

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ УРАНА БЛАГОДАря НАЛИЧИЮ В НЕМ ^{232}U И ПРОДУКТОВ ЕГО РАСПАДА

Г.Г. Куликов*, А.Н. Шмелев**, В.А. Апсэ**, Е.Г. Куликов**

* Госкорпорация «Росатом»

119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 24

** НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское ш., 31



Для комплексной оценки защищенности урана от несанкционированного использования благодаря наличию в нем урана-232 предложен и обоснован интегральный показатель защищенности материала. Показатель основан на физических барьерах против использования урана, которые создает уран-232. Во-первых, это радиолиз гексафторида урана, который препятствует попыткам дообогащения урана и, как следствие, значительная критическая масса. Во-вторых, жесткое γ -излучение, приводящее к недееспособности и гибели тех, кто пытается обращаться с этим материалом без средств радиационной защиты. В-третьих, повышенное тепловыделение, выводящее из строя компоненты ядерного взрывного устройства. В-четвертых, значительный источник нейтронов, вызывающий предетонацию и тем самым снижающий энергетический выход ядерного взрывного устройства. Барьеры проявляются на различных этапах обращения с ураном не только в указанном порядке, но и действуют одновременно, взаимно усиливая друг друга.

Ключевые слова: защищенность урана, интегральный показатель защищенности материала, радиолиз гексафторида урана, критическая масса, жесткое гамма-излучение, тепловыделение, источник нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

Для различных сценариев распространения и хищения ядерных материалов, которые могут быть использованы для создания ядерного взрывного устройства (ЯВУ), желательно иметь некий критерий, который бы позволял судить о привлекательности материалов для этих целей. Предложить такой критерий чрезвычайно трудно, так как на пути несанкционированного использования ядерного материала могут стоять барьеры, имеющие разную физическую природу. При объединении различных физических барьеров в единый критерий встает сложная задача оценки вклада каждого барьера в защищенность материала. Таким образом, критерий, хотя и базируется на физических процессах, однако не представляет собой некую конкретную физическую величину, а является по своей сути экспертной оценкой специалиста. Разумеется, такая оценка может носить только приближенный характер. Мало того, в зависимости от заложенных в критерий параметров вклад каждого барьера в критерий, а также привлекательность различных

© Г.Г. Куликов, А.Н. Шмелёв, В.А. Апсэ, Е.Г. Куликов, 2022

материалов могут оказаться разными. При этом может возникнуть вопрос, зачем нужен столь неопределенный критерий? К сожалению, в междисциплинарных и разнофизических задачах, когда необходимо учесть и сопоставить различные явления, до сих пор ничего лучше, чем экспертная оценка, не предложено. Иначе говоря, при выборе решения лучше руководствоваться хотя бы оценкой, чем ничем. К тому же оценка предлагается специалистами в данной области знаний, и она позволяет выявить основные закономерности, на основании которых и принимаются решения.

В США две национальные лаборатории занимаются разработкой ядерного оружия – это Лос-Аламосская и Ливерморская. В России такими центрами являются ВНИИЭФ (г. Саров) и ВНИИТФ (г. Снежинск). Лаборатории были созданы в 1942 и 1952 гг. для разработки первого в мире ядерного оружия и для ускорения работ по созданию термоядерной бомбы соответственно. Критерий привлекательности ядерного материала был разработан доктором Чарльзом Батке (Charles Bathke) из Лос-Аламосской национальной лаборатории [1], сотрудники которой прекрасно разбираются в данной проблеме.

Предполагается защита урана, наработанного в ториевом blankets термоядерного источника нейтронов, т.е. урана-233. Однако ничто не мешает рассмотреть более общую задачу о защите не только урана-233, но и урана-235, что и будет сделано.

ФИЗИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ НА ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАНА С УРАНОМ-232 В ЯВУ

На пути использования урана, содержащего уран-232, могут стоять следующие барьеры. Во-первых, при попытке обогащения урана по урану-233 (или урану-235) в центрифугах интенсивный источник α -частиц радиоактивного распада урана-232 ($T_{1/2} = 69$ лет) и дочерних нуклидов его цепочки распада может вызвать радиолит гексафторида урана, что может существенно затруднить или даже не позволить провести процесс обогащения. Во-вторых, если обогащение не будет выполнено или значительного обогащения достигнуть не удастся, то возникает второй барьер – это величина критической массы материала, которая может оказаться значительной, что приведет к значительному весу и размерам ЯВУ, т.е. затруднит использование такого материала. В-третьих, при попытке все же изготовить ЯВУ с использованием этого ядерного материала непосредственные исполнители этой работы столкнутся с жестким γ -излучением, имеющимся в цепочке распада урана-232 ($Tl-208$, $E_\gamma = 2.615$ МэВ с выходом 100%), которое может привести к облучению исполнителей и даже к смертельной дозе с мгновенным состоянием комы. В-четвертых, после сборки ЯВУ из-за тепловыделения, связанного с α -активностью урана-232 и его дочерних нуклидов, как сам ядерный материал, так и окружающие его компоненты (например, химическая взрывчатка) могут перегреться и выйти из строя. В-пятых, при попытке взорвать ЯВУ из-за мощного источника нейтронов спонтанного деления урана-232, а также нейтронов, возникающих при (α, n)-реакциях на легких по атомному весу неустраиваемых микропримесях (углерод, азот, кислород и др.), мощность взрыва может оказаться существенно меньше номинальной, вплоть до величины менее 1% от номинальной мощности. Эта так называемый случай предетонации.

