



С. В. МАСТЕРОВ
 Специалист первой категории
 московского филиала
 инженеринговой компании
 «Атомстройэкспорт»
 (Нижегород).
 Соавтор ряда
 публикаций, посвященных
 мерам повышения
 самозащитности урана
 с помощью изотопной
 денатурации. Основное
 направление научной
 деятельности – анализ
 проблем ядерного
 нераспространения
 и повышения внутренней
 защищенности
 ядерных материалов
 по отношению к возможным
 несанкционированным
 действиям с ними.

E-mail:
 m.s.v@bk.ru



А. А. КРАСНОБОРОДЬКО
 Кандидат физ.-матем.
 наук, доцент кафедры
 «Теоретическая
 и экспериментальная
 физика ядерных
 реакторов» Национального
 исследовательского
 ядерного университета
 «МИФИ», преподает
 ряд курсов по физической
 защите ядерных объектов.
 Координатор по культуре
 ядерной безопасности МИФИ.
 Член рабочей группы МАГАТЭ
 по развитию международного
 образовательного портала
 по ядерной безопасности.

E-mail:
 AAKrasnoborodko@mephi.ru

использования ядерных материалов, поэтому
 необходимы разработка и обоснование методов
 количественной оценки защищенности ядерных
 материалов от несанкционированных действий,
 а также обоснование способов повышения
 их защищенности. Для количественной оценки
 защищенности предлагается концепция
 риска несанкционированного использования
 ядерных материалов. Получены соотношения
 для расчета вероятности реализации цепочки
 несанкционированных действий и ущерба
 от возможного немирного применения ядерных
 материалов. Приведен пример использования
 концепции риска и модели поиска объектов
 несанкционированных действий с ядерными
 материалами в задаче сравнительной оценки
 защищенности высокообогащенного урана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

вероятность обнаружения, защищенность, изотопная денатурация,
 несанкционированные действия, обогащение урана, риск,
 физико-химическая модификация материала, эффективность
 регистрации, ядерный материал.

Концептуальный ПОДХОД к анализу риска использования ядерных материалов в неэнергетических ЦЕЛЯХ



В. Б. ГЛЕБОВ
 Кандидат техн. наук,
 старший научный
 сотрудник Национального
 исследовательского
 ядерного университета
 «МИФИ». Соавтор ряда
 публикаций, посвященных
 оценке уязвимости урана
 различного обогащения
 и разработке мер повышения
 его самозащитности
 с помощью изотопной
 денатурации. Основное
 направление научной
 деятельности – анализ
 уязвимости ядерных
 материалов по отношению
 к возможным
 несанкционированным
 действиям с ними
 и разработка мер и средств
 противодействия
 незаконному обороту ядерных
 материалов.

E-mail: VBGlebov@mephi.ru



А. Б. БАТЕЕВ
 Кандидат физ.-матем. наук,
 доцент Национального
 исследовательского ядерного
 университета «МИФИ». Основное
 направления научной деятельности –
 применение ядерно-
 физических методов
 для изучения свойств
 ядерных материалов,
 их защищенность
 от несанкционированного
 использования, мессбауровская
 спектроскопия, изучение
 составов циркониевых сплавов
 и их оксидных пленок.

E-mail: Bateev@rambler.ru

Введение

Развитие практически любой отрасли экономики и страны в целом неразрывно связано с потреблением энергии. При этом ограниченность ресурсов органического топлива явно ощущается уже сейчас. В связи с этим в ряде стран приняты и реализуются планы по развитию ядерной энергетики (ЯЭ), причем даже в тех, где ранее ею не занимались (Турция, ОАЭ, Беларусь, Вьетнам, Бангладеш, Иордания, Марокко и др.). С развитием ЯЭ связано распространение ядерных материалов (ЯМ) и соответствующая потенциальная опасность их использования для создания ядерного взрывного устройства (ЯВУ). Чем шире будет распространяться в мире ЯЭ, тем выше вероятность использования ЯМ в неэнергетических целях и появления государств либо отдельных групп людей, обладающих ядерным оружием. В этих условиях возникает закономерный вопрос: как соразмерить пользу от использования ЯМ с растущей опасностью, которую они таят в себе?

