

АМЕРИКАНО-РОССИЙСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ ПО ВЫСОКООБОГАЩЕННОМУ УРАНУ: ВНУТРЕННИЕ МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧКИ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА

Олег Бухарин и Хелен М. Хант

В соответствии с американо-российским соглашением по обогащенному урану (более подробное изложение приведено в статье О. Бухарина "Оружие на топливо" в этом же выпуске) примерно 500 тонн высокообогащенного урана (ВОУ), полученных от крупномасштабного демонтажа бывших советских ядерных боеголовок, будет преобразовано в продукты, не пригодные для ядерного оружия. Как сказано в соглашении, на российских установках ВОУ будет переработан и разбавлен до низкообогащенного состояния в виде гексафторида урана, откуда в дальнейшем американские компании выделат низкообогащенный уран (НОУ) в виде топлива для ядерных реакторов. Однако ВОУ может быть похищен при внутренних операциях переработки привлеченными к ним лицами. В статье охарактеризованы основные опасности для утечки ВОУ и рекомендуется строгая внутренняя профилактическая система мер безопасности.

Хелен Б. Хант - независимый консультант по ядерной безопасности из Принстона, Нью-Джерси, США. Олег Бухарин временно занимается исследовательской работой в Центре по изучению энергетики и окружающей среды Принстонского университета, Нью-Джерси, США.

ВВЕДЕНИЕ

В ближайшем будущем многие сотни тонн высокообогащенного урана поступят в мировой топливный цикл в результате процесса разоружения. Соединенные Штаты и Россия договорились сократить свои стратегические арсеналы до 3000-3500 развернутых боеголовок с каждой стороны. Россия дала обещание односторонне сократить свое тактическое оружие, а Белоруссия, Казахстан и Украина становятся безядерными государствами. Эти действия резко сократят ядерный арсенал бывшего Советского Союза с 45 000 боеголовок (это максимальное значение в 1986 году) до приблизительно 15 000 боеголовок (или до еще меньших размеров в зависимости от того, сколько неразвернутых боеголовок хранится на складах). Поскольку процесс демонтажа начался в бывшем Советском Союзе во второй половине 1980-х годов, советский арсенал сократился примерно на 13000 боеголовок.

Сегодня демонтаж боеголовок продолжается со скоростью 1500-2000 боеголовок в год. Современные планы демонтажа потребуют уничтожения приблизительно 17 000 ядерных боеголовок. Если каждая из них содержит 15-20 килограммов высокообогащенного урана (ВОУ), то в процессе уничтожения в России уже высвободилось порядка 200 тонн ВОУ и еще 300 тонн будет высвобождено в следующем десятилетии.

По крайней мере, 500 тонн оружейного ВОУ в России будет разбавлено до низкообогащенного состояния в соответствии с американо-российским соглашением по ВОУ. Однако, крупномасштабные операции по переработке ВОУ в России увеличат возможности для сотрудников похитить ВОУ и продать его на черном рынке. Поэтому существенно иметь строгие профилактические системы предосторожности на перерабатывающих установках.

Термин "предосторожность" (safeguard) в этой статье имеет американский смысл профилактических

внутренних мер в отличие от международных мер предосторожности. Основные функции внутренних мер состоят в том, чтобы сдерживать, предупреждать и обнаруживать несанкционированное владение и использование ядерных материалов оружейного качества или подрывные действия против них, а также реагировать на подобные нарушения.

Широкий непосредственный доступ многих рабочих к ВОУ в процессе операций переработки окажется неизбежным. Поэтому основное внимание в статье уделяется необходимости иметь хорошо продуманные системы контроля и учета материалов на перерабатывающих установках, чтобы помешать краже ВОУ привлеченными лицами.

АМЕРИКАНО-РОССИЙСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ ПО ВЫСОКООБОГАЩЕННОМУ УРАНУ

Томас Нефф - физик из Массачусеттского технологического института, первым предположил, что правительство США могло бы купить уран от российского оружия и способствовать таким образом демонтажу больших количеств материалов оружейного качества и избавлению от них безопасным для окружающей среды и препятствующим распространению способом¹. Следуя этому предложению, США и Россия начали летом 1992 года переговоры и 18 февраля 1993 года стороны подписали рамочное соглашение по ВОУ: США закупят приблизительно 500 тонн российского ВОУ, подлежащего переработке и разбавлению до низкообогащенного состояния. В соответствии с существующими планами, переработка ВОУ будет проводиться на российских установках в течение 20 лет: со скоростью, по крайней мере, 10 тонн в год первые пять лет, а затем - по крайней мере, 30 тонн в год.

Министерство энергетики США (МЭ) и Министерство атомной энергетики Российской Федерации (Минатом) - исполнительные представители США и

России, договорятся об исходном контракте для проведения соглашения в жизнь². Этот контракт обеспечит финансовые и технические меры, включая участие американского частного сектора и российских инициатив.

В начале мая 1992 года МЭ и Минатом договорились о цене на уран. США согласились платить 780 долларов за килограмм урана с обогащением до 4,4 процента в виде шестифтористого урана с регулировками на инфляцию или изменение ситуации на рынке. Эта цена слегка выше сегодняшней рыночной цены при оплате наличными³. Она, однако, ниже той цены, которую МЭ назначает своим торговым заказчикам, покупающим обогащательные услуги по долгосрочным контрактам⁴. Полный доход России с учетом согласованных цен достигнет примерно 12 миллиардов долларов.

Стороны подписали 2 сентября 1993 года соглашение о "прозрачности", с помощью которого США стремятся получить гарантии, что ВОУ действительно разбавлен до состояния НОУ. В свою очередь Россия хочет иметь гарантии, что проданный в США уран используется только в мирных целях и не направляется в военную программу США.

Кроме того стороны подтвердили свои обязательства поручиться, что контроль над ядерным материалом "будет соответствовать всем соответствующим требованиям нераспространения, контроля и учета материалов, физической защиты и охраны окружающей среды." В частности, соглашение устанавливает, что защита материала "обеспечит, как минимум, охрану, сравнимую с требованиями, сформулированными в документе МАГАТЭ INFCIRC.225. REV.2 (Информационный циркуляр 225, второй вариант, декабрь 1989 года)", который классифицирует ядерные материалы, подлежащие защите и определяет основные компоненты физической безопасности на предприятии и при перевозках. Документ служит ориентиром для правительств о минимальных требованиях, необходимых для защиты различных типов установок и материалов. Он отражает консенсус экспертов из стран, имеющих наибольший опыт в рассмотрении проблем физической защиты, включая экспертов из бывшего Советского Союза. Обычно предполагается, что стандарты физической защиты в России выше, чем рекомендуется документом INFCIRC.225.REV.2, но одно лишь строгое соблюдение стандартов этого документа может не обеспечить достаточной защиты.

Хотя физическая защита служит принципиальным элементом безопасности при обороне материалов от атаки диверсионной группы извне, последовательная система контроля за материалами и учета их является жизненно важной для предотвращения хищения сотрудниками изнутри⁵.

В прошлом Советский Союз тревожился только по поводу шпионской деятельности, потому что не было экономического побуждения пускать на сторону ядерные материалы. Особое внимание уделялось физическим ограждениям и тщательному отбору персонала для ядерных программ. Программа учета материала - это инструмент, разработанный для облегчения планирования и финансового учета, и она неадекватна целям охраны.

Экономический кризис, широко распространившаяся коррупция и возрастающая прозрачность границ открыла Россию для черного рынка ядерных ма-

териалов. Недавнее хищение десятков килограммов НОУ сотрудниками военного предприятия ядерной промышленности демонстрирует как реальность угрозы, так и несостоятельность российской системы мер предосторожности⁶.