Отметим, что жесткое γ -излучение, разумеется, будет облучать непосредственных исполнителей и на стадии подготовки урана к обогащению. Однако как самостоятельный барьер это не рассматривается, так как при этом уран-232 будет размешан не только в делящихся нуклидах (уран-233 и (или) уран-235), но и в сырьевых материалах (уран-238 и (или) торий-232), которых в топливе в несколько раз больше.

РАДИОЛИЗ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Первый барьер, связанный с радиолитом гексафторида урана, фактически определяет величину критической массы ядерного материала, которая в свою очередь определяет все остальные барьеры. Поэтому первый барьер не удастся учесть в критерии

вместе с остальными и приходится рассматривать его отдельно. Видимо, к такому же выводу пришли и в работе [1], поступив аналогичным образом. Отметим, что обогащение по делящемуся изотопу урана (233 или 235) является обогащением по всем легким изотопам урана, начиная с этого изотопа (233 или 235 соответственно). Таким образом, обогащение приводит к большему увеличению содержания в уране более легкого урана-232, чем урана-233 или тем более урана-235. Это усиливает все остальные барьеры защиты, связанные с ураном-232. Например, в работе [1] показано, что, если в природный уран добавить 0.03% урана-232, то в обогащенном до 3% по урану-235 (увеличение содержания в 4.2 раза по сравнению с природным 0.71%) будет уже 0.18% урана-232 (в шесть раз), а его дальнейшее обогащение до 90% по урану-235 (в 127 раз) приведет к увеличению содержания в нем урана-232 до 6.24% (в 208 раз). При этом содержание урана-234 тоже растет быстрее, чем урана-235, но медленнее, чем урана-232, с 0.005% в природном уране до 0.028 и 0.93% соответственно.

Оценим долю молекул гексафторида урана, подвергшихся радиолизу. При этом учтем, что энергия α -частицы урана-232 составляет $E_\alpha = 5.414$ МэВ, а для радиолиза одной молекулы гексафторида урана ей необходимо передать энергию $E_{\text{рад}} \approx 111$ эВ. Значит, одна α -частица способна разрушить около 48700 молекул гексафторида урана, если на это используется вся энергия α -частицы. Вклад в радиолиз других изотопов урана пренебрежимо мал. Количество ядер урана-232 во времени t описывается уравнением его радиоактивного распада:

$$N(\text{U-232}, t) = N(\text{U-232}, 0) \cdot 2^{(-t/T)},$$

где $N(\text{U-232}, 0)$ – количество ядер урана-232 в начальный момент времени; T – период его полураспада, равный 68.9 лет. Число α -частиц, испущенных ураном-232 в секунду, совпадает с его активностью:

$$A(t) = |dN(\text{U-232}, t)/dt| = N(\text{U-232}, 0) \cdot 2^{(-t/T)} \ln(2)/T = N(\text{U-232}, t) \cdot \ln(2)/T.$$

Тогда доля разрушенных молекул гексафторида урана за время Δt определяется выражением

$$\varepsilon = (E_\alpha/E_{\text{рад}}) \cdot (A(t)/N(\text{U}, t)) \cdot \Delta t,$$

где $N(\text{U}, t)$ – число всех ядер урана. Учитывая, что отношение $N(\text{U-232}, t)/N(\text{U}, t)$ – это содержание урана-232 в уране (X), получим следующую формулу:

$$\varepsilon = \ln(2) \cdot (E_\alpha/E_{\text{рад}}) \cdot X \cdot (\Delta t/T).$$

Время, в течение которого уран находится в виде гексафторида урана в обогащательном каскаде (Δt), зависит от многих характеристик каскада (числа центрифуг и их производительности, т.е. мощности каскада – количества работ разделения, которое может выполнить каскад в единицу времени), а также от количества обогащаемого материала, степени требуемого обогащения и содержания целевого нуклида в отвальном материале. Все эти параметры могут меняться в широком диапазоне и сильно зависят от степени развития технологии центрифужного обогащения. В работе [2] это время оценивается от одного дня до одного месяца. За эти промежутки времени спадом активности урана-232 можно пренебречь. В таблице 1 показана доля разрушенных молекул гексафторида урана в процессе центрифужного обогащения в различных условиях.

Таблица 1

Доля разрушенных молекул гексафторида урана в процессе центрифужного обогащения в зависимости от времени обогащения (Δt) и содержания урана-232 в уране (X)

Время обогащения, сут	Содержание U-232 в U, %		
	0.01	0.1	1.0
1	0.01	0.13	1.3
7	0.09	0.94	9.4
30	0.40	4.04	40.4

Видно, что процесс обогащения может быть серьезно нарушен при содержании урана-232 в уране на уровне 0.1 – 1% при времени обогащения порядка или более недели.

КРИТИЧЕСКАЯ МАССА

Согласно документам МАГАТЭ [3], уран с содержанием урана-235 до 20% называется низкообогащённым и считается малопригодным для создания ЯВУ, поэтому примем критическую массу голой сферы, т.е. без отражателя, из урана, содержащего 20% урана-235, равного примерно 800 кг в качестве барьера против его использования в ЯВУ.