Прежде всего нужно уметь рассчитывать соответствующие величины. Оценка пользы от ЯМ определяется детально разработанными методами экономической эффективности ЯЭ, поэтому далее мы обратимся к оценке опасности ЯМ. Вопрос состоит в том, чего конкретно следует опасаться. В первую очередь того, что ЯМ будет применен в разрушительных целях и с катастрофическими последствиями, ущерб будет оцениваться многими миллионами и даже миллиардами долларов. Следовательно, опасность ЯМ можно оценивать исходя из представлений о риске:

$$R = PD, \quad (1)$$

где P – вероятность создания и применения ЯВУ; D – величина потенциального ущерба, наносимого использованием ЯМ в разрушительных целях. В задачах ядерного нераспространения ущерб от применения ЯВУ принято измерять как его энерговыход, который зависит от свойств и массы ЯМ.

Интуитивно понятно, что ущерб от применения ЯВУ может быть огромным, и Хиросима с Нагасаки тому подтверждение. Почему тогда террористы до сих пор не применили ЯВУ в целях устрашения? Очевидно, из-за малой вероятности P , благодаря которой величина самого риска меньше, чем, к примеру, в случае с тринитротолуолом (ТНТ), который всюду используется террористами. Каким образом удавалось удерживать P на столь низком уровне? Главным направлением в решении этой задачи было и остается обеспечение недоступности ЯМ по отношению к любым несанкционированным действиям (НСД) с ними.

Некоторые специфические черты НСД с ЯМ

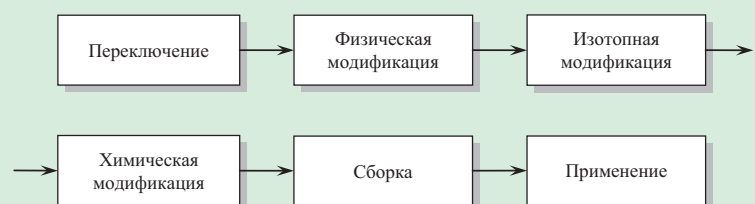
Меры учета, контроля и физической защиты ЯМ реализуют стратегию создания условий недоступности ЯМ по отношению к НСД на каждом ядерном объекте. Например, в соответствии с законом Российской Федерации «Об использовании атомной энергии» [1, ст. 22, 49] на каждом ядерном объекте налажены учет, контроль и физическая защита ЯМ. За ними установлен надзор со стороны государства. Однако если эти условия где-либо будут нарушены, что может произойти с ЯМ? Как оценить опасность ЯМ, когда материал оказывается вне действия объектовых мер учета, контроля и защиты (переключенный ЯМ), и что надо делать в новых условиях?

Важным условием противодействия угрозам использования переключенного ЯМ для ЯВУ является наличие системы контроля за незаконным оборотом ЯМ. Внешний мониторинг нерегламентированной деятельности с ЯМ может быть выражен в различных стратегиях поиска возможных объектов НСД. Дело в том, что, в отличие от санкционированной деятельности, незаконное обращение ЯМ имеет следующие признаки:

- скрытность проведения несанкционированных работ: уровень скрытности определяется как свойствами переключенного ЯМ, так и затратами (финансовыми) нарушителя;
- стремление нарушителя создать ЯВУ с максимальным разрушительным действием;
- стремление сократить время проведения несанкционированных работ с учетом наличия внешнего контроля за НСД.

С позиции достижения конечных целей нарушителя эти тенденции являются противоречивыми. Так, стремление создать ЯВУ с максимальным разрушительным действием связано с применением усовершенствованных технологий переработки переключенного материала. Последнее потребует целой цепочки технологических переделов, а значит, увеличенного потребления ресурсов и времени на проведение работ. Все это в целом приведет к снижению уровня скрытности работ и повышению вероятности обнаружения. На рис. 1 приведена типичная цепочка НСД нарушителя при попытке ис-

Рис. 1. Пример цепочки НСД



пользования урана в ЯВУ. Для противодействия ей на разных этапах используются те или иные меры защиты. Например, на этапе переключения (хищения) – меры и средства внешней (физической) защиты ядерных объектов, учета и контроля самих ЯМ. На последней стадии играет роль только самозащищенность ЯМ – совокупность свойств, которые препятствуют их несанкционированному использованию (изотопное разбавление, фон, тепловое излучение, масса, габариты объектов с ЯМ и др.). Самозащищенность определяет ущерб от применения ЯВУ. Для промежуточных стадий цепочки НСД (стадий технологического передела вывезенного за пределы ядерного объекта материала и сборки) характерно то, что успешность деятельности нарушителя определяется вероятностью его обнаружения. Последняя величина допускает построение относительно простой схемы для ее оценки на основе задания примерной длительности каждой стадии, определения индикаторов поиска переключенного ЯМ и эффективности поисковых мер.