ПОТОК МАТЕРИАЛА И ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРСИИ

Российское оружие разбирается на четырех предприятиях в Нижней Туре и Юрюзани (городок вблизи Златоуста) на Урале, а также в Пензе и Арзамасе в Центральной России (см. рис.1). Компоненты оружия помещаются в специальные контейнеры и хранятся в местах демонтажа или отправляются на хранение на те предприятия, где были изготовлены материалы. Предназначенный для конверсии ВОУ будет направлен на перерабатывающее и разбавляющее предприятие в Верх-Нейвинске, где он будет переработан в шестифтористый уран и разбавлен полуторапроцентным ураном до степени обогащения 4,4 процента (см. рис.2). Проверка при приемке материала будет гарантировать, что шестифтористый уран удовлетворяет требованиям МЭ "Стандартные требования к шестифтористому урану со степенью обогащения ураном-235 ниже пяти процентов"⁷. Продукт будет переправлен в виде шестифтористого урана в Санкт-Петербург, а оттуда в США. В США материал будет разбавлен в соответствии с заказами на газодиффузионном заводе в Портсмуте, Огайо и отослан частным американским изготовителям топлива.

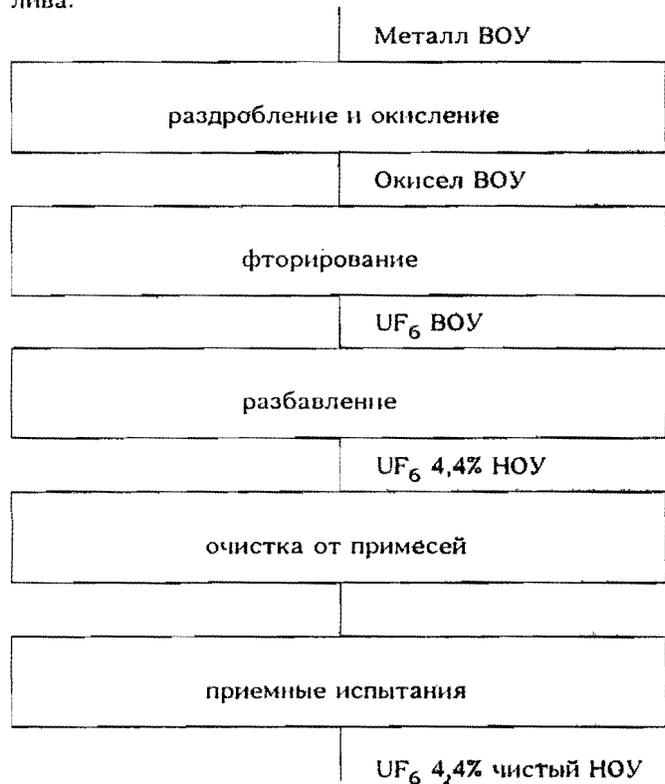


Рисунок 2
Диаграмма преобразования и разбавления

Основная масса переработки и разбавления будет проведена на Уральском электромеханическом заводе в Верх-Нейвинске вблизи Екатеринбурга⁸. Завод - первое обогащательное предприятие промыш-

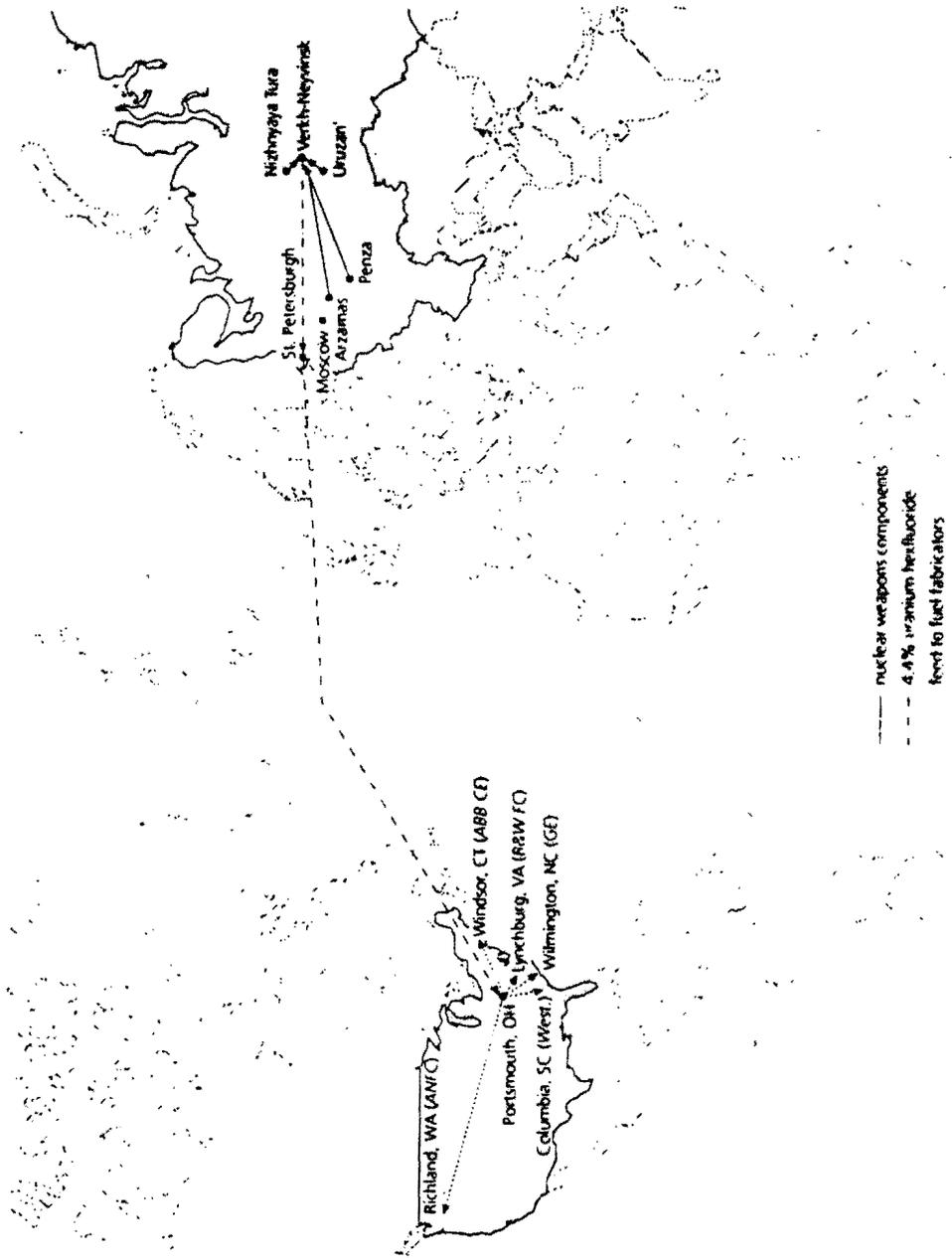


Рисунок 1

Карта перемещения материалов

СТЕПЕНЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ ВОУ ВО ВРЕМЯ ПЕРЕРАБОТКИ И РАЗБАВЛЕНИЯ

ленного масштаба в Советском Союзе, начал производить уран для оружия на основе метода газодиффузионного обогащения в 1949 году. В 1957 он стал первым советским опытным (а затем и полномасштабным) заводом по обогащению с использованием центрифуг. Характерной чертой этого предприятия служат три разделительных каскада. В прежде объединенном советском обогатительном комплексе эти каскады производили оружейный уран, используя в качестве загрузки продукты других обогатительных предприятий. Завод производил также НОУ для экспорта на Запад с 1970-х годов. После того, как производство ВОУ было прекращено в 1987 году, завод был перестроен исключительно на производство НОУ. В настоящее время завод обладает потенциалом в 2-3 миллиона единиц работы разделения (SWU) ежегодно, что составляет около 20 процентов полного обогатительного потенциала России⁹. Кроме обогатительных каскадов Верх-Нейвинский производственный комплекс содержит одну из двух важнейших российских установок для получения шестифтористого урана, который служит загрузкой для каскадов по обогащению изотопов¹⁰.

