

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПА ^{232}U ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА

Фурсова Е.А.¹, Куликов Е.Г.²

¹Фурсова Елена Анатольевна – магистрант,
кафедра управления бизнес-проектами, факультет бизнес-информатики и управления комплексными системами;

²Куликов Евгений Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент,
кафедра теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов,
Институт ядерной физики и технологии
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва

Аннотация: в статье исследуется возможность повышения защищенности высокообогащенного урана с точки зрения возможности создания ядерного взрывного устройства ствольного типа на его основе. Оценивается требуемое содержание изотопа ^{232}U , наличие которого в высокообогащенном уране приведет к заданному снижению энергетического выхода ядерного взрывного устройства ствольного типа за счет явления преждевременной детонации. Рассматривается влияние таких факторов, как вероятность преждевременной детонации и время выдержки ^{232}U .

Ключевые слова: высокообогащенный уран, ядерное взрывное устройство, явление преждевременной детонации, энергетический выход, мощность источника нейтронов, альфа-частица.

УДК 621.039

Введение

Актуальность проблем ядерного нераспространения трудно поставить под сомнение: в последнее время эта тема занимает все более приоритетное место в международной повестке дня. Договор о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) и усилия Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) хотя и существенно замедлили, но не смогли в полной мере предотвратить распространение ядерных технологий. В этой связи следует констатировать, что кроме правовых и законодательных мер, необходимо введение технологических препятствий на пути использования ядерных технологий в негражданских целях.

В литературе излагается концепция повышения защищенности высокообогащенного урана за счет включения в его состав небольшого количества ^{232}U , так как он является мощным источником нейтронов, что в свою очередь способно привести к преждевременному срабатыванию ЯВУ и пониженному энергетическому выходу [1].

Настоящая статья развивает работу [1] в том отношении, что ставится цель сделать количественную оценку необходимого содержания ^{232}U для снижения энергетического выхода ЯВУ на основе высокообогащенного урана.

1. Принцип действия ЯВУ и расчетная модель

Как известно, существует два принципиально различных типа ЯВУ: ствольное и имплозивное [1]. В ЯВУ ствольного типа две подкритические массы располагаются внутри ствола. При помощи обычного химического взрывчатого вещества одна из подкритических масс разгоняется в направлении другой, в результате чего образуется надкритическая масса, в которой развивается цепная реакция деления. ЯВУ имплозивного типа подразумевает сжатие делящегося материала за счет взрывной волны химического взрывчатого вещества; в результате резкого увеличения плотности делящегося материала при сжатии он переходит из подкритического состояния в надкритическое.

В настоящей работе рассматривается сценарий использования высокообогащенного урана для создания ЯВУ ствольного типа, так как такое устройство проще имплозивной схемы, а значит, более вероятно его неправомерная разработка.

Исходными данными являются параметры ЯВУ «Малыш», сброшенной на город Хиросима в 1945 году (табл. 1). В последующих расчетах предполагается, что движение снаряда в стволе является равноускоренным.

Таблица 1. Параметры ЯВУ ствольного типа «Малыш»

Параметр	Значение
Масса снаряда m , кг	38,5
Диаметр снаряда d , м	0,159
Длина ствола l , м	2
Скорость снаряда v , м/с	300
Время достижение максимальной надкритичности t_0 , мс	1,35
Расстояние, которое снаряд проходит от момента достижения критичности до момента максимальной надкритичности, м	0,405

Давление пороховых газов P, МПа	180
Время жизни мгновенных нейтронов τ , мкс	0,043

2. Явления преждевременной детонации

Явление преждевременной детонации заключается в том, что цепная реакция деления начинает развиваться раньше момента достижения максимальной надкритичности. Для оценки относительного энергетического выхода X в режиме преждевременной детонации используем следующее выражение [1]:

$$x = \left(\frac{90N\tau - 2\ln(1-p)}{Nt_0} \right)^{3/2}$$

где P – вероятность преждевременной детонации;

N – мощность источника нейтронов;

t_0 – время, за которое система переходит из критического состояния в состояние максимальной надкритичности;

τ – время жизни мгновенных нейтронов.

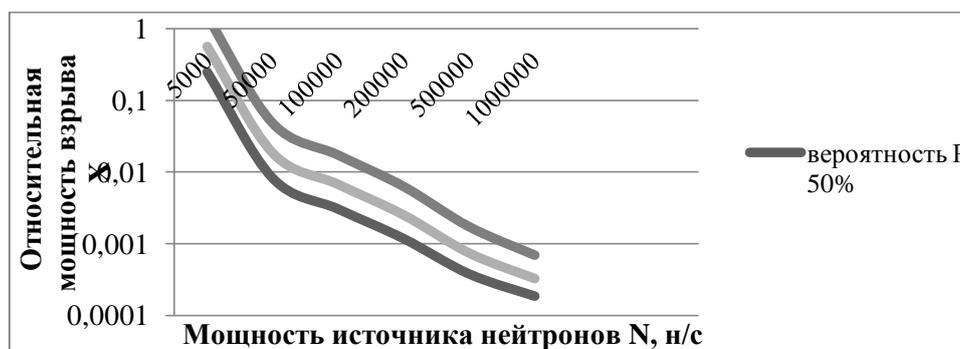


Рис. 1. Зависимость относительного энергетического выхода X от мощности источника нейтронов N