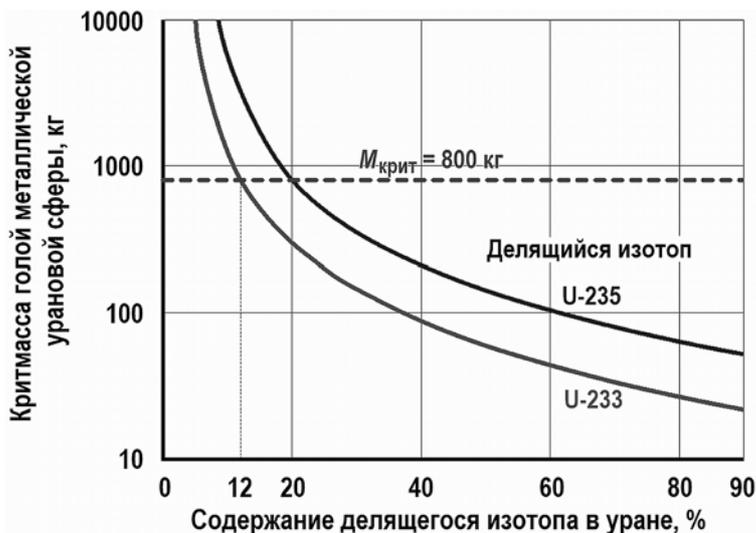


Рис. 1. Критическая масса голой металлической урановой сферы в зависимости от вида делящегося изотопа и его содержания.

Если критическая масса урана окажется меньше 800 кг, то такой материал будем считать менее защищенным, а если более 800 кг, то более защищенным. Примерно такой же критической массой характеризуется уран, содержащий 12% урана-233. Критическая масса определяется обогащением урана и делящимся изотопом (см. рис. 1). Так критическая масса 90% урана-235 составляет около 50 кг, а урана-233 – около 15 кг [4].

Расчеты голых урановых сфер с малым обогащением выполнены по программе TIME26 [5] в 26-групповом диффузионном приближении на базе библиотеки оцененных ядерных данных БНАБ-78, которая обрабатывается вспомогательной программой АРАМАКО-С1 [6], а с большим обогащением – с помощью кода MCNP, разработанного в Лос-Аламосской национальной лаборатории США с использованием методов Монте-Карло, на базе библиотеки ENDF/B-V [7].

ЖЕСТКОЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

Жесткое γ -излучение приводит к облучению обращающегося с ураном персонала, который в зависимости от времени работы с материалом может получить различную дозу излучения. Для выбора величины дозы в качестве барьера против использования урана в ЯВУ предположим, что персонал не защищен от радиации. В противном случае данный барьер не работает, т.е. предполагается, что нарушитель режима нераспространения не обладает дистанционными технологиями, имеющимися в странах с ядерным оружием, по обращению с высокорadioактивными материалами. В таблице 2 показано влияние величины разовой дозы излучения на здоровье человека [8, 9].

Нас интересует случай, когда террористы фактически не смогут работать с материалом. Это соответствует ситуации, когда они после получения разовой дозы практичес-

ки мгновенно впадают в состояние комы.

Таблица 2

Смертность человека в зависимости от полученной разовой дозы излучения

Доза радиации, бэр	Здоровье человека
100	Смертность примерно в 10% случаев в течение месяца
300 – 500	Смертность примерно в 50% случаев в течение недели
600 – 800	Смертность более чем в 50% случаев в течение нескольких дней
1000 – 5000	Мгновенное состояние комы, смерть в течение получаса
Более 8000	Мгновенная смерть

Из таблицы видно, что это наступит при получении ими дозы излучения в пределах 10 – 50 Зв. Выберем в качестве величины барьера дозу излучения из этого диапазона значений, скажем, 20 Зв. Отметим, что в работе [1] в качестве такой величины выбрано 5 Зв. Это сделано, видимо, потому, что эта величина считается летальной дозой. Однако это не означает, что при получении такой дозы террористы будут выведены из строя. Летальная доза означает смертность примерно в половине случаев и не сразу после получения дозы.

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ α -РАСПАДА

На наш взгляд, принятая в работе [1] величина барьера по тепловыделению 4500 Вт избыточна. Она определяется требованием МАГАТЭ [3] к плутонию, который должен содержать, по крайней мере, 80% плутония-238 для того, чтобы его было затруднительно использовать в ЯВУ. Тепловыделение плутония-238 составляет 570 Вт/кг, тепловыделение у плутония-239 мало, а критическая масса голых сфер обоих изотопов плутония примерно одинакова и составляет около 10 кг. Таким образом, критическая масса голой сферы из плутония, состоящего на 80% из плутония-238, составляет $570 \text{ Вт/кг} \cdot 10 \text{ кг} \cdot 80\% \approx 4500 \text{ Вт}$. В качестве величины барьера тепловыделения примем полученную ранее величину 2900 Вт, которая обеспечивает выход из строя из-за плавления всех компонентов ЯВУ в течение пяти часов после его сборки в единое целое даже при самом тщательно заранее спланированном теплоотводе от всех компонентов ЯВУ.

ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ

В работе [1] в качестве величины барьера по скорости генерации нейтронов выбрана скорость генерации нейтронов критической массой реакторного плутония, который наработан в тепловом реакторе и содержит 20% плутония-240 – основной источник нейтронов спонтанного деления в плутонии.