Официально неизвестно, какой процесс (или процессы) будет использован для переработки ВОУ из военного арсенала в шестифтористый уран. Коммерческое производство шестифтористого урана в России основано на фторировании окислов урана или четырехфтористого урана путем впрыскивания их мелкого порошка в пламя фтора в одноступенчатом пламенном реакторе (фторирование с введением порошка)¹¹. Прямое приспособление этого процесса под ВОУ может оказаться затруднительным из-за технических проблем и проблем безопасности (с точки зрения критичности). Как заявили сотрудники Минатома, промышленностью разработана технология прямого фторирования ВОУ¹². Исследования по прямому фторированию ВОУ проводились в 70-х и 80-х годах на опытной установке "Фрегат" в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР, Димитровград)¹³. Технология была предназначена для выделения ВОУ из отработанного топлива реактора на быстрых нейтронах БОР-60. Она содержала прямое фторирование измельченного вещества в реакции со фтором и азотом, очищение шестифтористого урана в конденсационно-испарительных колонках из фтористого натрия (NaF) и конденсирование газового шестифтористого урана в холодном конденсаторе¹⁴. Промежуточные фтораты урана отфильтровывались на химической поглотительной колонке и возвращались в реактор.

Будучи примененным к оружейному урану, этот процесс выдаст ВОУ в виде шестифтористого урана, который затем будет конденсирован в цилиндры и переправлен на разбавляющую установку. Как сообщалось, разбавление шестифтористого ВОУ путем смешивания с 1,5-процентным обогащенным ураном и одновременная очистка от примесей происходит на газовых центрифугах. Разбавляющий материал (1,5-процентный НОУ) может быть произведен на работающих каскадах предприятия путем обогащения накопленных ранее урановых отходов. Обогащенный до 4,4 процентов продукт будет поступать в стандартные 2,5-тонные цилиндры для перевозки типа 30В. Предприятие в Верх-Нейвинске может переработать до 20 тонн ВОУ в год¹⁵.

Полная оценка степени защищенности при переработке и разбавлении ВОУ невозможна без тщательного ознакомления с проектом предприятия и схемой перемещения материала, технологическими процессами и практическими мерами безопасности. Однако можно прийти к некоторым заключениям из понимания общих принципов операций с ураном на типичном предприятии, перерабатывающем ВОУ в виде металла и UF₆. Этот анализ применим только к стандартным операциям и не отвечает за необычные события, вызванные аварией, возникновением критичности, пожаром или крупной неисправностью аппаратуры. При проектировании системы мер предосторожности для конкретного предприятия следует особо рассматривать такие возможности.

Характерные проблемы охраны ВОУ во время переработки и разбавления вытекают из масштаба перерабатываемой деятельности, множественности потоков материала и различия физических, химических и изотопных характеристик соединений ВОУ. Дополнительные трудности возникают от размера завода и числа рабочих, потоков неядерных материалов (включая растворы обеззараживающих средств и удаляемых отходов, газовые фтористые соединения, газовые очистители оборудования, содержащее химических ловушек и т.п.), наличия оборудования для операций прерывающей переработки и ремонта, а также от ненадежного дозиметрического контроля за ВОУ, находящимся за металлическими экранами. Наибольшую проблему для внутренних мер безопасности могут представить те этапы, которые связываются с менее опасными формами урана на стадии переработки, с прямым и законным доступом к материалу во время обработки и взятия проб, с множеством операций по обращению с отходами и с потенциально менее строгими требованиями к сохранности и безопасности отходов.

Ниже мы охарактеризуем процессы и степень защищенности ВОУ более детально.

Подготовка ВОУ к процессу фторирования. ВОУ со склада ядерного оружия будет приведен в надлежащее состояние, чтобы стать сырьем для процесса переработки. Обработка металлического оружейного урана, возможно, связана с изменением его физического состояния (дробление, рубка и растирание) и превращением металла в окись урана. Обычно операции с металлическим ураном производятся в "сухом шкафу", который похож на стандартный шкаф с перчатками за исключением того, что он не полностью герметизирован; имеется открытое окошко, через которое рабочие могут просунуть руки для выполнения операций, включая удаление материала вручную¹⁶. С точки зрения гарантий охраны основное беспокойство, связанное с этими операциями, следует из прямого и длительного доступа к ВОУ в таких формах, которые не представляют риска для здоровья или не нарушают безопасность. Особенно трудно принимать меры предосторожности при операциях в сухом шкафу, так как неосуществимы простые автоматизированные сигналы тревоги, включаемые при несанкционированном выносе материала из сухого шкафа¹⁷, и поскольку наличие оборудования обычно затрудняет прямое наблюдение за персоналом, особенно на предприятиях со старым оборудо-

ваннем.

Выборочное исследование и смешивание ВОУ с НОУ. Шестифтористый уран (именно в таком виде появляется материал после переработки) относительно недоступен для персонала в рабочей зоне за исключением тех мест, где берутся пробы¹⁸. С точки зрения гарантий охраны взятие проб может стать источником риска, потому что персонал получает прямой доступ к материалу. В принципе, можно использовать закономерность и регулярность операции, чтобы замаскировать несанкционированную деятельность. Взятие проб будет проводиться сразу после заполнения цилиндров в выпускной секции рабочей зоны¹⁹. Процедура опробования включает в себя нагрев цилиндра в автоклаве для растаивания и перемешивания шестифтористого урана и последующего заполнения пробного цилиндра жидким UF_6 . Пробный цилиндр будет переправлен в аналитическую лабораторию предприятия для определения процентного содержания U-235. Основной сценарий хищения связан с заливкой шестифтористого ВОУ во внештатный цилиндр при взятии пробы и с последующим тайным выносом этого цилиндра с территории предприятия. Существует также риск непосредственного хищения относительно легкого и небольшого цилиндра с шестифтористым ВОУ со склада или из зон обработки до того, как шестифтористый ВОУ направляется на разбавление²⁰.

Обращение с отходами. Переработка и разбавление создадут значительное количество загрязненных ураном отходов. В экспериментах Минатома по разработке процесса переработки ВОУ многие невозвращаемые потери урана (отходы) происходят в золе фторирующего реактора (0,25 процента производства урана) и в сорбционных колонках (0,2 процента). Более важные невозвращаемые потери (лом) - около трех процентов от производства, происходят в конденсоре. При темпах переработки 50 килограммов ВОУ в день это будет соответствовать примерно 0,23 и 1,5 килограммам ВОУ в день в отходах и ломе, соответственно, но американские эксперты ожидают меньшего количества лома (около одного процента производства) при крупномасштабных операциях. Дополнительные количества урана накопятся за длительное время в химических ловушках (окись алюминия)²¹ и будут содержаться в потоках других отходов²². Урановый лом будет отослан на восстановительную установку, где его подвергнут выщелачиванию азотной кислотой, после чего из раствора будет выделен уран. Экстрагирование будет сопровождаться прокаливанием, чтобы получить окись урана, которая возвратится обратно в основной процесс. Твердые вещества фильтров и невозвращаемые твердые отходы будут взвешены, проанализированы на содержание делящихся веществ и отправлены на сторону для захоронения.

В операциях по обработке отходов и лома контроль за материалом и его бухгалтерия могут быть поставлены под угрозу очень большими неопределенностями, связанными с проверкой потоков неоднородных и необъятных отходов и лома²³. Это может представлять значительные проблемы для мер предосторожности по двум причинам: (1) при проверке контейнеров с отходами и ломом можно сильно недооценить содержание ВОУ, когда тот находится за металлическим экраном (2) значительно более трудно измеряемые потоки урана и запасы материала

приводят к тому, что неопределенности при учете на перерабатывающем и разбавляющем предприятии оказываются существенно выше любых других допустимых неопределенностей измерений.

Скрытый вынос материала с предприятия. Большинство сценариев хищения ВОУ содержит сам акт хищения с разрешенного места в зоне обработки материала и вынос материала с предприятия. Особый риск для безопасности может заключаться в укрытии значительных количеств ВОУ в урнах для отходов. После заполнения этих урн их вывозят за пределы зон доступа к материалу (ЗДМ), где они будут находиться в менее охраняемой обстановке; далее урны с отходами можно тайно вскрыть, чтобы незаконно приобрести спрятанный в них ВОУ. Таким образом, контейнеры с отходами в ЗДМ создают потенциальный путь для тайного проноса ВОУ за пределы территории. Вообще говоря, контейнеры, мешки и упаковки всех типов, вывозимые из ЗДМ, являются потенциальными путями для тайного выноса ВОУ наружу.

