

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПЛУТОНИЯ

Е.Г. Куликов, Г.Г. Куликов, В.А. Апсэ, А.Н. Шмелев, Н.И. Гераскин

НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Приведенная в [1] математическая модель может быть использована для получения количественной оценки защищенности плутония. При этом необходимо проанализировать прогрев ядерного взрывного устройства (ЯВУ) имплозивного типа различной структуры при разных условиях теплоотвода и определить такой вариант, при котором оно сохраняет работоспособное состояние максимально долго. Долю изотопа ^{238}Pu , при которой даже в этом случае ЯВУ окажется работоспособным только достаточно короткий период времени, можно будет признать достаточной, чтобы считать плутоний такого состава защищенным материалом.

Цель работы состоит в получении количественной оценки содержания ^{238}Pu в плутонии для обеспечения его защищенности, а также определения факторов, оказывающих существенное влияние на эту оценку. При выполнении работы использовались исходные данные, методика и результаты предыдущих работ по данной тематике, а также собственные оценки и расчеты авторов.

Показано, что при оценке защищенности плутония важными факторами являются уровень технологии ЯВУ, а также требуемое «время жизни» устройства.

В зависимости от необходимого «времени жизни» более жесткие требования к содержанию ^{238}Pu могут выдвигаться с позиций ЯВУ как высокой, так и низкой технологии.

Если ориентироваться на «время жизни», равное пяти часам (маловероятно, что за столь короткое время удастся осуществить окончательную стадию сборки, транспортировку и использование ЯВУ), то лишь плутоний, содержащий 55% ^{238}Pu , может считаться защищенным делящимся материалом.

Ключевые слова: плутоний, плутоний-238, защищенность от распространения, ядерное взрывное устройство, взрывчатое вещество, криогенные температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая ядерная энергетика к настоящему времени уже накопила (и продолжает накапливать) большое количество облученного топлива, в котором содержится довольно много плутония (его накоплено уже более тысячи тонн). Этот плутоний и его дальнейшая судьба вызывают беспокойство по разным причинам, среди которых важное место занимает проблема распространения.

Вопросу защищенности плутония путем введения в него изотопа ^{238}Pu , являющегося мощным источником тепла α -распада, посвящен ряд работ [2 – 8], среди которых

© **Е.Г. Куликов, Г.Г. Куликов, В.А. Апсэ, А.Н. Шмелев, Н.И. Гераскин, 2018**

наиболее значительной является монография доктора Гюнтера Кесслера из Карлсруэ (Германия, 2011 г.) [8].

Вместе с тем эта фундаментальная работа имеет ряд существенных недостатков (недостаточно обоснованная структура ЯВУ, рассмотрение асимптотического профиля температуры, отсутствие некоторых мер по замедлению прогрева устройства), с учетом устранения которых авторами статьи была разработана расчетно-теоретическая модель ЯВУ имплозивного типа.

На основании разработанной модели делается количественная оценка защищенности плутония.

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Геометрическая сферически-симметричная модель гипотетического ЯВУ имплозивного типа включает в себя центральный плутониевый заряд, окруженный слоями из природного урана (отражатель нейтронов), алюминия, химического взрывчатого вещества (ВВ) и внешней оболочки. В зависимости от уровня технологий возможны различные размеры некоторых слоев ЯВУ, а также разные по термостойкости химические ВВ.

В предположении, что источник тепла α -распада (^{238}Pu) в центральном плутониевом заряде сферически-симметричен, распределение температуры по слоям ЯВУ можно найти из решения нестационарного уравнения теплопроводности

$$\text{div} [\lambda(r, T) \cdot \text{grad} T(r, \tau)] + q_V(r) = c_V(r, T) \cdot \partial T(r, \tau) / \partial \tau,$$

где $\lambda(r, T)$, $c_V(r, T)$ – теплопроводность и удельная объемная теплоемкость материала, зависящие от температуры $T(r, \tau)$; $T(r, \tau)$ – температура в точке r в момент времени τ ; $q_V(r)$ – интенсивность источника тепла.

Наименее термостойким элементом ЯВУ имплозивного типа является химическое ВВ. В зависимости от используемого химического ВВ наиболее жестким критерием, определяющим работоспособность ЯВУ имплозивного типа, может являться как плавление, так и разложение 2% молекул химического ВВ. Кроме того, предполагается, что плавление делящегося материала (плутония) приводит к неработоспособности ЯВУ имплозивного типа.

Долю изотопа ^{238}Pu , при которой устанавливается профиль температур, свидетельствующий о неработоспособности ЯВУ имплозивного типа (плавление плутония и (или) плавление или разложение 2% молекул химического ВВ), можно признать достаточной, чтобы считать плутоний такого состава защищенным от распространения материалом.

Более подробное изложение расчетно-теоретической модели приведено в работе [1].