Поскольку плутоний-238 генерирует приблизительно $1 \cdot 10^6 \text{ н/(с}\cdot\text{кг)}$, а критическая масса реакторного плутония составляет около 34 кг, то мощность нейтронного источника из критической массы реакторного плутония с 20% плутония-240 составляет $34 \text{ кг} \cdot 20\% \cdot 10^6 \text{ н/(с}\cdot\text{кг)} = 6.8 \cdot 10^6 \text{ н/с}$. Вызывает удивление, что в работе [1] не учтены нейтроны, возникающие в результате (α, n) -реакций на легких нуклидах неустраиваемых примесей (углерод, азот, кислород и др.), находящихся в уране. Ранее было показано, что для надежной предетонации ЯВУ (с вероятностью 90%), уменьшающей энергетический выход до величины менее 1% от номинальной мощности ЯВУ, использующего оружейный уран, требуется источник нейтронов на уровне $8 \cdot 10^7 \text{ н/с}$. Примем эту величину в качестве величины барьера по источнику нейтронов.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ (ИПЗ) МАТЕРИАЛА ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Для того, чтобы в едином критерии можно было объединить различные физические величины, очевидно, что эти величины должны входить в критерий в безразмерном виде. Для этого разделим характеристики уранового ядерного материала, такие как его критическую массу, создаваемую им дозовую нагрузку, тепловыделение и скорость генерации нейтронов на соответствующие величины барьеров, принятые ранее, а именно, на критическую массу урана, обогащенного до 20% по урану-235 ($M_0 = 800$ кг), дозу, приводящую террористов в состояние комы ($D_0 = 20$ Зв), тепловыделение, выводящее из строя все компоненты ЯВУ через пять часов после сборки ($Q_0 = 2900$ Вт), источник нейтронов, приводящий к предтопации ЯВУ ($S_0 = 8 \cdot 10^7$ н/с). При этом каждая характеристика ядерного материала оценивается по тому, насколько она превышает принятый барьер безопасности, т.е. материал защищен, или находится ниже его, т.е. слабо защищен.

К сожалению, барьер, связанный с радиоллизом гексафторида урана, не удастся непосредственно включить в ИПЗ. Однако его влияние на защищенность урана рассмотрено ранее, а косвенным образом этот барьер учитывается в ИПЗ через критическую массу урана.

Составить критерий в виде произведения указанных дробей нецелесообразно, так как в начальный момент времени чистый уран-232, еще без своей цепочки распада, не излучает жесткое γ -излучение и величина дозы от материала равна нулю, значит, математически материал оказывается не защищен. В то же время у такого материала могут быть другие барьеры. Поэтому предлагается сформировать ИПЗ материала в виде суммы отдельных барьеров:

$$\text{ИПЗ} = M/M_0 + d(t) \cdot X \cdot M/D_0 + q(t) \cdot X \cdot M/Q_0 + s(t) \cdot X \cdot M/S_0, \quad (1)$$

где M – критическая масса голой сферы ядерного материала, кг; $d(t)$ – мощность дозы излучения в 30 см от 1 кг урана-232 и его дочерних нуклидов, бэр/(ч·кг); $q(t)$ – мощность тепловыделения от 1 кг урана-232 и его дочерних нуклидов, Вт/кг; $s(t)$ – мощность источника нейтронов от 1 кг урана-232 и его дочерних нуклидов, н/(с·кг); X – содержание урана-232 в уране. Характеристики $d(t)$, $q(t)$, $s(t)$ зависят от времени хранения урана-232, в течение которого образуются дочерние продукты распада урана-232, поэтому меняются со временем.

В работе [1] слабое, отвечающее за дозу излучения, возводится в степень $1/\lg(2) \approx 3.3$. Это приводит к резкому уменьшению или увеличению вклада данного барьера в критерий при дозе, соответственно, меньше или больше выбранной в качестве величины барьера (D_0). Данный подход не использовался, так как в качестве величины барьера выбрана не доза 5 Зв, как в работе [1], которая не влияет мгновенно на работоспособность человека, а существенно большая доза 20 Зв, приводящая к мгновенной коме. В работе [1] от правой части уравнения (1) берется десятичный логарифм, который вычитается из единицы, а получившееся выражение и рассматривается в качестве критерия. Столь сложная конструкция затрудняет анализ как самого критерия, так и его составляющих. В то же время величина критерия защищенности материала (1) легко интерпретируется как степень его защищенности: при величине критерия менее единицы материал можно считать слабо защищенным или незащищенным, при величине критерия равной и более единицы – защищенным, при величинах в несколько единиц – многократно защищенным.

Размножающие свойства урана-232 несколько уступают таковым урана-233 и урана-235. Однако, поскольку будет рассмотрено малое содержание урана-232 в уране, то оно слабо скажется на величине критической массы урана, и в дальнейшем не будет учитываться. По этой же причине уменьшением критической массы, связанным с распадом урана-232, также пренебрежем, хотя будут рассмотрены

интервалы времен порядка периода полураспада урана-232.

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ЗАЩИЩЕННОСТИ УРАНА

На рисунке 2 показаны мощности тепловыделения и источника нейтронов от одного килограмма урана-232, а также мощность дозы в 30 см от 1 кг урана-232 в зависимости от времени его выдержки.