Кроме того, ВОУ можно спрятать в оборудовании для ремонта, которое относительно часто должно устанавливаться для необходимых ремонтных работ, когда ВОУ находится в местах, доступных для рабочих. В частности, много мест, куда можно спрятать ВОУ, содержат сварочные аппараты, но и другие типы ремонтного оборудования также вызывают беспокойство.

Еще один важный риск для безопасности связан с выходом через проходную, который можно использовать для тайного выноса ВОУ. Конкретно, персонал может просто выходить на улицу, спрятав ВОУ на своих телах. Риск увеличивается возможностью того, что спрятанный таким образом ВОУ может быть помещен в футляр из свинца или другого экранирующего вещества. Большое число персонала и частые выходы за территорию делают путь тайного проноса через проходные особенно серьезным источником риска для системы безопасности.

СТЕПЕНЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ МЕР ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Опасность хищения ВОУ может быть смягчена системой внутреннего учета и контроля. В число важных элементов этой системы входят:

- учет материалов и контроль за процессом;
- визуальное наблюдение;
- проверка на проходных;
- проверка отходов.

Но эффективность отдельных мер предосторожности может оказаться недостаточной из-за технических ограничений и процедурных слабостей. Более того, экономический нажим на функционирование завода может привести к нехватке достаточной полноты в системе защиты материала. Далее, маленькие зарплаты могут вызвать личные проблемы, что повысит опасность тайного сговора сотрудников для переправки ВОУ на черный рынок. Ниже мы дадим краткую характеристику основных средств защиты мер предосторожности.

Проблема учета и контроля за процессом. Завод для переработки и разбавления будет обладать очень высокой производительностью, в среднем по 50 килограммов ВОУ в день за первые пять лет и по 150 килограммов в день в последующие годы. Таким об-

разом, завод по "размеру" будет соответствовать очень крупному заводу по переработке ядерного топлива²⁴. На таких крупных заводах "обычная" бухгалтерия не сможет скорее всего обнаружить расхождения в 150 килограммов (или даже больше) ВОУ за год, даже когда не будет никакой фальсификации²⁵. Даже учет почти в реальном масштабе времени (если применять его не в заранее установленных местах, как на больших заводах по переработке топлива) не сможет, вообще говоря, обнаруживать стабильный "ручек" хищений или потерь такого же порядка величины²⁶.

Неопределенности в данных по учету и в заключениях, основанных на этих данных, возрастут, если осуществление программы мер предосторожности оказалось бы неполным. Кроме того неопределенности при учете могли бы увеличиться, если потоки сырья и/или продукта имеют разный изотопный состав и если не проводится стандартная физическая вычитка оставшегося материала в период между двумя последовательными загрузками.

Контроль за процессом, включающий в себя частый сбор и анализ данных о различных типах и аспектах производственных операций, мог бы частично компенсировать неопределенности измерений материала. Но чтобы стать эффективной, система контроля за процессом должна быть особенно хорошо спроектированной и строго реализуемой.

Проблемы визуального надзора. Визуальный надзор - важная мера предосторожности, стандартно используемая на российских ядерных предприятиях. Визуальный надзор включает в себя наблюдение за производственными операциями и выполняющим их персоналом, а также осуществление правила двух или трех человек. Однако персональное наблюдение, как внутренняя мера предосторожности, обладает следующими характерными слабостями:

- восприимчивость к тайному сговору;
- нежелание доносить на коллегу по работе;
- помехи с полем зрения, особенно на старых заводах;
- отвлечение внимания на другие обязанности;
- неспособность опознавать несанкционированные действия;
- недостаточное число наблюдателей.

Некоторые из этих аспектов зависят от конкретной задачи, операционной обстановки или ситуации. Справочник американской Комиссии по ядерным правилам так характеризует проблемы надзора²⁷:

Визуальному надзору могут быть присущи некоторые врожденные проблемы. Использование двух рабочих для наблюдения друг за другом может стать восприимчивым к тайному сговору. Хотя можно уменьшить эту восприимчивость, меняя распределение по парам так, чтобы не иметь постоянных пар, любая система или процедура надзора, которая полагается на надзор за коллегой по работе, должна осознавать нежелание большинства рабочих доносить на своего коллегу. Такой тип системы может обладать также ограниченной эффективностью, когда рабочие в ходе своей нормальной деятельности не могут видеть друг друга или должны уделить все внимание конкурирующему заданию. Кроме того, система надзора, полагающаяся исключительно на надсмотрщика или приборы дистанционного видения, может неблагоприятно пов-

лиять на моральное состояние рабочего.

Ограничения проверки на проходных. Проверка на проходных - неременная мера предосторожности, применяемая на предприятиях, имеющих дело с ВОУ, для сдерживания и обнаружения несанкционированного выноса ВОУ из ЗДМ или с предприятия. Характерной чертой типичных мониторов на проходных предприятий, работающих с ВОУ, является присутствие пассивного детектора гамма-излучения и детектора металлических изделий. Возможности такого проверяющего оборудования серьезно ограничены (как описывается ниже). Кроме того, проверка на проходных при использовании неавтоматизированных детекторов подвержена серьезным ограничениям, свойственным людям²⁸. Эти технические и человеческие факторы могут способствовать тому, что значительные количества ВОУ, накопленные за длительное время, проследуют без обнаружения через основные проходные.

Техническая возможность обнаружения заэкранированного переработанного ВОУ оказывается низкой из-за очень слабой интенсивности нейтронного излучения и малой проникающей способности излучаемых гамма-квантов²⁹. Типичные гамма-детекторы на проходных при неблагоприятных условиях обычно обнаруживают не меньше, чем 10 грамм неэкранированного и переработанного металлического ВОУ на проходящем человеке и не меньше 300 граммов металлического ВОУ, если он закрыт свинцовым экраном толщиной 1,6 миллиметра (около 60 граммов свинца). Детекторы металла не могут обнаруживать свинец с хорошей чувствительностью: эффективный порог составляет 100 граммов свинца в виде твердого металла. Более того, детекторы металла не смогут обнаружить свинец в виде порошка (например, в виде окиси свинца); это строгое ограничение на способность обнаружения экранирующего материала³⁰.

Даже в тех ЗДМ, где ВОУ находится в виде шестифтористого урана, который испускает нейтроны от спонтанного деления с интенсивностью, достаточной для некоторых приложений при защите материала³¹, нейтронные детекторы на выходе из помещения окажутся непрактичными для обнаружения ВОУ, скрываемого персоналом. Действительно, при нормальном проходе через контроль нейтронный детектор на проходной вряд ли обнаружит шестифтористый уран, обогащенный до 90 процентов, если масса незаэкранированного образца составит 75 граммов (около 50 граммов ВОУ). Даже если нейтронный монитор на выходе изготовлен с оптимальной эффективностью обнаружения, для умеренной вероятности обнаружения проноса образца шестифтористого урана с обогащением 90 процентов надо, чтобы источник содержал около 130 граммов ВОУ³².

Укрывательство в больших контейнерах и в оборудовании. ВОУ-компоненты боеголовки или сравнимую массу металлического ВОУ, помещенные в цилиндрический барабан большого диаметра, о котором заявлено, что он не содержит ядерного материала, можно было бы с успехом заэкранировать от обнаружения, если ВОУ практически не содержит U-232. Неспособность обнаружить большой кусок ВОУ, если он окружен тяжелым экраном, является значительной слабостью, потому что отдельным крупным и тяжелым "неядерным" барабанам обычно разрешается находиться в ЗДМ и они свободны от

досмотра после того, как покинут эти зоны.

Частично на эту слабость указали Феттер и др. в статье "Обнаружение ядерных боеголовок", помещенной в журнале "Наука и всеобщая безопасность" (т.1, выпуск 3), где показано, что экран из вольфрама толщиной в три сантиметра, окружающий компоненты оружия из ВОУ (с очень малым содержанием U-232), делает ВОУ необнаружимым практическими средствами гамма-мониторинга³³. Эквивалентное экранирование от гамма-излучения обеспечат восемь сантиметров железа или пять сантиметров свинца. Эффективное экранирование от обнаружения методом активного нейтронного анализа (от источника Cf-252) будет обеспечено двадцатью сантиметрами хорошо борированного полиэтилена или двадцатью сантиметрами плотного полиэтилена, не содержащего бор, но отделенного от металлического ВОУ тонким слоем кадмия³⁴.

