изготавливается топливо с НОУ для коммерческих атомных электростанций. Технология экструзии, используемая для производства топлива с ВОУ в Электростали и в Новосибирске, требует крупномасштабных операций по переработке лома и отходов. По мнению экспертов Тихоокеанской ядерной лаборатории, «На концах экструзионных топливных стержней образуется большое количество отбраковываемого материала топлива. Вместе с другими отходами производства количество перерабатываемого в процессе производства материала достигает 30 процентов»⁴⁰. Развернутая обработка лома и отходов осложняется применением МКМ. Дополнительные проблемы возникают из-за контроля деталей тысяч относительно небольших топливных элементов⁴¹.

Реакторное топливо с ВОУ является менее привлекательной мишенью из-за того, что оксид урана разбавлен алюминием⁴² (однако, частицы оксида урана легко собрать, расплавив топливо). Реакторное топливо подвержено опасности во время транспортировки и хранения на площадке реактора до его загрузки в реактор (это в особенности относится к исследовательским и корабельным реакторам, а не к промышленным реакторам, которые находятся в закрытых городах и лучше защищены). Опасность может быть несколько уменьшена при поставке топлива на реактор непосредственно перед перезагрузкой. Однако, для некоторых исследовательских реакторов график приобретения и поставки топлива обычно определяется наличием финансирования и/или топлива. На некоторых исследовательских реакторах имеются также большие запасы топлива, оставшиеся с советских времен. Как правило, исследовательские организации считаются более уязвимыми, потому что они нередко не могут позволить себе достаточно надежной системы безопасности.

В течение нескольких последних лет безопасность ядерных материалов в России была улучшена как в результате внутренних российских усилий, так и в результате сотрудничества с западными странами, в основном, с Соединенными Штатами. США помогли России улучшить инфраструктуру управления ядерными материалами, предоставив контейнеры для хранения и перевозки ядерных материалов из оружия, и поддержав строительство центрального хранилища в Челябинске-65. Две страны также совместно работают над улучшением гарантий и безопасности ядерных материалов на отдельных ядерных установках и при перевозке, и над установлением инфраструктуры ядерных гарантий в России в национальном масштабе.

Однако, ядерные гарантии и безопасность в России остаются неадекватными. Внутренние усилия в России недостаточны из-за бюджетных ограничений. Эффективность международного сотрудничества ограничивается заводом в Электростали, а цех ВОУ на Новосибирском

заводе остается закрытым для иностранцев. Однако, наиболее важной является огромная величина задачи из-за гигантского размера российского ядерного комплекса и материальных запасов, и масштаба необходимых улучшений. Фактически эта проблема вряд ли будет решена, если не будет достигнуто возрождение национальной экономики.

КОНСОЛИДАЦИЯ ЗАПАСОВ ВОУ И РАБОТЫ С НИМ

Имея в виду срочность проблемы безопасности и стоимость улучшения ядерных гарантий в России, следует рассмотреть работу с ВОУ с целью уменьшения: (а) количества мест использования ВОУ, (б) обработки ВОУ, и (в) перевозки ВОУ.

Минимизация количества мест использования ВОУ

В идеальном случае обработка и хранение ВОУ должны происходить на малом количестве хорошо защищенных площадок, таких, как закрытые города Минатома, и в малом количестве предприятий на этих площадках. Консолидация запасов ВОУ и работы с ним будет предпочтительна по нескольким причинам. Она уменьшит опасность похищения ВОУ со слабо охраняемых площадок и, уничтожая «слабые связи» в национальной ядерной инфраструктуре, повысит эффективность инвестиций для повышения безопасности на строго охраняемых площадках. Она позволит также российскому правительству сэкономить сотни миллионов долларов, избегая затрат на улучшение и поддержание ядерных гарантий и безопасности на современном «раздутном» комплексе.