Модель поиска объектов НСД с ЯМ

В рамках имеющейся системы мониторинга нерегламентированной деятельности вероятность создания и применения ЯВУ P зависит от возможностей нарушителя, начального состояния ЯМ, конечного состояния материала. Ее можно определить как

$$P = P(F, S_n \rightarrow S_k), \quad (2)$$

где F – возможности нарушителя, характеризующиеся располагаемыми фондами и доступной технологической базой; S_n – начальное состояние ЯМ, характеризующееся массой, физической формой, химическим составом, активностью, местоположением и др.; S_k – конечное состояние ЯМ (конструкция ЯВУ, местоположение, химический состав, изотопный состав, активность и др.). Величина потенциального ущерба D зависит от конечного состояния ЯМ, $D = D(S_k)$.

При рассмотрении различных стратегий поиска возможных объектов НСД предполагалось рациональное поведение нарушителя, которое выражается в принятии некоторого компромисса между стремлением создать ЯВУ с максимальным разрушительным действием и повышением вероятности обнаружения при увеличении масштаба работ и переходе к усовершенствованным технологиям переработки исходного материала (например, тонкой очистке материала от примесей, обогащению и т. д.).

Модель рационального поведения нарушителя позволяет считать, что он будет следовать взвешенному плану действий с учетом отмеченного

выше обстоятельства. Таким образом, риск создания и применения ЯВУ имеет максимум и принимает наибольшее значение на границе области возможных действий нарушителя либо внутри нее. Само наибольшее значение и его положение в области возможных действий, конечно, зависят от уровня внешнего мониторинга нерегламентированной деятельности и от финансовых возможностей нарушителя.

Вышеизложенное является основанием для упрощения анализа путем применения консервативного подхода с оценкой сверху риска использования ЯМ для создания и применения ЯВУ. В рамках этого подхода зависимость вероятности P достижения целей нарушителя (успешного завершения цепочки НСД) от конечного состояния и путей перевода ЯМ из начального состояния в конечное $S_n \rightarrow S_k$ заменяется следующей оценкой сверху:

$$R_{\max}(F, S_n) = \max_{S_k} (P(F, S_n \rightarrow S_k) \cdot D(S_k)). \quad (3)$$

Следует отметить, что очень высокие уровни обогащения, очевидно, предпочтительны, и разумно предположить, что нарушитель, имеющий доступ к технологии обогащения урана, приложит все усилия, чтобы обогатить имеющиеся запасы урана до оружейного качества, т. е. до 90% и выше [2, с. 7]. Допустим, максимум риска находится на правой границе области возможных обогащений урана. С точки зрения практического применения консервативного подхода это означает фиксацию конечного обогащения урана x_k (например, $x_k \geq 0,9$). При этом масса ЯМ в конечном состоянии определяется количеством исходного урана либо величиной работы по изотопному разделению U_{\max} .

Применяя данный консервативный подход, можно определить защищенность ЯМ как обратную пропорциональную максимальной оценке риска: $Z = 1/R_{\max}$. При этом величина защищенности становится более наглядной и удобной, если оценивать ее относительно выбранного эталонного материала, например урана 20%-ного обогащения или ТНТ. Таким образом, величина относительной защищенности ЯМ будет зависеть лишь от количества ЯМ, его собственных свойств и соотношения между возможностями нарушителя и эффективностью поиска.

Вероятность избежать обнаружения. Индикаторы поиска НСД

Пусть имеется n объектов и мы ищем среди них объект с нерегламентированной деятельностью (НСД-объект). Для того чтобы обнаружить объект НСД, надо увидеть его и идентифицировать как НСД. Идентификация объекта означает

отсутствие либо значительное рассогласование с заявленной деятельностью. Наблюдатель, ведущий мониторинг, определяет масштаб объекта по величинам потребления ресурсов и воздействия (эмиссии излучения и фторсодержащих соединений).