Большие количества металлического ВОУ, не содержащего практически U-232, можно при помощи всего лишь умеренного количества экранирующих материалов сделать необнаружимыми, если поместить их в стандартные барабаны 200-Д, которые предназначены для отходов. В самом деле, несколько килограммов такого металлического ВОУ, окруженных некоторым количеством описанного выше экранирующего материала, дадут такие же показания при измерениях радиации, что и обычное количество отходов ВОУ.

Аналогично, существуют пределы детектирования ВОУ, запрятанного в оборудовании. Как указывалось выше, толстый слой тяжелого металла, окружающий переработанный ВОУ, служит эффективным экраном. Соответственно, оборудование из тяжелого металла, имеющее внутри себя места для спрятавания, может служить экраном, чтобы предотвратить обнаружение техническими средствами больших количеств ВОУ, находящегося внутри оборудования.

НЕКОТОРЫЕ ОСУЩЕСТВИМЫЕ МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ТАЙНОГО ВЫНОСА ВОУ СОТРУДНИКАМИ ЗА ПРЕДЕЛЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ И РАЗБАВЛЕНИЮ

В конечном итоге защита ВОУ на предприятии по переработке и разбавлению должно быть обеспечено современной, тщательно объединенной в одно целое системой безопасности. В США на заводе ВОУ, сравнимом с заводом в Верх-Нейвинске, потребовалась бы внутренняя система контроля, включающая в себя неукоснительные процедуры и методики, в том числе визуальный надзор, учет материалов, контроль за процессом и отдельными деталями, а также меры по стандартной физической защите и надежности персонала³⁵.

Как утверждают американские эксперты, такой усложненной системы безопасности нет на заводе по переработке и разбавлению в Верх-Нейвинске. Разработка ее потребует, по крайней мере, 18-24 месяца; в нее войдут сбор и анализ информации о заводе, проектирование, осуществление и интеграция компонентов мер предосторожности, обучение инспекторов по безопасности и поставка оборудования³⁶. Эта деятельность должна проводиться как часть более крупной инициативы, направленной на разра-

ботку национальной системы ядерной безопасности в России.

Отвечающая всем требованиям охрана ВОУ на заводе по переработке и разбавлению оказывается невозможной без этих всесторонних, тщательно интегрированных и точно выполненных элементов безопасности³⁷. Однако есть ряд осуществимых мер, которые можно разместить относительно быстро и которые смогут повысить защищенность ВОУ путем реального блокирования некоторых путей для тайного выноса ВОУ из ЗДМ или с завода.

Небольшие контролируемые участки. Разделение всего завода на относительно небольшие контролируемые участки в целях безопасности значительно поднимет эффективность мер предосторожности. Такое разделение увеличит чувствительность и полезность учета материалов и наблюдения за процессом. В частности, оно улучшит способность обнаруживать и локализовать значительную возможную утечку, если она происходит в пределах данного участка. Такой подход используется на предприятиях ВОУ в США в соответствии с порядком, установленным Комиссией по ядерным правилам; статистические проверки неожиданных крупных потерь и постепенных утечек выполняются практически в реальном времени³⁸.

Обыск персонала на выходе в поисках скрытого ВОУ. Чтобы препятствовать сговору сотрудников, охрана объектов и персонала на границах ЗДМ должна быть крепкой и сочетать значительное дублирование с независимостью³⁹.

Американская Комиссия по ядерным правилам указывает⁴⁰:

Прежде, чем выйти из ЗДМ, все люди, транспортные средства, упаковки и другие материалы должны быть обысканы в поисках скрытого ВОУ. Этот обыск должен проводиться с использованием как детекторов металла, так и оборудования для обнаружения ВОУ. Система обнаружения металла, используемая для поиска скрытого и заэкранированного ВОУ, должна быть способной обнаружить с эффективностью, по крайней мере, 90 процентов, как минимум, 100 граммов неферромагнитного металла (или экрана), упрятанного в любом месте на человеке ... Люди должны пройти два отдельных обыска, прежде чем покинуть ЗДМ. Подходящий метод проведения этих обысков заключается в том, чтобы потребовать у человека пройти через два разных набора оборудования для обнаружения металла и ВОУ, причем каждый из них обслуживается отдельным сотрудником службы безопасности.

Требования перемены одежды делает осуществимым чувствительную проверку детектирования металла (способную обнаружить 100 граммов негранулированного свинца с допустимой частотой ложных сигналов), что делает возможным ее стандартное применение. Надзор при требуемой перемене одежды служит дополнительной мерой предосторожности, используемой на некоторых предприятиях. Например, в Японии "весь персонал, входящий на японские ядерные предприятия или выходящий оттуда, должен полностью переменить одежду под наблюдением охранников", как сообщают эксперты по безопасности из Лос-Аламосской национальной лаборатории⁴¹.

Ограничения на проверку и доступ к ядерным контейнерам. Основной принцип заключается в том,

чтобы строго ограничить ввоз упаковок и контейнеров в ЗДМ. Где только возможно, химические вещества должны накачиваться по трубам, а на трубах должны быть надежные контрольные клапаны, чтобы предотвратить несанкционированный отток материала из ЗДМ⁴². В частности, нельзя допускать в ЗДМ газовые баллоны, поскольку у них толстые стенки, а их внутренности нельзя проверить визуально при помощи современных технических средств. Допускаемые в ЗДМ неядерные контейнеры должны, где это осуществимо, иметь такую форму, чтобы сделать невозможным экранирование многих десятков граммов ВОУ внутри контейнера от обнаружения доступными проверочными приборами.

В общем случае внутренности контейнеров, поступающих в ЗДМ, должны проверяться визуально, где только это возможно. Вызывающие вопросы контейнеры должны быть вскрыты, а их содержимое подвергнуто инспекции до того, как будет позволено пересечь границы ЗДМ. При технической проверке можно использовать рентгеновские снимки, гамма-просвечивание, устройства для пассивного гамма-детектирования и активного нейтронного анализа.

Проверка контейнеров с отходами и ограничения на них. Немедленной необходимой мерой безопасности для защиты от использования контейнеров с отходами в качестве транспортных средств, чтобы тайно выносить ВОУ из ЗДМ, должно стать строгое принуждение выполнять требования о том, что все находящиеся в ЗДМ контейнеры должны быть закрыты и опечатаны за исключением того момента, когда отходы загружаются в контейнер^{43,44}. Операция загрузки контейнера отходами должна выполняться под строгим надзором. Там, где это возможно, загружаемые отходы должны находиться в не очень больших, прозрачных пакетах или поступать в виде небольших кусков, чтобы предотвратить загрузку необнаружимого скрытого ВОУ (или отпугнуть от нее). Кроме того, использование ручного гамма-детектора для проверки загружаемых отходов в ящики может обеспечить некоторую защиту от скрытия ВОУ в отходах.

Следует отделить отходы с высокой плотностью от отходов с низкой плотностью для повышения эффективности проверки. Сразу же после закрытия каждого контейнера с отходами его надо запечатать с гарантией от порчи печати, промерить при помощи неразрушающих средств анализа и переправить в зону с контролируемым доступом. Периодически (в том числе и перед отправкой) надо удостовериться, что контейнеры и печати остались нетронутыми.