Ядерные предприятия получают также причину для сокращения своих операций с ВОУ по мере того, как российская ядерная промышленность будет переходить к большей экономической независимости, а контролирующее наблюдение станет более эффективным. В самом деле, предприятие, работающее с ВОУ, должно иметь специальную охранную организацию с очень строгими и дорогими мерами безопасности. Напротив, заводы с НОУ (по крайней мере, в США) не должны иметь ничего большего, как стандартных мер промышленной безопасности. Помимо расширенных требований по гарантиям, заводы, работающие с ВОУ, должны удовлетворять значительно большим требованиям в области ядерной критичности, радиологической, экологической и промышленной безопасности. Для работы с ВОУ предприятие должно пройти через длительный и трудоемкий процесс лицензирования. Дополнительная подготовка персонала, специальное и сложное в обращении оборудование, строгий эксплуатационный контроль и разнообразный административный и технический контроль еще более увеличивают стоимость работы с ВОУ⁴³.

Российско-американская программа по уменьшению обогащения в исследовательских и испытательных реакторах (УОИИР) является многообещающим подходом к сокращению количества организаций с ВОУ. Соглашение между американской программой УОИИР (управляемой Аргоннской национальной лабораторией) и рядом российских институтов для изучения возможности преобразования исследовательского реактора российской конструкции, и для разработки и изготовления уранового топлива с обогащением в 19,75% было подписано в 1993 г.⁴⁴ Программа связана с проблемой конверсии примерно десятка реакторов в России, а также реакторов российской разработки в Восточной Европе и в бывших советских республиках.

Из-за большого опыта работы с топливом с диспергированным оксидом урана российским экспертам была поставлена задача разработки топлива с большей плотностью оксида урана⁴⁵. Однако, в значительной части экспериментальных топливных элементов, которые были загружены в исследовательские реакторы в Курчатовском институте в Москве, Институте атомных реакторов в Димитровграде, и Институте ядерной физики в Санкт-Петербурге, были обнаружены утечки. В 1998 г. исследователи работали над выявлением и решением проблемы.

Если проблема не будет устранена, то предлагается разработать топливо с силицидами типа, прошедшего развернутые испытания в США.

Осенью 1997 г. американская группа вела переговоры о контракте с российскими институтами для изучения возможности преобразования существующих реакторов российской разработки на топливо с НОУ. Если проблема с более плотным топливом будет разрешена, то первые реакторы, которыми, скорее всего, будут реакторы в Польше, Венгрии и Чехии, смогут быть преобразованы в 1999-2000 г.г. Переход на силицидное топливо, помимо, задержит конверсию еще на два года.

Правительства США и России должны направить программу УОИИР на изучение возможности преобразования реакторов ледокольного флота с топливом с ВОУ. При успехе подобная конверсия должна окончательно устранить хранение ВОУ оружейного качества и обращение с ним на базе Атомфлота ММП и в районе Мурманска. Конверсия ледокольных реакторов позволит также заводу в Электростали закончить работу с ураном оружейного качества на своей площадке.

Ревизия операций с ВОУ позволит также направить усилия на исследовательские институты и другие предприятия, применяющие ВОУ для исследовательских целей. Следует убрать запасы ВОУ с тех предприятий, которые больше не проводят исследований с ВОУ. Фактически этот процесс уже начал, но его нужно расширить и ускорить. Например, в 1994 г. Госатомнадзор (российское ведомство по контролю над атомной энергией) запретил по соображениям безопасности Институту авиационного моторостроения (ВИАМ-42) в Москве, который в прошлом принимал участие в разработке технологии разделки изотопов, работу с обогащенным ураном. Впоследствии институт принял решение не возобновлять работу с ураном⁴⁶. Сообщают, что институт «Луч» в Подольске ускорил переработку лома ВОУ, и этот факт отражает необходимость консолидации материалов с ВОУ с различных установок для обеспечения их физической безопасности, а также обеспечение их дальнейшей переработки в НОУ для использования в топливном цикле⁴⁷.