Пусть S – параметр, характеризующий объект НСД (в том числе его масштаб) с точки зрения процедуры идентификации. Предположим, что ведется регулярный мониторинг объектов по параметру S со скоростью V . Время T_0 , требуемое для обнаружения НСД-объекта, составит

$$T_0 = n/V. \quad (4)$$

Формула (4) записана на основе предположении, что факт НСД может быть однозначно выявлен по результатам одной проверки. Если ее окажется недостаточно, возникнет необходимость повторной проверки объектов, что соответствует перебору с возвратом.

Обозначим через q требуемое число просмотров для идентификации объекта. В общем случае следует признать, что $q \geq 1$, значит, $T_0 = (nq)/V$.

Полагая мониторинг регулярным процессом, можно определить параметр обнаружения λ_S , который несет смысл средней частоты обнаружения НСД:

$$\lambda_S = 1/T_0 = V/(nq). \quad (5)$$

Тогда в соответствии с распределением Пуассона вероятность не обнаружить объект НСД за время t

$$P_{ndet} = e^{-\lambda_S t}. \quad (6)$$

Надо отметить, что можно обнаружить объект НСД лишь по объективно существующим признакам. Специфика НСД с целью изготовить ЯВУ свидетельствует о значимости признаков, связанных с потреблением ресурсов (энергетических, водных и др.) и воздействием на окружающую среду, т.е. эмиссией излучений и материалов). В качестве примера индикаторов поиска деятельности по изготовлению и применению ЯВУ можно назвать:

- интенсивность излучения A ;
- интенсивность эмиссии фторсодержащих соединений в атмосферу B ;
- мощность потребления ресурсов W ;
- капитальные затраты K .

По любому из этих индикаторов мы можем обнаружить либо появление нового объекта, либо изменение режима работы существующего объекта и далее сверить с заявленной деятельностью. В любом случае важна высокая чувствительность (эффективность поиска) средств обнаружения к этим признакам.

Если поиск объекта НСД ведется по нескольким независимым индикаторам, полная вероятность необнаружения представляет со-

бой произведение вероятностей необнаружения по отдельным индикаторам:

$$P_{ndet}(t) = P_{ndet}^K(t) \times P_{ndet}^W(t) \times P_{ndet}^A(t) \times P_{ndet}^B(t) = e^{-\lambda_K t} e^{-\lambda_W t} e^{-\lambda_A t} e^{-\lambda_B t}, \quad (7)$$

Откуда

$$\lambda = \lambda_K + \lambda_W + \lambda_A + \lambda_B. \quad (8)$$

Например, постоянная обнаружения λ_W равна средней частоте обнаружения объектов НСД по величине потребления ими ресурсов W . Конечно, эта величина зависит от того, насколько средства поиска чувствительны к индикатору W , а чувствительность определяет эффективность поисковых средств α_W .

Если рассматриваются цепочки НСД (укрупненные звенья подобных цепочек представлены на рис. 1), приводящие к созданию и применению ЯВУ из переключенного ЯМ, то выражение для риска использования ЯВУ можно переписать в виде

$$R = \prod_i \exp(-\lambda_i t_i) P_{неп}(t_i) D = \exp\left(-\sum_i \lambda_i t_i\right) P_{неп} D = \exp(-\lambda T) P_{неп} D \quad (9)$$

где $P_{неп}$ – вероятность непресечения действий нарушителя.

Считается, что каждая стадия i цепочки НСД может быть определена ее продолжительностью t_i и средним временем $1/\lambda_i$, требуемым для обнаружения нарушителя на i -й стадии, где λ – параметр обнаружения. При этом t_i и λ_i зависят от возможностей нарушителя F , изменения состояния ЯМ ($S_{i-1} \rightarrow S_i$) и эффективности поиска.

Связь между частными параметрами обнаружения и соответствующими индикаторами поиска можно получить, рассмотрев, например, параметр обнаружения λ_A . Очевидно, что он пропорционален площади, на которой может быть зафиксирован аномальный уровень излучения ($\lambda_A \sim S(A) \sim R^2(A) \sim A$), и эффективности поисковых средств по регистрации излучения: $\lambda_A = \alpha_A A$. Можно показать, что для параметров обнаружения λ_B , λ_W и λ_K характеристиками площади в соответствующих пространствах будут являться интенсивность эмиссии химических веществ B , мощность потребления ресурсов W и капитальные затраты K . Таким образом, каждое слагаемое в соотношении (8) представимо в виде произведения двух сомножителей:

$$\lambda_K = \alpha_K W; \quad \lambda_W = \alpha_W W; \quad \lambda_A = \alpha_A A; \quad \lambda_B = \alpha_B B. \quad (10)$$

Влияние количества и состава ЯМ на относительный риск их немирного использования

Особую опасность со стороны радикально настроенных субнациональных групп представляют простейшие ЯВУ ствольного типа, создание которых не столь трудоемко [2]. В связи с этим основным сдерживающим фактором для подобных

групп является недоступность урана. Однако, если материал оказывается вне действия мер учета, контроля и физической защиты (переключен), его защищенность (величина, обратная риску) во многом определяется составом и количеством.