После короткого НИРа окажется технически осуществимой частичная "фиксация" ВОУ. Конкретно, окажется возможным предотвратить кражу килограммовых количеств ВОУ, спрятанных в стандартных контейнерах для отходов, если слегка изменить форму контейнеров по сравнению со стандартными мусорными барабанами 200-Д. Новые контейнеры могли бы иметь те же самые внешние размеры, как и современные барабаны, но их форма вместо цилиндрической должна стать кольцевой: каждый барабан будет иметь в центре цилиндрическую дырку на всю высоту⁴⁵. Анализ контейнера с отходами на делящийся уран при помощи измерений гамма-излучения или активного нейтронного анализа, проводимых слегка усовершенствованными стандартными приборами для испытания отходов (например, сегменти-

рованными гамма-сканерами и перемещающимся источником калифорния), окажется способной уверенно детектировать избыточное экранирование и/или резко избыточное содержание U-235⁴⁶. Характерной чертой усовершенствования станут использование детектора в центральной вертикальной области (внутри дыры) и соответствующие измерения прохождения излучения. Такими средствами можно также сильно улучшить точность анализа отходов⁴⁷.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществление американо-российского соглашения по высокообогащенному урану в результате предоставления возможности разбавить сотен тонн высокообогащенного урана до малообогащенного урана, не способного к использованию в ядерных вооружениях, и ускорения демонтажа бывшего советского ядерного оружия окажется важным шагом для нераспространения ядерного оружия. Но чтобы препятствовать хищению сотрудниками значительных количеств ВОУ, необходимо спроектировать и осуществить систему строгих предупредительных мер безопасности на российском заводе по переработке и разбавлению ВОУ.

Незащищенность ВОУ на этом заводе возникнет из-за большой абсолютной неопределенности в данных по учету материала, длительного непосредственного доступа рабочих к ВОУ в ходе всего процесса и низкой вероятности обнаружить заэкранированный ВОУ. Основные угрозы защищенности подытожены в табл. 1.

Система мер предосторожности должна предохранять от всех реальных сценариев несанкционированного удаления ВОУ с завода. С точки зрения нераспространения разумной целью является предотвращение несанкционированного похищения в течение года такого количества ВОУ, которого хватило бы на одну бомбу. Несмотря на ограничения проверки, связанной с материальной бухгалтерией, здравая система безопасности должна, в принципе, оказаться способной обеспечить желаемую охрану.

Следует хорошо задокументировать и проводить в жизнь процедуры безопасности. Кроме стандартных элементов физической защиты, важные меры предосторожности включают в себя следующее: прямой визуальный надзор, учет материалов, слежение за процессом и отдельными его участками, всеобщее использование печатей и других устройств, указывающих на незаконное вмешательство, для контейнеров и оборудования, обязательное использование на проходных различных проверочных постов для персонала, выходящего из ЗДМ, и эффективные процедуры для предотвращения необнаружимого скрытого выноса ВОУ в контейнерах или в ремонтном оборудовании. Хотя тщательная организация и объединение в единое целое системы мер предосторожности на заводе потребуют два года, необходимо осуществить хорошо продуманную комбинацию мер безопасности для предотвращения хищения ВОУ сотрудниками.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. New York Times, 24 October 1991 (Op Ed).
2. Соединенные Штаты указали, что они могут передать ответственность вновь образованной

Таблица 1
Некоторые возможности хищения ВОУ и меры предосторожности на большом заводе
по переработке и разбавлению ВОУ

Опасные участки	Проблемы	Меры безопасности	Ограничения эффективности мер
Участки преобразования ВОУ	Длительный прямой доступ работников к ВОУ	Наблюдение	Ошибка в отождествлении действий, человеческий фактор
Участки сбора UF_6 ВОУ	Частый прямой доступ работников к ВОУ	Физическая безопасность и наблюдение	Ограничения наблюдений
Проходные для персонала в ЗДМ ¹	Возможный путь хищения ВОУ	Наблюдения детекторами металлов и радиации; смена спецодежды под наблюдением	Технические ограничения ² и человеческий фактор
Участки монтажа оборудования для ЗДМ ¹	Подготовка защищенных мест для скрытия ВОУ и возможное средство хищения	Наблюдение	Ограничения наблюдений
Контейнеры для ядерных материалов для ЗДМ ¹	Возможное средство хищения ВОУ	Ограничение числа контейнеров, специальные конструкции и визуальная инспекция	Технические ограничения ³ и человеческий фактор
Контейнеры для отходов для ЗДМ ¹	Возможное средство хищения ВОУ	Специальная конструкция, опечатывание, наблюдение	Технические ограничения ⁴ и ограничения наблюдений
Участки производства больших объемов	Большие неточности учета материалов	Разбиение участка на малые контролируемые области	Неточности учета материалов

¹ ЗДМ - области доступа к материалам.
² Чувствительность детекторов составляет примерно 10 граммов незащищенного ВОУ и 300 граммов защищенного ВОУ.
³ При неразрушающем контроле могут быть пропущены несколько килограммов ВОУ, окруженных тяжелой защитой.
⁴ При неразрушающем контроле в стандартном 200-литровом контейнере для отходов могут быть скрыты несколько килограммов защищенного урана.

Американской корпорации по обогащению (USEC).

3. Для производства одного килограмма 4,4-процентного урана требуется около 6,04 SWU и 9,98 килограммов шестифтористого природного урана. Сейчас на рынке за наличные можно купить один килограмм UF_6 и килограммовую SWU примерно за 25-31 доллар и 68-75 долларов, соответственно (Nuclear Fuel, 7 June 1993). Таким образом производство одного килограмма 4,4-процентного урана стоит 660-762 доллара.
4. Долгосрочные цены по контрактам МЭ лежат в интервале 90-118 долларов за SWU. Газодиффузионные заводы МЭ производят SWU по цене 60 долларов за единицу; но в эту цену не входят накладные расходы (администрация, управление, охрана, прибыль и т.д.).
5. В этой статье термин "физическая защита" по-

нимается в том же смысле, как и в американской терминологии по мерам безопасности. Тогда как в контексте международной безопасности общеевропейское значение "физической защиты", применяемое на уровне предприятия, включает в себя полный спектр внутренних профилактических мер безопасности на предприятии, американское значение более ограничено: в частности, физическая защита в США - это только один компонент внутренней системы безопасности, а в число других компонентов входят контроль за материалом, учет материала и надежность персонала. Хотя четыре компонента накладываются и определение каждого из них отличается некоей гибкостью, физическая защита включает в себя меры по физической безопасности, например, контроль над входом и выходом и физические барьеры, технический