Увеличение безопасности и сокращение расходов могут быть достигнуты также за счет консолидации ВОУ на небольшом количестве безопасных установок внутри площадки. Например, в исследовательском центре в Обнинске в настоящее время работы с материалами категории 1 проводятся примерно в 35 местах в 22 зданиях (реакторах, лабораториях по обработке, горячих камерах и хранилищах)⁴⁸. Планируется создать «ядерный остров», в котором будут расположены три места с повышенной безопасностью, включая новое хранилище. Эти меры уменьшат количество мест до 17 в 14 зданиях, и примерно 70 процентов ядерных материалов института будет находиться в «ядерном острове». Точно так же в институте «Луч» в Подольске ВОУ будет перемещен примерно из 40 мест в центральное хранилище.

Минимизация переработки ВОУ

Сокращение переработки ВОУ упростит контроль за материалами и процедуры учета. Потоки ВОУ на предприятиях по изготовлению топлива будут несколько уменьшены в результате работ по программе УОИИР. Однако, в Новосибирске эти сокращения будут более чем скомпенсированы предполагаемым использованием урана в топливе для реакторов для производства плутония. Поток ВОУ на Новосибирском заводе увеличится втрое. На предприятии добавятся операции с металлическим ВОУ (в добавление к менее привлекательным оксиду и гексафториду урана, переработка которых производится в настоящее время). Кроме того, расширение применения ВОУ вероятно создаст новый поток ВОУ, связанный с переработкой облученного топлива с ВОУ.

Минимизация транспортировки ВОУ

Сокращение объема перевозок ВОУ может быть в основном достигнуто за счет установления региональной

кооперации в цикле переработки ВОУ в НОУ. В частности, риск при транспортировке (который примерно пропорционален количеству перевозимого ВОУ и длительности перевозки) может быть уменьшен, если весь новый ВОУ с заводов демонтажа будет направляться для хранения и окисления в Челябинск-65 (который относительно близок к комплексу демонтажа в Свердловске-45). Челябинск-65 будет посылать порошок оксида ВОУ в Свердловск-44 для разбавления. Томск-7 предположительно может работать в течение нескольких лет, используя ВОУ из оружия, который уже накопился в Томске-7⁴⁹. Оксид ВОУ из Томска-7 будет направляться для разбавления на обогатительные заводы в Томске-7 и Красноярске-45. Такая кооперация создаст два региональных цикла преобразования ВОУ в НОУ – один на Урале и другой в Сибири. Внедрение программы УОИИР также приведет к сокращению количества перевозок ВОУ от заводов по изготовлению топлива к площадкам реакторов.

Кроме того, предлагаемое использование ВОУ в реакторах для производства плутония заметно увеличит объем перевозок ВОУ за счет дополнительных перевозок металлического ВОУ с заводов по демонтажу в Новосибирск и перевозок реакторного топлива из Новосибирска в Томск-7 и Красноярск-26. Напротив, если будет выбран вариант с НОУ, разбавление ВОУ до 20% может производиться в Томске-7 (где ВОУ может извлекаться из имеющихся запасов), и перевозка ВОУ не потребуется.