Неопределенность оценок, получаемых по данной модели, в существенной степени обусловлена невозможностью учета точной структуры ЯВУ имплозивного типа, а также сложностью оценки времени окончательной стадии сборки и транспортировки ЯВУ имплозивного типа.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИЩЕННОСТИ ПЛУТОНИЯ: НИЗКИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОЙ ЧАСТИ ЯВУ, ТЕРМОСТОЙКОЕ ВВ

Рассматривается ЯВУ, ядерная часть которого относится к низкой технологии, а в неядерной части применяется термостойкое ВВ (ТАТВ [9 – 12]), причем одновременно принимаются меры продления «времени жизни» устройства (времени, в течение которого устройство сохраняет работоспособность). Это позволит оценить мощность источника тепла (а значит, и долю ^{238}Pu), обеспечивающую защищенность плутония [13, 14].

Мера 1. Предварительное охлаждение элементов ЯВУ. Очевидно, что при наличии фиксированного источника тепла в делящемся материале первоначально охлажденное ЯВУ будет дольше сохранять работоспособность (прежде чем оно перегреется и выйдет из строя) по сравнению с ЯВУ, которое не подвергалось охлаждению.

Теплоемкость материалов при криогенных температурах чрезвычайно мала, поэтому для продления «времени жизни» ЯВУ не имеет смысла стремиться к предельно возможному охлаждению элементов устройства, близкому к абсолютному нулю. Выяснено, что охлаждение элементов ЯВУ до температуры ниже жидкого азота (77 К) слабо сказывается на мощности источника тепла, требуемой для защищенности плутония: она возрастает всего на 3% при сравнении случаев охлаждения до 77 К и до 4 К. Поэтому в дальнейшем будем ориентироваться на случай, когда компоненты ЯВУ охлаждаются до температуры не ниже 77 К.

При этом следует отметить, что в течение всего времени прогрева температура плутония должна быть выше 198 К. Дело в том, что при более низких температурах плутоний, стабилизированный в δ -фазе, переходит в α' -фазу, что сопровождается резким изменением объема; обратный переход в δ -фазу не является полностью обратимым [15, 16]. В итоге подобные фазовые превращения могут привести к частичной или полной потере работоспособности ЯВУ.

Отметим, что после первоначального охлаждения ЯВУ теплоизолируется от окружающей среды для максимального сохранения охлажденного состояния.

Рассматривая процесс прогрева материалов устройства, важно отметить два обстоятельства. Первое состоит в том, что центральная часть ЯВУ содержит плутоний, уран и алюминий в металлическом виде, которые характеризуются достаточно высокими коэффициентами теплопроводности. Это означает, что тепло, выделяющееся в плутонии, быстро перетекает в соседние слои, и различие в температурах этих материалов при прогреве оказывается относительно небольшим (в пределах 100°C).

Второе обстоятельство заключается в том, что среди материалов, составляющих ЯВУ, самыми высокими теплоаккумулирующими свойствами обладают алюминий и химическое ВВ, в связи с чем для продления «времени жизни» ЯВУ следует стремиться, в первую очередь, к охлаждению именно этих материалов, способных сыграть роль аккумулятора тепла, выделяющегося в плутонии, тем самым сдерживая его разогрев.

ЯВУ низкого уровня технологий ядерной части может представлять бо льшую опасность, чем ЯВУ высокого уровня ввиду значительной толщины слоев алюминия и химического ВВ, которая означает их высокие теплоаккумулирующие способности.

Предварительное охлаждение элементов ЯВУ высокой технологии может привести к увеличению мощности источника тепла, требуемой для защищенности плутония, примерно на 50% (по сравнению со случаем отсутствия охлаждения). Это соответствующим образом повышает требования к содержанию ^{238}Pu в плутонии.

Мера 2. Окружение ЯВУ теплоотводящим слоем. Режим отвода тепла, близкий к «идеальному» теплоотводу (температура на внешней поверхности ЯВУ всегда постоянна), может быть обеспечен на практике путем окружения ЯВУ теплоотводящим слоем материала с высокой теплопроводностью либо материала, претерпевающего фазовый переход при температуре предварительного охлаждения. Действительно, подобный слой определенной толщины способен без повышения температуры аккумулировать все поступающее в него тепло (поскольку данное тепло будет идти на плавление или испарение).

Рассмотрим теплоотводящий слой, который состоит на 25% из материала с высокой теплопроводностью (алюминий) и на 75% из материала, претерпевающего фазовый переход при температуре предварительного охлаждения (жидкий азот).

Толщина теплоотводящего слоя выбирается таким образом, чтобы он был способен без повышения температуры аккумулировать все поступающее в него тепло в течение заданного времени прогрева ЯВУ вплоть до момента потери работоспособности устройства.

В ЯВУ высокой технологии окружение теплоотводящим слоем, обеспечивающим случай «идеального» теплоотвода, приводит к необходимости увеличения мощности источника тепла, требуемой для защищенности плутония, примерно на 15%.