- надзор и системы тревоги, а также использование персонала службы безопасности.
6. Около 80 килограммов НОУ было украдено с предприятия Минатома в Глазове. Материал был перехвачен при попытке тайно перевезти его в Польшу ("Коммерсант", 23 февраля 1993 г.).
 7. Как сообщает Nuclear Fuel (21 June 1993), ВОУ от бывшего советского оружия может содержать примеси U-234 и U-236. Наличие U-234 создает проблемы для производителей топлива из-за увеличения радиоактивности благодаря реакции (α, n) в шестифтористом уране; U-236 создает проблему с реактивностью, так как он действует подобно яду для реакторной сборки. Допустимый уровень этих примесей составляет 10 000 ppm и 5000 ppm от U-235 для U-236 и U-234, соответственно. Кроме того похоже, что ВОУ от оружия загрязнен химически (остатки припоя и т.п.). Анализ материала при приемке будет, вероятно, включать гравиметрические методы и масс-спектрономию газового состава для проведения анализа урана и определения содержания U-235, а также некоторые методы измерения примесей.
 8. Интервью с ответственным представителем Минатома, 12 марта 1993 года.
 9. D. Albright, F. Berkhout, W. Walker, World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992 (Oxford: Oxford University Press, 1993), p. 55.
 10. Другое предприятие для переработки находится в Ангарске (O. Bukharin, "The Structure and the Production Capabilities of Nuclear Fuel Cycle in the Countries of the Former Soviet Union", Princeton University, Center for Energy and Environmental Studies, Report No.274, January 1993). Уран и фтор образуют очень важные соединения для использования в ядерной промышленности. В отличие от окислов урана шестифтористый уран химически стехиометричен, а ^{19}F является единственным изотопом фтора. Шестифтористый уран сублимируется из твердой фазы в газовую при 57 С. При слегка более высоких давлениях (1,5 атмосферы) и температуре (65 С) вещество становится жидким. Эти свойства делают шестифтористый уран исключительно удобным в качестве сырья для предприятий разделения урана на основе газовой диффузии или газового центрифугирования. Шестифтористым ураном широко торгуют на мировом рынке ядерного топлива и он используется как сырье для заводов, изготавливающих топливо для ядерных энергетических реакторов.
 11. Nuexco, "Conversion and Enrichment in the U.S.-S.R.," NUEXCO Monthly Report, No.272, 1991.
 12. Е. Микерин, Семинар по демонтажу ядерных боеголовок в Лондоне, 18 июня 1992 года.
 13. Дискуссия основана на статье "Pilot-Scale Regeneration of Uranium Spent Fuel from the BOR-60 Reactor Using a Fluorination Approach," P-18 (284), NIIAR, Dimitrovgrad, 1976.
 14. NaF поглощает UF_6 при температуре 100 С и выделяет его при 400 С. Оставшиеся после реакции газы прокачиваются через колонку из NaF при температуре 100 С. Чистый UF_6 затем выделяется, когда колонку нагревают до 400 С.
 15. E. Mikerin, "The Uranium Supply Picture through 2010, Russia," International Uranium Seminar 92, USCEA, 20-23 September 1992, Nevada. При темпах переработки 10 тонн ВОУ в год и двухстах рабочих днях завода в год завод будет перерабатывать 50 килограммов ВОУ ежедневно, что соответствует количеству урана, содержащемуся в двух-трех боеголовках.
 16. Герметизированные шкафы с перчатками можно использовать в тех случаях, когда уран вызывает проблемы с α -загрязнением. Их можно также использовать для контроля над материалами и в целях учета, чтобы предотвратить проливание материала (называемое также "нарушением процесса").
 17. Для герметизированных шкафов с перчатками практически иметь автоматизированные системы тревоги, которые сигнализируют о несанкционированном открытии двери шкафа или окна для изъятия содержимого. Открытие двери или окна без включения сигнала потребует присутствия второго человека, одновременно нажимающего на кнопку, которая отключает сигнал тревоги. Удаление перчаток приведет к аномальному росту давления внутри шкафа, что должно заставить сигнал тревоги.
 18. Шестифтористый уран представляет значительную опасность для здоровья, влияя на легкие, желудок и кожу. Как тяжелый металл, уран повреждает почки. Особую опасность для людей и биоты представляет фтористый водород, возникающий от разложения UF_6 в присутствии влаги в реакции $\text{UF}_6 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$. Концентрации HF выше 10^6 микрограмм на кубический метр считаются смертельными (при работе в течение 8 часов предельное значение концентрации HF равно $2,5 \cdot 10^2$ мкг/м³). Кроме того, шестифтористый уран очень активен химически: он напрямую реагирует с органическими веществами и разрушает их: он образует очень едкую кислоту при смеси с водой, а реакция жидкого шестифтористого урана с водородом может привести к взрыву. Таким образом, правила безопасности требуют проверять поверхности и воздух внутри предприятия. Типичные меры для быстрого обнаружения утечек UF_6 включают контроль за давлением в системе процесса, контроль электропроводности (в присутствии UF_6 она возрастает), непрерывное слежение за сточными и вентиляционными трубами и взятие проб воздуха. Оборудование для процесса спроектировано так, чтобы не пропускать воздух и обеспечить достаточное удержание и изоляцию, если произойдет любая утечка UF_6 . Извлечение продукта, пыли, промежуточных соединений фтора, золы и других содержащих фтор отходов производится в вакууме, а оборудование очищается инертными газами перед остановкой работы завода или ремонтом.
 19. В США обычно из одного цилиндра берутся две пробы: одна для немедленного анализа, а вторая - для возможной проверки нейтральным посредником. ("Safeguards for Enrichment Plants," Final Report, B&R 50-19-02-03, FIN A3147-6, Brookhaven National Laboratory, December 1978.) Для взятия пробы шестифтористого ВОУ обычно используется цилиндр типа 1S. Его длина около 28 см, а диаметр 4 см и он вмещает до 0,45 кг

- шестифтористого ВОУ. ("Nuclear Material Safeguards for Enrichment Plants. Part 3. Gas Centrifuge Enrichment Plant: Description, Material Control and Accountability Procedures, and IAEA Safeguards," К/ИТР-156/РЗ/Р1 [ISPO-284/РЗ/Р1]. Prepared by Martin Marietta Energy Systems Inc. for the safeguards training course, 14-18 November 1988, Vienna, p.75.)
20. На американских предприятиях обычно используется для снабжения шестифтористым ВОУ цилиндры 5А или 5В длиной 90 см и диаметром 13 см, которые вмещают около 25 кг шестифтористого ВОУ и весят 50 кг с наполнителем. ("Nuclear Material Safeguards for Enrichment Plants. Part 3. Gas Centrifuge Enrichment Plant: Description, Material Control and Accountability Procedures, and IAEA Safeguards," p.79.)
 21. Ловушки используются для удаления следов шестифтористого урана из выхлопных газов вакуумных насосов и для захвата его при авариях.
 22. Другие потоки отходов содержат загрязненные жидкости для смазки и насосов, загрязненные легковоспламеняющиеся предметы (перчатки, бумажные салфетки, фильтровальная бумага, чехлы для обуви и т.д.), подлежащие сжиганию, зола от сжигания и промывочные растворы после очистки оборудования и удаления осадков из цилиндров. Содержащие уран осадки образуются при реакции $UF_6 + \alpha$ -излучение = $UF_x + (6-x)/2 F_2$, где x - целое число от 1 до 5.
 23. Невозможно получить "представительные" образцы неоднородной смеси или лома. Неопределенности при неразрушающем анализе отходов и лома урана могут оказаться большими из-за геометрических неоднородностей в распределении урана и благодаря изменению состава и распределения других веществ, которые влияют на обнаружение искомого излучения и/или на его испускание.
 24. Перерабатывающий завод THORP в Соединенном Королевстве был спроектирован для переработки шести тонн топлива легководного ядерного реактора в день. На одну тонну отработанного топлива приходится восемь килограммов плутония, так что при такой производительности ежедневно производится 48 килограммов плутония.
 25. В самом деле, неопределенность учета $\pm 0,5$ процента (для примера) преобразуется в ± 50 килограммов в год за первые несколько лет и в ± 150 килограммов в год за последовательные годы. Для того, чтобы возникли сомнения о возможных пропажах, "потребуется" расхождения в учете, по крайней мере, втрое превышающие эти цифры. Таким образом, в этом диапазоне расхождений один только обычный учет не приведет к тревоге. Неопределенности порядка $\pm 0,5$ процента выглядят реалистичными особенно в том случае, когда степень обогащения входного или выходного потоков слегка меняется. Основной вклад в неопределенность учета дадут потоки материалов и запасы, которые измеряются плохо, то-есть, отходы, лом и "пробки" в технологических трубах. Количество отходов и лома может значительно вырасти в результате проливания материала ("нарушения процесса").
 26. Это заключение основывается на предположении, что на заводе нет данных по измерениям почти в реальном времени за значительный период, во время которого определению не было утечки материала. Вообще говоря, бухгалтерия почти в реальном времени не может отличить хищение "тонким ручейком" от естественных утечек такого типа и смещения измерительного порога. Естественные "потери" происходят (например) в виде появления пробок вещества в технологическом оборудовании или в трубах; их величина не может быть точно измерена без очистки оборудования и труб. В смещение измерительного порога входит ошибка калибровки.
 27. U.S. Nuclear Regulatory Guide 5.14, "Use of Observation (Visual Surveillance) Techniques in Material Access Areas," Revision 1, May 1980, p.5.1-4-2.
 28. Из-за недостатка бдительности и других человеческих факторов ручной обыск персонала на загруженных проходных кажется нереалистичным. Типичная частота ошибок из-за человеческого фактора составляет, как сообщается, 20 процентов. D.Albright, "Portal Monitoring for Detecting Fissile Materials and Chemical Explosives," in Reversing the Arms Race (London: Gordon & Breach, 1990 p.242 and notes 2 and 3 on p.260.
 29. Переработанный ВОУ содержит U-232, который испускает проникающее гамма-излучение и может гораздо легче оказаться обнаруженным.
 30. Смотрите R.E.Fehlau, "An Application Guide to Pedestrian SNM [spectral nuclear material] Monitors," Los Alamos National Laboratory report A-10633-MS, February 1986. Пороговые количества обнаружимого ВОУ, однако, меняются в зависимости от гамма-фона и скорости прохождения мимо измерительного поста. Попытки тайного проноса ВОУ через измерительный пост на проходной подразумевают логически быстрое прохождение, если это возможно, для ослабления обнаружения по гамма-лучам.
 31. Нейтроны образуются в реакции α -частиц от распада урана с фтором (это т.н. α -n реакция). В обогащенном уране α -излучение в основном связано с малосодержащимся изотопом U-234, концентрация которого возрастает с ростом обогащения ураном-235. Следовательно, частота испускания нейтронов от шестифтористого урана увеличивается со степенью обогащения. (В природном уране, состоящем из 99,3 процентов U-238, 0,7 процентов U-235 и 0,006 процентов U-234, частоты излучения α -частиц, связанные с U-238 и U-234, примерно одни и те же и значительно выше того, что вносит U-235. При обогащении увеличивается соотношение изотопов U-234 и U-235, а также концентрация U-235.)
 32. R.J.Riley and D.Williams (at Harwell Laboratory, U.K.) "A New Swinging Door Safeguards Monitor," Proceedings of the Sixth Annual European Safeguards Research and Development Association (ESARDA) Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Venice, Italy, 14-18 May 1984; J.W.Tape, M.P.Baker, R.Strittmatter, M.Jain, and M.L.Evans (Los Alamos Scientific Laboratory), "Selected Nondestructive Assay Instrumen-