ВЫВОДЫ

Россия обладает самыми большими в мире запасами ВОУ. Уран оружейного качества хранится, обрабатывается и используется во многих местах по всей России. Эти операции сопровождаются значительным риском хищения ВОУ. Россия, сотрудничая с западными правительствами, работает над улучшением ядерных гарантий и безопасности. Однако, продолжают оставаться многие уязвимые места. Улучшение контроля над материалами должно сопровождаться консолидацией и уменьшением объема работ с ВОУ. Консолидация ВОУ понизит опасность хищения, а также сократит расходы на эксплуатацию и обслуживание в ядерной промышленности России. В частности, следует тщательно взвесить относительные технические и экономические преимущества, связанные с конверсией реакторов для производства плутония на топливо с ВОУ по сравнению с увеличением расходов на безопасность и ростом уязвимости ВОУ, связанными с этим вариантом.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Плутоний обладает несколько большим сечением деления и испускает больше нейтронов при делении быстрыми нейтронами. Поэтому он обладает меньшей критической массой, что позволяет создавать более малые, более легкие и более эффективные первичные системы деления для термоядерного оружия.
2. В частности, ВОУ можно использовать для изготовления взрывных устройств ствольного типа, которые несколько легче сконструировать и изготовить. Плутоний не пригоден для производства устройств ствольного типа.
3. Согласно прошлым оценкам автора, общее производство ВОУ (в 90%-м эквиваленте) составляло 1435 т, а доступные запасы – 1300 т (O. Bukharin, "Analysis of the size and quality of Uranium Inventories in Russia", *Science and Global Security*, Vol. 6, No. 1, pp. 59 – 77). По расчетам Дэвида Албрайта, запасы ВОУ составляют 720 – 1395 т (Albright, D., F. Berkhout, and W. Walker, "Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996 World Inventories, Capabilities, and Politics", SIPRI, Oxford University Press, 1997, p. 113).
4. В ядерном оружии ВОУ может использоваться в первичной системе деления (полностью урановый компонент в ствольном или имплозивном устройстве).