Из рис. 1 видно, что с ростом мощности источника нейтронов в делящемся материале энергетический выход ЯВУ снижается, причем для преждевременной детонации с большей вероятностью требуется больший источник нейтронов. Вероятность преждевременной детонации, близкая к 100%, практически нереализуема на практике, так как для этого требуется чрезвычайно мощный источник нейтронов. С другой стороны, вероятность на уровне 50% слишком мала, чтобы можно было говорить о надежной защищенности рассматриваемого делящегося материала. В этой связи будем ориентироваться на вероятность на уровне 90%. В этом случае для снижения энергетического уровня в 100 раз (то есть $X = 0,01$) необходим источник нейтронов мощностью $1,5 \cdot 10^5$ н/с.

3. Обеспечение требуемого источника нейтронов

Требуемый источник нейтронов не может быть обеспечен за счет реакции спонтанного деления изотопов урана. Представляется, что наиболее реалистичным способом его обеспечения является введение в высокообогащенный уран небольшого количества изотопа ^{232}U , который претерпевает альфа-распад с периодом полураспада 68,9 года [2]. Испускаемые ^{232}U альфа-частицы будут инициировать (α, n)-реакции на легких ядрах, которые присутствуют в делящемся материале в виде примесей (табл. 2).

Таблица 2. Примеси в металлическом уране

Примесь	Содержание, ppm	Нейтроны на 10^{10} альфа-распадов / ppm примесей
Литий (Li)	1	0,237
Бериллий (Be)	1	3,89
Бор (B)	0,2	1,13
Углерод (C)	550	0,0069
Натрий (Na)	30	0,0258

На основе данных табл. 2 и закона радиоактивного распада оценено, что введение в высокообогащенный уран 1% ^{232}U способно обеспечить источник нейтронов мощностью $0,5 \cdot 10^6$ н/с.

Отметим, что в результате радиоактивного распада ^{232}U переходит в ^{228}Th , который претерпевает несколько радиоактивных распадов до образования стабильного свинца. В результате чего, выдержка ^{232}U может привести к повышению мощности источника нейтронов, что видно на рис. 2.

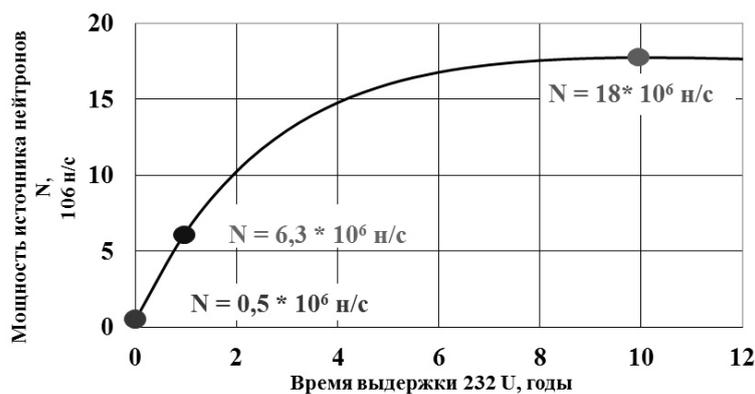


Рис. 2. Мощность источника нейтронов в зависимости от времени выдержки ^{232}U (в случае, когда уран содержит 1% ^{232}U)

Как видно из рис. 2, повышение мощности источника нейтронов за счет выдержки ^{232}U наиболее существенно на начальном этапе. Поэтому целесообразно выдерживать ^{232}U , по крайней мере, в течение года. В этом случае мощность источника нейтронов в уране, содержащем 1% ^{232}U , составит $6,3 \cdot 10^6$ н/с. Тогда для обеспечения источника нейтронов $1,5 \cdot 10^5$ н/с (снижение энергетического выхода ЯВУ ствольного типа в 100 раз) уран должен содержать 0,02% ^{232}U .

Заключение

Развита модель оценки защищенности высокообогащенного урана с точки зрения возможности изготовления на его основе ЯВУ ствольного типа.

Для снижения эффективности ЯВУ ствольного типа рассматривалось введение в делящийся материал источника нейтронов, что способно обеспечить преждевременный запуск цепной реакции деления и привести к пониженному энергетическому выходу. Оценено, что для снижения в 100 раз энергетического выхода ЯВУ ствольного типа, собранного на основе высокообогащенного урана, требуется наличие в нем порядка 0,02% ^{232}U .

Список литературы

1. J. Carson Mark. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. // Science & Global Security. Vol. 4, 1993. 111-128 p.
2. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. // Физические величины: Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.