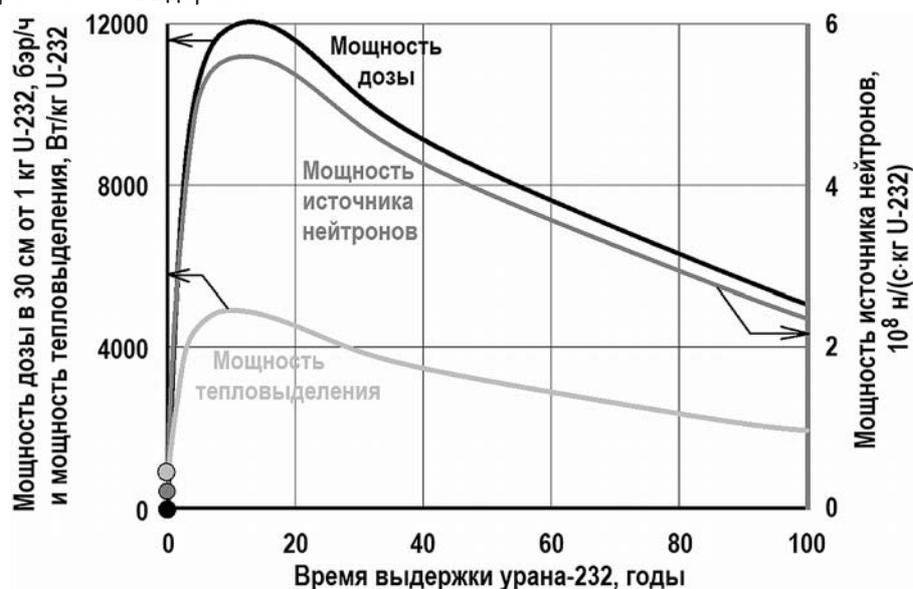


Рис. 2. Мощностные характеристики урана-232 в процессе его выдержки (1 бэр = 0.01 Зв)

Видно, что все характеристики резко растут в первые годы, достигая максимума к примерно 10 годам выдержки, а затем постепенно снижаются. Рост характеристик вызван накоплением продуктов распада урана-232, количество которых выходит на равновесный состав примерно через 10 лет. Последующий спад характеристик связан с распадом самого урана-232, который происходит сравнительно медленнее их роста из-за значительной величины периода полураспада урана-232. Отметим, что в начальный момент времени мощности тепловыделения и источника нейтронов хотя и малы, но не равны нулю, так как сам уран-232 генерирует тепло в результате α -распада и нейтроны в результате спонтанного деления и (α, n) -реакций на легких ядрах неустранимых примесей. В то же время мощность дозы в начальный момент времени равна нулю, поскольку она определяется жестким γ -излучением дочерних нуклидов урана-232, которые еще не образовались из урана-232.

При анализе рассмотрим различные величины критической массы голой урановой сферы: от 15 кг, которая соответствует обогащенному до 90% по урану-233, до 800 кг – урану, обогащенному до 20% по урану-235. В качестве других значений рассмотрим 50 кг – уран, обогащенный до 90% по урану-235, а также другие промежуточные значения. Рассмотрим такие добавки урана-232 в уран, которые обеспечат защиту материала, выраженную в *ИПЗ* на уровне более единицы в течение значительного интервала времени (100 лет), причем после непродолжительной исходной выдержки урана в течение нескольких лет.

На рисунке 3 показаны зависимости *ИПЗ* урана различной критической массы на период до 100 лет, причем содержание в нем урана-232 подобрано так, чтобы на момент времени 100 лет величина *ИПЗ* была равна единице. Как видно из зависимостей, это означает, что в течение 100 лет защищенность материала будет выше единицы. Причем, чем меньше критическая масса урана, тем значительно больше превышение защищенности

над единицей. Это объясняется тем, что малые критические массы приходится защищать другими составляющими защиты: мощностью тепловыделения, нейтронного фона и γ -излучения.

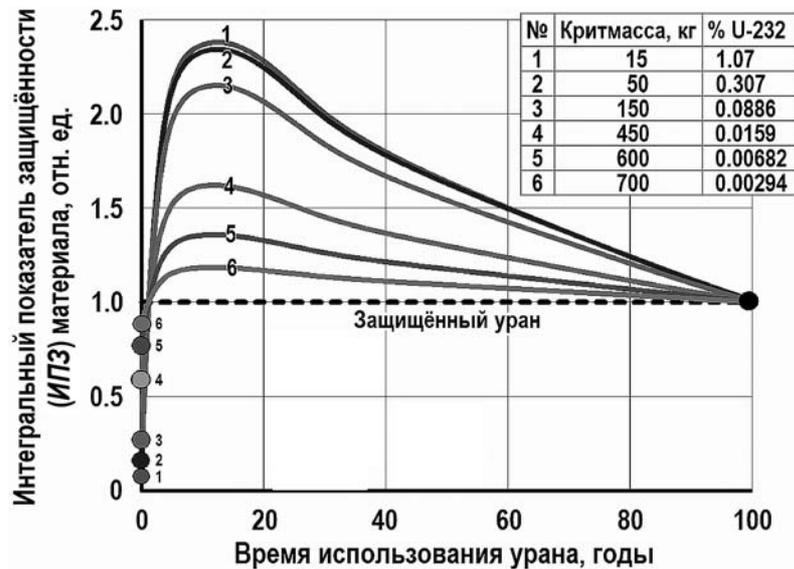


Рис. 3. По крайней мере, однократная защищенность урана различной критической массы ураном-232 в течение 100 лет

Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана при его, по крайней мере, однократной защите на 100 лет

Таблица 3

Критмасса голрой сферы, кг	Содержание урана-232, %	Кратность защиты в максимуме, отн. ед.	Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана, % (диапазон)			
			Масса	Тепло	Нейтроны	Доза
15	1.07	2.37	1 – 12	9 – 12	42 – 48	36 – 41
50	0.307	2.32	3 – 33	7 – 11	32 – 47	28 – 40
150	0.0886	2.14	9 – 63	4 – 11	18 – 44	15 – 37
450	0.0159	1.61	35 – 91	1 – 8	5 – 31	4 – 27
600	0.00682	1.35	55 – 96	1 – 5	2 – 21	2 – 18
700	0.00294	1.18	74 – 98	0 – 3	1 – 12	1 – 10

В таблице 3 приведены вклады составляющих в защищенность урана при его, по крайней мере, однократной защите на 100 лет. Видно, что по мере роста критической массы вклад этой компоненты в защищенность материала растет, а остальных составляющих уменьшается. При этом содержание урана-232 для обеспечения требуемой защиты урана уменьшается, что соответствует общим физическим представлениям.

В таблицах 4 – 6 приведены данные, аналогичные табл. 3, но для случаев более высокой защищенности урана, а именно, по крайней мере, двукратной, трехкратной и пятикратной защиты на 100 лет. Причем рассмотренные критические массы составляют до трех критических масс урана, обогащенного до 20% по урану-235, т.е. до 2400 кг. Естественно, что для повышения защищенности урана в нем приходится увеличивать содержание урана-232.

Таблица 4

Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана при его, по крайней мере, двукратной защите на 100 лет

Критмасса голой сферы, кг	Содержание урана-232, %	Кратность защиты в максимуме, отн. ед.	Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана, % (диапазон)			
			Масса	Тепло	Нейтроны	Доза
15	2.16	4.77	0.4 – 7	10 – 12	45 – 48	38 – 41
50	0.634	4.72	1 – 19	9 – 12	39 – 47	33 – 41
150	0.198	4.55	4 – 44	6 – 12	27 – 46	23 – 39
450	0.0522	4.01	14 – 74	3 – 10	12 – 41	11 – 35
600	0.0341	3.75	20 – 82	2 – 9	9 – 38	8 – 33
700	0.0263	3.58	24 – 85	2 – 9	7 – 36	6 – 31
800	0.0204	3.40	29 – 88	1 – 8	6 – 34	5 – 29

Таблица 5

Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана при его, по крайней мере, трехкратной защите на 100 лет

Критмасса голой сферы, кг	Содержание урана-232, %	Кратность защиты в максимуме, отн. ед.	Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана, % (диапазон)			
			Масса	Тепло	Нейтроны	Доза
15	3.25	7.17	0.5 – 4	10 – 12	46 – 48	39 – 41
50	0.961	7.11	1 – 14	9 – 12	41 – 48	36 – 41
150	0.307	6.95	3 – 33	7 – 12	32 – 47	28 – 40
450	0.0886	6.14	9 – 63	4 – 11	18 – 44	15 – 37
600	0.0613	6.15	12 – 71	3 – 10	14 – 42	12 – 36
700	0.0497	5.98	15 – 75	3 – 10	12 – 41	10 – 35
800	0.0409	5.80	17 – 79	2 – 10	10 – 39	9 – 34
1600	0.0102	4.40	46 – 94	1 – 6	3 – 26	3 – 22

Для случая наибольшей (пятикратной) защиты и наименьшей критической массы (15 кг) содержание урана-232 составляет значительную величину – около 5% (табл.6). Однако это не означает, что такое содержание урана-232 требуется иметь в исходном уране. Столь малая критическая масса предполагает получение террористами примерно 90% урана-233 путем его изотопного обогащения. В процессе обогащения малое исходное содержание урана-232 будет увеличиваться значительно быстрее, чем урана-233, поскольку уран-232 обладает еще меньшим атомным весом, чем обогащаемый уран-233 по сравнению с обедняемым ураном-238. В работе [1] показано, что, если в природный уран добавить всего 0.03% урана-232, то в обогащенном до 90% по урану-235 содержание урана-232 составит 6.24%.

В таблице 6 показано, что достаточно ввести в уран всего несколько сотых долей процента урана-232, чтобы пятикратно защитить уран с большими критическими массами 1600 – 2400 кг. Такие критические массы соответствуют обогащению по урану-233 ниже 12%. По нормам МАГАТЭ материал ниже этого обогащения не является материа-

лом прямого использования для создания ЯВУ. При попытке уменьшить эти большие критические массы путем обогащения приведут к непропорционально более существенному росту содержания урана-232.