- ве, или составной ураново-плутониевый компонент), и/или в термоядерном вторичном компоненте. Количество БОУ и степень его обогащения у различных боеприпасов могут существенно различаться. Например, средняя степень обогащения в американских запасах БОУ составляет 80% (Albright, D., et al., p. 84). Сообщают, что степень обогащения БОУ в российских боеголовках составляет от 36 до 98 процентов. Неизвестно, сколько БОУ в среднем приходится на одну боеголовку. В оружии с делением или в первичной системе это количество может колебаться от нескольких килограммов в составном ураново-плутониевом компоненте до примерно 50 кг в устройстве ствольного типа. (Например, в изготовленных в Южной Африке устройствах ствольного типа по оценкам содержится по 55 кг; Albright, D., "South Africa's Secret Nuclear Reports", ISIS Report, May 1994, p. 12). По стандартным предположениям, в современном термоядерном боеприпасе содержится от 15 до 25 кг БОУ. Оценка запасов БОУ в оружии США составляет 750 т при 80% обогащении, что соответствует 670 т для 90% обогащения (Albright, D., et al., p. 91). Максимум американского арсенала был достигнут в 1967 г., когда у США было 32500 боеголовок (Norris, B.S., and W.M. Arkin, "Estimated U.S. and Soviet/Russian Nuclear Stockpiles, 1945 - 1994", *The Bulletin of the Atomic Scientists*, November/December 1994, pp. 58-59). Если предположить, что весь уран, доступный для ядерного оружия, был помещен в компоненты оружия, то в среднем на одну боеголовку приходится по 20 кг.
5. Министр Минатома Михайлов зачитал заявление Бориса Ельцина на Генеральной конференции МАГАТЭ. По этим планам предполагается до 2000 г. высвободить 120 т БОУ в дополнение к уже высвобожденным 36 т. (*Uranium Institute News Briefing*, NB97 41-5, 97, 41 p. 1, October 8 - 14, 1997)
 6. "Process Description and Material Control and Assessment System", Annex 9 to the Protocol, *Review of the Second Transparency Review Committee Meeting*, Washington, DC, (August 4, 1995)
 7. Однородность нейтронного потока необходима для обеспечения требований к плутонию по содержанию Pu-240 по активной зоне.
 8. В предположении, что мощность одного реактора равна 2000 МВт, и что они работают на 80% своей мощности, ежегодно будет производиться 548000 мегаватт-суток электроэнергии. Сообщают, что топливо с БОУ образует около 10% энергии (А. Дьяков). Для получения 54800 мегаватт-суток электроэнергии должно произойти деление примерно 60 кг урана-235 (1 мегаватт-сутки образуются при делении 1,05 г урана-235). В предположении степени выгорания в 30% это соответствует требованиям по БОУ примерно в 200 кг в год.
 9. В каждом реакторе мощностью 1000 МВт ежегодно производится 219000 мегаватт-суток и сжигается 230 кг урана-235. Это соответствует примерно 750 кг БОУ в год.
 10. Например, в 1995 г. реактор «Руслан» был выключен для расширенного обслуживания и доработок. (*Report on Gosatomnadzor Activities in 1995*, GAN, Moscow, 1996, p. 55.)
 11. Newman, D.F., C.J. Gesh, E.F. Love, S.I. Harms, "Summary of Near-Term Options for Russian Plutonium Production Reactors", PNL-9982, PNL (July 1994), p. 30.
 12. Общая мощность 13 плутониевых реакторов составляет 19400 МВт. Общие требования по БОУ для этих реакторов составляют 2 т в год.
 13. Согласно представителям ГАН, всем обогатительным заводам, за исключением завода в Свердловске-44Б разрешено обогащать уран менее, чем до 5 процентов. Обогатительному заводу в Свердловске-44 разрешено производить обогащение урана до 30 процентов (сведения от сотрудников Госатомнадзора, лето 1996 г., Москва).