Для оценки влияния количества и обогащения ЯМ на относительный риск его применения в ЯВУ удобно рассматривать уран 20%-ного обогащения или химическую взрывчатку (ТНТ) в качестве эталонных материалов. Пригодность ТНТ определяется тем, что ущерб от его применения выражается через его массу, а вероятность необнаружения при изготовлении взрывного устройства из переключенного ТНТ можно считать равной 1. Если принять, что мониторинг ведется по величине W потребляемых ресурсов, для относительного риска можно записать соотношение

$$R^U(M, x) = P(M, x) \cdot \frac{Y(M_k, x_k)}{M}, \quad (11)$$

где M, x – масса и обогащение переключенного урана; M_k, x_k – конечные масса и обогащение уранового продукта после несанкционированного передела; $P(M, x)$ – вероятность необнаружения НСД.

Таким образом, имеем математическое соотношение (11) для определения относительного риска использования урана заданного обогащения x и количества M в целях создания ЯВУ. При этом в случае отсутствия мониторинга нерегламентированной деятельности с ЯМ (эффективность поиска $\alpha = 0$) соотношение (11) описывает вариант самозащищенности ЯМ.

При изучении влияния количества и обогащения ЯМ на риск его применения

в ЯВУ следует различать два возможных сценария несанкционированного использования урана.

Сценарий 1. Переключение и использование для создания ЯВУ высокообогащенного урана (ВОУ). С позиции химико-физических переделов материала данный сценарий является наиболее простым, так как ВОУ – материал прямого использования, поэтому цепочка НСД нарушителя может не включать стадию обогащения материала.

Сценарий 2. Переключение низкообогащенного урана (НОУ). Использование НОУ для создания ЯВУ требует обязательного дальнейшего обогащения. Однако в силу большой распространенности НОУ в ядерном топливном цикле этот сценарий рассматривается как наиболее вероятный [3]. Моделирование несанкционированного использования урана в сценарии 2 является более общим случаем по сравнению со сценарием 1.

Поэтому рассмотрим его подробнее. В рамках данного сценария модель цепочки НСД нарушителя включает три основные стадии:

- физико-химический передел исходного материала; будем предполагать, что подобная НСД контролируется по потреблению ресурсов W ;
- обогащение материала в форме UF_6 ; осуществляется контроль по потреблению ресурсов и эмиссии химических веществ UF_6 в атмосферу B ;
- физико-химическая переработка обогащенного материала; в качестве индикатора рассматривается потребление ресурсов.

Сценарий НСД имеет ограничения:

- максимальное количество урана определено условиями подкритичности системы до сбора ($M \leq M_{\max}(x)$);
- нарушитель может иметь ограниченные возможности проводить разделение, например располагает лабораторной либо полупромышленной установкой для разделения изотопов, $\Delta U \leq U_{\max}$.

Для трехстадийной модели НСД вероятность необнаружения P равна

$$P(M, x) = P_1(M) \cdot P_2(M, x) \cdot P_3(M, x) \quad (12)$$

где P_i – вероятность необнаружения НСД на i -й стадии.

Подставляя конкретные выражения для вероятностей необнаружения на стадиях физико-химической переработки и обогащения уранового материала, получаем выражение для оценки относительного риска создания ЯВУ с использованием НОУ:

$$R^U(M, x) = \exp[-(a_M + a_U F(x)) M] \frac{Y(M_k, x_k)}{M}, \quad (13)$$

$$F(x) = \frac{x - x_W}{x_k - x_W} V(x_k) + \frac{x_k - x}{x_k - x_W} V(x_W) - V(x); \quad V(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x},$$

где $U = F(x)M$ – работа по обогащению НОУ, единица разделительных работ, ЕРР; a_M – эффективность регистрации НСД при физико-химических модификациях в расчете на 1 кг исходного материала; a_U – эффективность регистрации НСД при обогащении урана в расчете на 1 ЕРР; M_k – масса обогащенного урана.