Таблица 6

Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана при его, по крайней мере, пятикратной защите на 100 лет

Критмасса голый сферы, кг	Содержание урана-232, %	Кратность защиты в максимуме, отн. ед.	Вклад составляющих в интегральный показатель защищенности урана, % (диапазон)			
			Масса	Тепло	Нейтроны	Доза
15	5.43	11.97	0 – 3	11 – 12	47 – 48	40 – 41
50	1.615	11.91	0 – 9	10 – 12	44 – 48	38 – 41
150	0.525	11.75	2 – 23	8 – 12	37 – 47	32 – 40
450	0.161	11.20	5 – 49	6 – 11	25 – 45	21 – 39
600	0.116	10.97	7 – 57	5 – 11	21 – 45	18 – 38
700	0.0964	10.78	8 – 61	4 – 11	19 – 44	16 – 38
800	0.0818	10.60	9 – 65	4 – 11	17 – 43	14 – 37
1600	0.0307	9.21	22 – 83	2 – 9	8 – 37	7 – 32
2400	0.0136	7.79	39 – 92	1 – 7	4 – 29	3 – 25

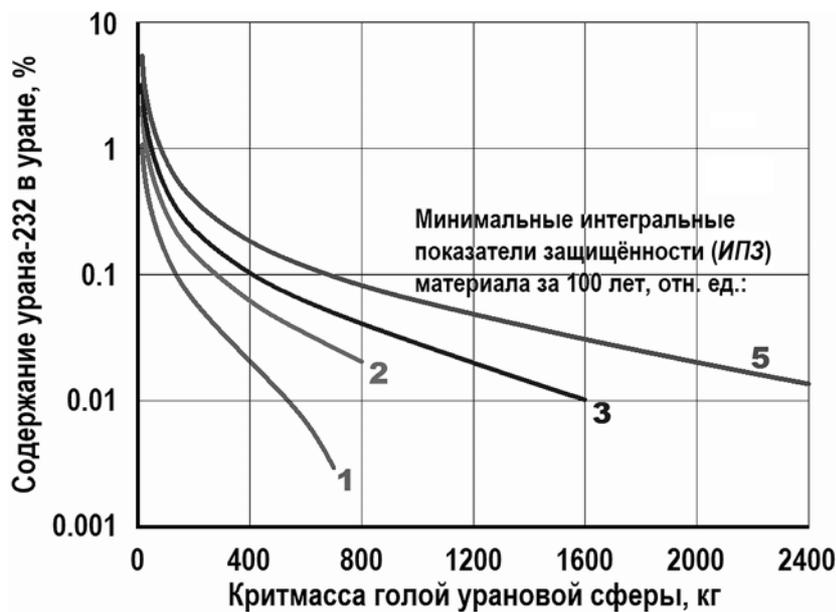


Рис. 4. Зависимость содержания урана-232 в уране от величины его критической массы при различных ИПЗ

На рисунке 4 показано требуемое содержание урана-232 в уране при различной критической массе и минимальных ИПЗ материала. Очевидно, что повышение степени защиты требует увеличения содержания урана-232. Однако для больших критических масс, которые соответствуют топливу быстрых реакторов, содержание урана-232 составляет порядка сотых долей процента.

Важно отметить, что для материалов с большими критическими массами в качестве

защиты от распространения требуется меньший источник нейтронов, чем заложено в интегральном показателе защищенности, поскольку большие массы сложно разогнать до больших скоростей или быстро осуществить их имплозию с созданием существенной надкритичности. Это приводит к увеличению времени, в течение которого из источника нейтронов возможна предетонация ЯВУ, приводящая к уменьшению его энергетического выхода. Численная оценка данного вопроса требует отдельного подробного рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для комплексной оценки защищенности урана от несанкционированного использования благодаря наличию в нем урана-232 предложен и обоснован интегральный показатель защищенности (*ИПЗ*) материала. Показатель основан на физических барьерах против использования урана, которые создает уран-232.

Во-первых, это радиолиз гексафторида урана, который препятствует попыткам добогащения урана, и, как следствие, значительная критическая масса. Во-вторых, жесткое γ -излучение, приводящее к недееспособности и гибели тех, кто пытается обращаться с этим материалом без средств радиационной защиты. В-третьих, повышенное тепловыделение, выводящее из строя компоненты ядерного взрывного устройства (ЯВУ). В-четвертых, значительный источник нейтронов, вызывающий предетонацию и тем самым снижающий энергетический выход ЯВУ. Барьеры проявляются на различных этапах обращения с ураном не только в указанном порядке, но и действуют одновременно, взаимно усиливая друг друга.

2. Выполненный анализ вклада барьеров в *ИПЗ* показывает значимость всех барьеров. Это говорит о сбалансированности предложенного *ИПЗ*. Комплексный анализ защищенности урана показал, что в зависимости от требуемой степени защиты материала и возможностей террористов по его обогащению необходимое содержание урана-232 в уране составляет от нескольких тысячных долей процента до нескольких процентов, которое можно получить в облученном ториевом бланкете термоядерного реактора, как это было показано ранее. Конкретное содержание урана-232 необходимо выбрать исходя из того, чтобы с таким ураном еще были способны обращаться страны-производители топлива, но уже чрезвычайно сложно было бы использовать террористам для создания на его основе ЯВУ.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 19-29-02006/19).