 14. Согласно представителю завода, «Исходным материалом для этого процесса (обработки расщепляющихся материалов для исследовательских реакторов с обогащением более 20 процентов) является гексафторид урана.» (Ustugov A., G. Fuller, "Nuclear Fissile Material Control and Accounting System at the Fuel Elements and Assemblies Fabrication Plant, Novosibirsk Chemical Concentrates Plant, Novosibirsk, Russia," presented at the 38th INMM Annual Conference, Phoenix, AZ, July 20-24, 1997.)
 15. Согласно докладу ПНЛ, «Исходный материал БОУ на заводе для производства топлива в Новосибирске берется из демонтированного оружия и при поступлении содержит около 90 процентов урана-235. На первом этапе процесса этот уран преобразуется в диоксид.» ("Core Conversion Enrichment for Russian Production Reactors", Technical Issue Paper, PNL, February 1997, p. 7 and p. 19.)
 16. В атомный флот ММП входит уже списанный ледокол «Ленин», пять ледоколов класса «Арктика» с двумя реакторами по 54 МВт, два ледокола класса «Таймыр» с одним реактором в 32,5 МВт, и одно грузовое судно класса «Севморпуть» с одним реактором в 24,92 МВт.
 17. Реакторы первого и второго поколений заправлялись топливом, обогащенным до 21 процента урана-235. Активные зоны реакторов третьего поколения включали от двух до трех зон обогащения, в которых уровни обогащения менялись в пределах от 21 до 45 процентов. (Интервью с представителями Минатома, 17-18 января 1995 г. в Вашингтоне.) Согласно докладу российско-американского проекта по защите, контролю и учету материалов, «В российских ВМС на кораблях с ядерными энергетическими установками используется топливо с высокообогащенным ураном (20 - 90 процентов)»; Croesmann, D., et al., "United States-Russian Cooperation on Protection, Control, and Accounting for Naval Nuclear Materials", presented at the 38th INMM Annual Conference, Phoenix, AZ, July 20-24, 1997.
 18. На крейсерах установлены реакторы типа КН-3. Реакторы КН-3 заправляются топливом с ураном, обогащенным до 55 - 90 процентов (Атоминформ, № 4, 1994.)
 19. O'Brien, M., et al., "MPC&A Activities with Russian Icebreaker Fleet", presented at the 38th INMM Annual Conference, Phoenix, AZ, July 20-24, 1997.
 20. Эксперты ПНЛ полагают, что урановое топливо с обогащением до 20 процентов также производится в Новосибирске; Newman, D.F., C.J. Gesh, E.F. Love, S.I. Harms, "Summary of Near-Term Options for Russian Plutonium Production Reactors", PNL-9982, PNL (July 1994), p. 27.
 21. O'Brien, M., et al., "MPC&A Activities with Russian Icebreaker Fleet", presented at the 38th INMM Annual Conference, Phoenix, AZ, July 20-24, 1997. Согласно интервью с представителями ММП, топливо может также доставляться во время заправки на грузовике с военно-морской базы.
 22. На Северном флоте топливо для ВМС хранится в следующих местах: верфи для строительства подводных лодок «Севмаш» (Северодвинск), верфи 35 «Севморпуть» (Мурманск), Западной Лице (Кольский полуостров), и площадке 49 (Североморск, основная база хранения для Северного флота, в 15 км к северо-востоку от Мурманска). На Тихоокеанском флоте топливо для ВМС хранится в следующих местах: верфи 199 (Комсомольск-на-Амуре), верфи «Горняк» (Петропавловск-Камчатский) и Шкотово-22 (Владивосток).
 23. Например, сообщалось, что в активных зонах ледокола содержится 151 кг урана, обогащенного до 90% (*Nucleonics Week*, April 18, 1991, как цитируется в Bradley, D., "Radioactive Waste Management in the Former USSR: Volume III," June 1992, PNL-8074, p. 6.13). Согласно разработчикам реактора, реактор атомного корабля «Севморпуть» загружается 200 кг