Пользуясь формулой (13), получим соотношение для оценки риска в условиях наличия эффективного мониторинга за незаконным оборотом ЯМ. Пусть ε – вероятность обнаружения НСД на стадиях физико-химической модификации либо обогащения. Согласно документам МАГАТЭ [4, с. 23–24], значения вероятности обнаружения $\varepsilon > 0,9$ рассматриваются как высокие, значит, $1 - \varepsilon \ll 1$.

Эффективный мониторинг подразумевает, что на стадиях физико-химической модификации либо обогащения для любой массы M переключе-

ченного ЯМ, начиная с минимально возможного количества $M_{кр}$, для создания ЯВУ должны выполняться неравенства:

$$\exp(-a_M M) \leq 1 - \varepsilon; \quad \exp(-a_U U) \leq 1 - \varepsilon$$

где U – работа по обогащению НОУ массы M .

Следуя консервативному подходу, вероятность беспрепятственного завершения НСД оценим по верхнему пределу: $\exp(-a_{Mкр} M) = 1 - \varepsilon$; $\exp(-a_{Uкр} U) = 1 - \varepsilon$. Тогда формула (13) принимает вид

$$R^U(M, x) = \exp\left(2 \ln(1 - \varepsilon) \frac{M}{M_{кр}(x)}\right) \frac{Y(M_{кр}, x_{кр})}{M} \quad (14)$$

Пример оценки относительной защищенности урана при переключении ВОУ (сценарий 2)

В задачах ядерного нераспространения ущерб от применения ЯВУ принято измерять по его энерговыходу, который зависит от свойств и массы ЯМ. Из формулы (11) следует, что для расчета защищенности заданной массы урана необходимо оценивать энерговыход цепной реакции деления (ЦРД) в нем. Для оценки энерговыхода применялась простейшая модель протекания ЦРД – модель Карсона – Хиппеля – Лимана [5]. Параметры и условия возникновения непрекращающейся ЦРД рассчитывались посредством прямого моделирования процесса размножения нейтронов методом Монте-Карло с использованием программы MCNP-4B [6] с константным обеспечением на основе библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VI [7]. Модель и алгоритм расчета ее параметров соответствуют подходу, описанному в [8].

С точки зрения повышения внутренней защищенности ЯМ важно отметить, что инициация ЦРД может произойти раньше, чем части надкритической системы полностью соединятся. Это зависит от уровня нейтронного фона в ЯМ, и данный момент является ключевым. Если имеется возможность изменять нейтронный фон в ЯМ, то можно установить ограничение на выделяемую мощность и, таким образом, сделать эти материалы практически бесполезными для использования в ЯВУ. Такие целенаправленные изменения внутренних свойств осуществляются с помощью денатурации ЯМ.

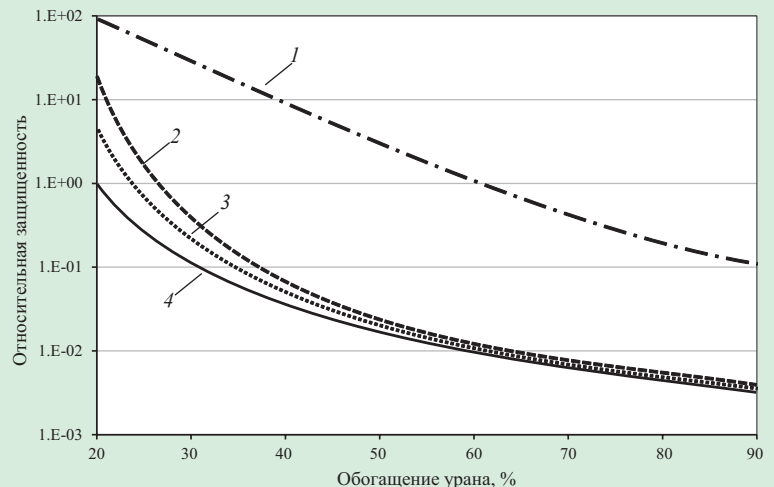
На примере металлического урана различного обогащения оценим повышение уровней его защищенности (по сравнению с уровнем самозащищенности) при внедрении мер внешнего мониторинга с различной эффективностью поиска. Сопоставим эффективность мер внешнего мониторинга с аналогичным показателем мер повыше-

ния внутренней защищенности ЯМ путем изотопной денатурации. Денатурация осуществлялась за счет добавления небольшого количества ^{232}U и приводила к повышению внутреннего нейтронного фона ЯМ.