- tation for an International Safeguards System at Uranium Enrichment Plants," Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Albuquerque, New Mexico, 16-18 July 1979. В первой статье обсуждается нейтронный монитор на пропускном пункте, где большие детекторы на He-3 помещены в полиэтиленовые камеры для оптимизации эффективности обнаружения; монитор обнаруживает с 50-процентной вероятностью проносимый источник, испускающий 1000 нейтронов деления в секунду. Во второй статье на рис. 2 указано, что пять килограммов шестифтористого урана с обогащением 90 процентов испускают, примерно, $2,5 \cdot 10^4$ нейтронов в секунду. Это соответствует только пяти нейтронам на грамм UF_6 , или 8,2 нейтронам в секунду на грамм U-235.
33. С.Феттер, В.А.Фролов, М.Миллер, О.Ф.Прилуцкий, С.Н.Родионов и Р.З.Сагдеев, "Обнаружение ядерных боеголовок", Наука и всеобщая безопасность, т.1, выпуск 3, 1991.
 34. P.M.Rinard, E.L.Adams, H.O.Menlove and J.K.Sprinkle Jr., "The Nondestructive Assay of 55-Gallon Drums Containing Uranium and Transuranic Waste Using Passive-Active Shufflers," Los Alamos National Laboratory report LA-12446-MS, November 1992. На стр. 31 и 33 приведены некоторые результаты по сокрытию. Хотя приведенные экспериментальные результаты для экранированного U-235 относятся конкретно к образцу, содержавшему 100 граммов U-235, результаты можно экстраполировать до компактного куска ВОУ массой в несколько килограммов и, возможно, даже до ВОУ-компонентов оружия в основном из-за различия в плотности материала. В самом деле, большая масса компактного ВОУ сильно самоэкранирована по отношению к проверке тепловыми нейтронами, в то время как эффекты самоэкранировки в экспериментальном образце ВОУ с малой плотностью были относительно небольшими (меньше примерно на два порядка величины). (Экспериментальный образец - это окисел 93-процентного ВОУ с плотностью около $2,5 \text{ г/см}^3$, имеющий длинную цилиндрическую форму. (Частное сообщение Ховарда Менлава и Эда Адамса из Лос-Аламосской национальной лаборатории, 9 сентября 1993 года.)
 35. Требования безопасности для предприятий, получивших лицензию Американской комиссии по ядерным правилам, систематизированы в справочнике "U.S. Code of Federal Regulations" (Title 10; Part 70 - Domestic Licensing of Special Nuclear Material, 70-58-Fundamental nuclear material controls; Part 73 - Physical Protection of Plants and Materials; Part 74] Subpart E - Formula Quantities of Special Nuclear Material.) 10 C.F.R. Subpart E содержит правила NRC по контролю за материалом и учету для ВОУ-заводов. Правила МЭ США похожи на правила NRC, они помещены в DOE Order Series 5633. DOE5633A - Control and Accountability of Nuclear Materials; DOE-5632A -Physical Protection of Special Nuclear Materials. Guide for Implementation of DOE-5633.3A (February 1993).
 36. Внутренний материал Брукхейвенской национальной лаборатории.
 37. Система должна быть так сконпонована, чтобы скомпенсировать слабость отдельных ее компонентов. В частности, компоновка системы требуется для обеспечения возможности обнаружить небольшие утечки: частые, но не очень большие утечки будут обнаружены с разумной вероятностью путем случайных проверок, если система безопасности достаточно "плотна" по отношению ко всем допустимым сценариям утечек.
 38. Смотрите 10 C.F.R. Part 74 Subpart E (ссылка 35).
 39. "Design of a Material Control and Accounting System to Protect Against Concealment of Diversions by Falsification and Collusion," U.S. Nuclear Regulatory Commission guidance document NU-REG/CR-5003, October 1987, p.17.
 40. U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 5.7, "Entry/Exit Control for Protected Areas, Vital Areas, and Material Access Areas," Revision 1, May 1980, p.5.7-4.
 41. E.A.Hakkila and G.W.Eccleston (at Los Alamos National Laboratory), Comment in Journal of Nuclear Materials Management, October 1990 to January 1991, p.8.
 42. Правильность операций контрольных клапанов надо проверять мониторами клапанов. Эта методика описана в докладе H.D.Haynes and W.S.Farmer, "Assessment of Diagnostic Methods for Determining Degradation of Check Valves," presented at the U.S. NRC Aging research Information Conference, 24-27 March 1992, Rockville, MD.
 43. Это требование обычно обязательно для американских ВОУ-заводов. Частное сообщение должностных лиц американской системы безопасности, 1993 год.
 44. Для стандартного применения в контейнерах для отходов удобно было бы использовать лампы.
 45. Если радиус цилиндрического отверстия в контейнере равен примерно 12 см, толщина кольцевого контейнера между внутренней и наружной стенками будет около 15 см, а полный объем составит около 160 литров. H.M.Hunt, "A New Approach to Waste Monitoring in Material Access Areas," Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Scottsdale, Arizona, 18-22 July 1993, pp.930-934.
 46. Литература с описанием сегментированного гамма-сканера и зондирующего Cf-источника нейтронов имеется в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ДФТД) в виде многостраничных "Замечаний по использованию" для каждого из них, а также в виде более длинных отчетов. Особенно подходит отчет по Cf-источнику P.M.Rinard, E.L. Adams, H.O.Menlove, and J.K.Sprinkle Jr., "The Nondestructive Assay of 55-Gallon Drums Containing Uranium and Transuranic Waste Using Passive-Active Shufflers," LANL report LA-12446-MS, November 1992.
 47. Прогресс в приборах для анализа отходов будет отличаться использованием детектора внутри вертикального отверстия вокруг вертикальной оси контейнера как для измерения прохождения излучения через контейнер, так и для обнаружения излучения его содержимого. Основной задачей измерения прохождения станет обнаружение локализованной сильно экранирован-

ной области; поэтому такие измерения будут производиться в автоматическом режиме с вращением контейнера, вертикальным перемещением источника проникающего излучения и непрерывной регистрацией данных. (В такой кольцевой геометрии не требуется специальный коллиматор для измерения прохождения нейтронов, предназначенного обнаружить избыточное экранирование.) Современные гамма- и нейтронные приборы для анализа отходов будут усовер-

шенствованы в таком направлении. При подобной переделке конструкции контейнеров и измерительных приборов все относящиеся к делу методики анализа будут давать более точные и надежные анализы, а также четче обнаруживать существенные аномалии. Точность анализа и обнаружение скрытого материала в отходах ВОУ при использовании Cf-источника могли бы привести к наиболее заметной выгоде.