- урана, обогащенного до 90% (Интервью, Санкт-Петербург, сентябрь 1992 г.).
24. Под наблюдением Госатомнадзора находятся 43 исследовательских реактора, 52 подкритических и 18 критических сборок. Из них 11 находятся на этапе строительства и 14 демонтируются (Доклад ГАН, RD 03-02-93, 1993). Министерство обороны также обладает исследовательскими и учебными реакторами. Перечень исследовательских реакторов приведен в Cochran, T., S. Norris, O. Bukharin, "Making the Russian Bomb: From Stalin to Eltsin", Westview Press, Boulder, Co., p. 198-201.
25. Сообщение Армандо Травелли (14 декабря 1997 г.).
26. Кроме того, в Электростали производятся разнообразные экспериментальные топлива.
27. "Foreign Travel Trip Report to Novosibirsk/St. Petersburg, Russia, May 12-23, 1996", (May 31, NIS-5-96-311, 1996), LANL.
28. "Nuclear MPC&A at the Luch Facility", *US/FSU Program for Nuclear Materials Protection, Control and Accounting*, DOE Nuclear Materials Security Task Force, (December 1996), pp. G-G 37-43.
29. Zakharkin, B., "Basics of Chemistry of Regeneration of Spent Nuclear Fuel of Propulsion Reactors at the RT-1 Plant", presented at the OTA Workshop, (January 17-18, 1995).
30. В декабре 1993 г. сотрудник ГАН заявил, что «Топливо с ВОУ не поставлялось в Челябинск в течение 3-4 лет» (Интервью в Вашингтоне, 17-21 декабря 1993 г.). Однако, сообщают, что переработка топлива в ВОУ недавно началась в Томске-7.
31. Интервью с представителем Минатома (июнь 1995 г., Москва).
32. Zakharkin, B., "Basics of Chemistry of Regeneration of Spent Nuclear Fuel of Propulsion Reactors at the RT-1 Plant", presented at the OTA Workshop, (January 17-18, 1995).
33. В особенности уязвимы материалы прямого использования, такие, как металлический ВОУ и оксиды, из-за их относительной компактности и удобной физической формы.
34. Обсуждение опасности хищения ВОУ можно найти в Bukharin, O., H. Hunt, "The U.S.-Russian HEU Agreement: Internal Safeguards to Prevent Diversion of HEU", *Science and Global Security*, Vol. 4, pp. 189-212.
35. Например, в цехе ВОУ в Новосибирске работают около 1000 сотрудников (сообщение Фрэнка фон Хиппеля, январь 1997 г.).
36. Bukharin, O., "Security of Fissile Materials in Russia", *Annual Review of Energy and Environment*, (1996), Vol. 21, pp. 467-496.
37. Сообщение американского эксперта по гарантиям, август 1996 г.
38. По оценкам, для создания сравнительно простого компактного ядерного устройства имплозийного типа понадобится 15 – 20 кг ВОУ. Для устройства ствольного типа понадобится до 50 кг ВОУ. Считается, что при создании простого устройства до 30 процентов расщепляющихся материалов может быть переведено в стружку и отходы. Таким образом, уровень привлекательности ВОУ будет главным образом зависеть от того, как просто и как быстро из похищенного материала можно будет изготовить металлические детали взрывного устройства. Для того, чтобы ВОУ мог быть использован при изготовлении устройства на делении первого поколения с разумными размерами и весом без дальнейшего обогащения, степень обогащения, вероятно, должна превышать 50 процентов. Важны также физическая форма и химический состав урана.
39. Wilkey, D.D., and D.W. Crawford, "Graded Safeguards: Determination of the Attractiveness Levels for Special Nuclear Materials", *Proceedings of the INMM Symposium*, (1994), pp. 1059-1062.
40. "Core Conversion Enrichment for Russian Production Reactors", Technical Issue Paper, PNL, February 1997, p. 7.
41. Согласно М. Банну, «200 тысяч топливных элементов, которые должны производиться каждый год при переходе на топливо с ВЭУ в этой программе малы и легки, и являются идеальными для похищения. Для предотвращения простых «внутренних» стратегий, таких, как замена реальных элементов с ВОУ макетами из природного урана может понадобиться система контроля, которая учитывает и помечает каждый элемент, что потребует заметных затрат». (Письмо к Леонарду Спектору из МЭ, 6 января 1998 г.).
42. Реакторное топливо – это металлокерамическое топливо с ВОУ, содержащее 8,5 весовых процентов диоксида урана с 90% обогащением, диспергированное в алюминии. (Newman, D.F., C.J. Gesh, E.F. Love, S.I. Harms, "Summary of Near-Term Options for Russian Plutonium Production Reactors", PNL-9982, PNL (July 1994), p. 27.) По классификации МЭ, твердые вещества, содержащие от 0,1 до 10 весовых процентов ядерных материалов, относятся к материалам уровня Д низкого качества.
43. Например, в результате дополнительных затрат стоимость преобразования оксида ВОУ в фторид примерно на 60% выше, чем у НОУ. Brandon, N.E., and D.R. Hopson, "Elements of a Highly Enriched Uranium Infrastructure", Nuclear Energy Institute's International Uranium Fuel Seminar, (September 25-28, 1994), Beaver Creek, CO.
44. Сообщают, что СССР начал программу уменьшения обогащения в исследовательских реакторах в конце 70-х г.г. Перед тем, как программа была остановлена в конце 80-х г.г. из-за недостатка финансирования, несколько реакторов были переведены на топливо с обогащением 36% вместо 90%. Hibbs, M., «US Will Help Russians to Develop LEU Fuel for Research Reactors», *Nuclear Fuel*, (December 6, 1993), pp. 7-8.
45. Сообщение Армандо Травелли (14 декабря 1997 г.).
46. *Report on Gosatomnadzor Activities in 1995*, GAN, Moscow, 1996, p. 55.
47. Mizin, P., et al., "Nuclear MPC&A at the Luch Facility", *US/FSU Program for Nuclear Materials Protection, Control and Accounting*, DOE Nuclear Materials Security Task Force, (December 1996), pp. G-G 37-43; Mizin, P., et al., "Progress in MPC&A Upgrades at Luch", presented at the 38th INMM Annual Conference, Phoenix, AZ, July 20-24, 1997.)
48. Poplavko, V., "Consolidation of Nuclear Materials in the RF State Science Center Institute of Physics and Power Engineering", *Proceedings of the Russian International Conference on Nuclear Materials Production, Control, and Accounting*, Obninsk, March 9-14, 1997, Obninsk, (1997), Vol. 2, pp. 483-486.
49. В 1994 г. в Томске-7 хранились примерно 23 тысячи контейнеров с ВОУ и плутонием. Материал был помещен на хранение до апреля 1992 г. и из-за отсутствия места в хранилищах в Томск-7 с тех пор поставки материалов не производилось. (См. В. Меньшиков, Ядерный контроль, № 2, февраль 1995 г., стр. 3)