Литература

1. Bathke C.G., Ebbinghaus B.B., Collins B.A. et al. The Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios. // Nuclear Technology. – 2012. – Vol. 179. – Iss. 1. – PP. 5-30. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT10-203>.
2. Tsoulfanidis N. The Nuclear Fuel Cycle, Edition 3. – American Nuclear Society, 2013. – 460 p.
3. IAEA Safeguards Glossary, 2001 Edition. – International Nuclear Verification Series, No. 3. – 230 p.
4. De Volpi A. Denaturing Fissile Materials. // Progress in Nuclear Energy. – 1982. – Vol. 10. – PP. 161-220. DOI: [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(82\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0149-1970(82)90022-1).
5. Ансэ В.А., Шмелев А.Н. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. – М.: МИФИ, 2008. – 64 с.
6. Николаев М.Н., Абагян Л.П., Цибуля А.М. и др. Комплекс программ автоматизированного расчета макроскопических констант (АРАМАКО). – Обнинск: ФЭИ, 1972. – 60 с.

7. Куликов Е.Г., Куликов Г.Г., Апсэ В.А., Шмелев А.Н., Гераскин Н.И. Расчетная модель и физико-технические факторы, определяющие защищенность плутония. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 23-32. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2018.1.03>.

8. Куликов Е.Г., Куликов Г.Г., Апсэ В.А., Шмелев А.Н., Гераскин Н.И. Количественная оценка защищенности плутония. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2018.2.04>.

9. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиология человека и животных. – М.: Высшая школа, 2004. – 539 с.

10. Смертельная доза радиации. Электронный ресурс: https://ecotestexpress.ru/articles/smertelnaya_doza_radiatsii/ (дата доступа 10.10.2022).

Поступила в редакцию 16.10.2021 г.

Авторы

Куликов Геннадий Генрихович, главный эксперт
E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор
E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС
E-mail: apseva@mail.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент
E-mail: egkulikov@mephi.ru

UDC 621.039.58

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF PROLIFERATION PROTECTION OF URANIUM DUE TO THE PRESENCE OF ^{232}U AND ITS DECAY PRODUCTS

Kulikov G.G.*, Shmelev A.N.**, Apse V.A.**, Kulikov E.G.**

* State Atomic Energy Corporation Rosatom
24 Bolshaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

** MPhI

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

For a comprehensive analysis of proliferation protection of uranium from unauthorized use due to the presence of uranium-232 in it, an integral indicator of proliferation protection of the material has been proposed and substantiated. The indicator is based on the physical barriers against the use of uranium that uranium-232 creates. First, it is the radiolysis of uranium hexafluoride, which prevents attempts to enrich uranium and, as a consequence, a significant critical mass. Secondly, hard gamma radiation, leading to incapacity and death of those who try to handle this material without radiation protection. Thirdly, the increased heat generation, disabling the components of a nuclear explosive device. Fourth, a significant source of neutrons, causing pre-detonation and thereby reducing the energy output of a nuclear explosive device. Barriers appear at different stages of uranium handling, not only in the indicated order, but also act simultaneously, mutually reinforcing each other.

Key words: proliferation protection of uranium, integral indicator of proliferation protection of the material, radiolysis of uranium hexafluoride, critical mass, hard gamma radiation, heat generation, source of neutrons.

REFERENCES

1. Bathke C.G., Ebbinghaus B.B., Collins B.A., Sleaford B.W., Hase K.R., Robel M., Wallace R.K., Bradley K.S., Ireland J.R., Jarvinen G.D., Johnson M.W., Prichard A.W. & Smith B.W. The Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios. *Nuclear Technology*. 2012, v. 179, iss. 1, pp. 5-30; DOI: <https://doi.org/10.13182/NT10-203>.
2. Tsoulfanidis N. *The Nuclear Fuel Cycle, Edition 3*. American Nuclear Society, 2013, 460 p.
3. IAEA *Safeguards Glossary*, 2001 Edition, International Nuclear Verification Series, No. 3, 230 p.
4. De Volpi A. Denaturing Fissile Materials. *Progress in Nuclear Energy*. 1982, v. 10, pp. 161-220; DOI: [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(82\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0149-1970(82)90022-1).
5. Apse V.A., Shmelev A.N. *The Use of the TIME26 Program in Course Design of Fast Reactors and Power Plants*. Moscow. MIFI Publ., 2008, 64 p. (in Russian).
6. Nikolaev M.N., Abagyan L.P., Tsibulya A.M. et al. *Complex of Programs for Automated Calculation of Macroscopic Constants (ARAMAKO)*. Obninsk. FEI Publ., 1972, 60 p. (in Russian).
7. Kulikov E.G., Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Geraskin N.I. Computational Model and Physical and Technical Factors Determining the Plutonium Proliferation Resistance. *Nuclear Energy and Technology*. 2018, v. 4. iss. 2, pp. 93-97; DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30525>.
8. Kulikov E.G., Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Geraskin N.I. Quantitative evaluation of the plutonium proliferation resistance. *Nuclear Energy and Technology*. 2018, v. 4, iss. 3, pp. 191-195; DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.31859>.
9. Yarmonenko S.P., Vainson A.A. *Radiology of Humans and Animals*. Moscow. Vysshaya Shkola Publ., 2004, 539 p. (in Russian).
10. Lethal Dose of Radiation. Available at: https://ecotestexpress.ru/articles/smertelnaya_doza_radiatsii/ (accessed Oct. 10, 2021) (in Russian).

Authors

Kulikov Gennady Genrikhovich, Chief Expert

E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmeln@mail.ru

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Assistant Professor

E-mail: egkulikov@mephi.ru