В качестве угрозы рассматривалась модель нарушителя, который располагает достаточным количеством материала прямого использования (ВОУ) для создания ЯВУ, но не имеет доступа к мощностям по обогащению урана. Сравнение проводилось для урана различного обогащения, но в условиях единого значения надкритичности для систем в сборе.

В данном примере уровень защищенности ЯМ удобно представлять в относительных величинах, приняв за единицу уровень самозащищенности металлического урана 20%-ного обогащения. Результаты расчетов относительной защищенности металлического урана при различной эффективности мер мониторинга, а также денатурации урана изотопом ^{232}U представлены на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость относительной защищенности урана от обогащения



1 – самозащищенность денатурированного урана; 2 – высокоэффективный мониторинг; 3 – низкоэффективный мониторинг; 4 – самозащищенность металлического урана

Выводы

На основе выполненных расчетов относительной защищенности металлического урана различного состава могут быть сделаны следующие выводы. Внешние меры контроля (вне действия систем учета, контроля и физической защиты ЯМ) малоэффективны по сравнению с мерами повышения самозащищенности для высокообогащенных композиций урана. Внешний мониторинг несанкционированной деятельности с ЯМ может превосходить по эффективности меры повышения внутренней защищенности для урана с обо-

гашением < 20%. Повышение самозащищенности урана посредством денатурации (создание внутреннего источника нейтронов) слабо зависит от обогащения материала и обеспечивает приблизительно одинаковый эффект для ВОУ в широком диапазоне обогащений. Таким образом, в целях нераспространения оборот чистого ВОУ должен быть максимально ограничен, а свободный материал должен находиться в самозащищенном состоянии (например, после изотопной денатурации).

В современных условиях приходится признать, что рост масштабов ядерной энергетики как по всему миру в целом, так и в отдельных странах сопровождается ростом оборота ядерных материалов, доступностью технологий и специ-

альных знаний. Эти и другие факторы приводят к возрастанию угрозы незаконного оборота ЯМ и, как следствие, ядерного терроризма. Для снижения отмеченных угроз требуется количественный анализ факторов, влияющих на них. Другими словами, основу подготовки рекомендаций по конкретным мероприятиям по укреплению безопасности ЯМ должен составлять их количественный анализ. Предлагаемая методика и модель оценки риска неэнергетического использования ЯМ служат выработке сравнительных оценок эффективности внутренних и внешних защитных мер в отношении ЯМ на системной основе и позволяют предпринимать действия, направленные на снижение риска их распространения и нерегламентированного использования.

Список литературы:

1. Об использовании атомной энергии: Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ // Атомпро: Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.atompro.ru/docs/170-fz.php>.
2. **Glazer A.** On the proliferation potential of uranium fuel for research reactors at various enrichment levels // *Science and Global Security*. 2006. Vol. 14. P. 1–24.
3. **Алексеев П. Н., Иванов Е. А., Невиница В. А. и др.** Повышение защищенности экспортных поставок топлива легководных реакторов при использовании регенерированного урана // *Известия вузов. Сер. «Ядерная энергетика»*. 2007. № 3, вып. 2. С. 3–9.
4. IAEA Safeguard Glossary. Vienna: IAEA, 2002.
5. **Carson M. J.** Explosive properties of reactor-grade plutonium // *Science & Global Security*. 1993. Vol. 4. P. 111–128.
6. Briesmeister J. F. MCNP — A general Monte Carlo N-particle transport code — Version 4B // Los Alamos National Laboratory Report, LA-12625-M. 1997. P. 1–35.
7. National Nuclear Data Center (NNDC): Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.nndc.bnl.gov/nndcscr/documents/ndf/ndf201>.
8. **Kryuchkov E. F., Shmelev A. N., Masterov S. V. et al.** An approach to quantitative evaluation of inherent proliferation resistance of Uranium enriched up to 20% ²³⁵U // *Proc. of the 30-th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Washington, D. C., USA. October 5–9, 2008. Washington, 2008. P. 184–189.