Мера 3. Введение теплоизолирующего слоя в структуру ЯВУ для целенаправленного перераспределения поля температуры. Расчетным путем выяснено, что ЯВУ имплозивного типа теряет работоспособность из-за чрезмерного нагрева химического ВВ, в то время как внутренние слои (плутоний, уран, алюминий) имеют далеко не предельные для них температуры (например, температуры плавления). Значит, целесообразно принять меры, препятствующие переносу тепла из внутренних слоев ЯВУ в слой химического ВВ: это продлит «время жизни» устройства. Так, можно ввести тонкий слой (например, толщиной 5 мм) материала с низкой теплопроводностью между слоями алюминия и химического ВВ.

К материалу теплоизолирующего слоя предъявляется ряд требований – он должен обладать низкой теплопроводностью и высокой рабочей температурой. По-видимому, одним из самых привлекательных материалов для теплоизолирующего слоя является кварцевый аэрогель, который применяется в строительстве в качестве теплоизолирующего и теплоудерживающего материала [17]. Действительно, он характеризуется чрезвычайно низкой теплопроводностью (0,017 Вт/м·К на воздухе при атмосферном давлении), и в то же время имеет высокую рабочую температуру (1200°С) [18 – 21].

Введение теплоизолирующего слоя в структуру ЯВУ высокой технологии для целенаправленного перераспределения поля температуры приводит к увеличению мощности источника тепла, требуемой для защищенности плутония, более чем на 50%.

Итак, можно ожидать, что принятие всех рассмотренных мер, способствующих продлению «времени жизни» ЯВУ, повысит требование к мощности источника тепла более чем вдвое.

В монографии [8] рассматривается случай, когда плутоний первоначально охлажден до 73 К, а остальные материалы, составляющие устройство, имеют комнатную температуру. При этом делается вывод, что если плутоний является источником тепла мощностью 0,48 кВт, то плавление плутония наблюдается уже через семь часов.

Однако в [8] не рассматривается возможность охлаждения других материалов, составляющих ЯВУ (уран, алюминий, химическое ВВ). Среди материалов, составляющих ЯВУ, самыми высокими теплоаккумулирующими свойствами обладают алюминий и химическое ВВ, в связи с чем следует рассмотреть случай, когда данные материалы подвергаются предварительному охлаждению.

При этом надо выбрать такое первоначальное охлаждение элементов ЯВУ, чтобы на протяжении всего процесса прогрева температура плутония была выше 198 К. Расчетным путем установлено, что ЯВУ, ядерная часть которого относится к низкой технологии, а в неядерной части применяется термостойкое ВВ (ТАТВ), способно сохранять работоспособность наибольшее время (при этом температура плутония всегда выше 198 К) при следующем начальном поле температур: плутоний и уран имеют температуру 300 К, алюминий – 150 К, химическое ВВ (ТАТВ) – 77 К. В этом случае плавление плутония, содержащего источник тепла α -распада мощностью 0,48 кВт, наблюдается по прошествии лишь семи суток (!).

Таким образом показано, что охлаждение алюминия и химического ВВ в значительной мере способствует продлению «времени жизни» ЯВУ, чем ох-

лаждение плутония.

Промежуток времени порядка семи суток может оказаться достаточным для того, чтобы осуществить окончательную стадию сборки ЯВУ, а также последующую транспортировку и использование устройства. Если ориентироваться на «время жизни», равное пяти часам (маловероятно, что за столь короткое время удастся осуществить окончательную стадию сборки, транспортировку и использование ЯВУ), то требуется источник тепла мощностью около 4 кВт. Данный источник тепла может быть создан при введении в плутоний 55% ^{238}Pu .

Эта оценка существенно расходится с представлениями, изложенными в [8]. Автор предполагает, что пороговые государства способны использовать технологии от низкого до среднего уровней, но не высокую технологию ЯВУ. Расчетными оценками вариантов низкого уровня технологии ЯВУ показано, что при содержании всего лишь 1,8% ^{238}Pu в плутонии уже наступает плавление ВВ, т.е. иными словами, разрушение гетерогенной структуры слоя ВВ в ЯВУ и приведение его в неработоспособное состояние. В топливном цикле ядерной энергетике с легководными реакторами на UO_2 -топливе с выгоранием 35 ГВт-сут/т такое содержание ^{238}Pu в реакторном плутонии уже достигнуто и в настоящее время превзойдено.

На этом основании доктор Г. Кесслер сделал вывод о том, что для пороговых государств, которым, по его мнению, под силу создать ЯВУ в диапазоне от низкого до среднего уровней технологии, существующий (U-Pu)-цикл можно считать защищенным [8].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИЩЕННОСТИ ПЛУТОНИЯ: ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОЙ ЧАСТИ ЯВУ, ТЕРМОСТОЙКОЕ ВВ

Рассматривается ЯВУ, ядерная часть которого относится к высокой технологии, а в неядерной части применяется термостойкое ВВ (ТАТВ), при этом, как и ранее, одновременно принимаются все вышеперечисленные меры продления «времени жизни» устройства. Это позволит оценить мощность источника тепла (а значит, и долю ^{238}Pu), обеспечивающую защищенность плутония.

Следует выбрать такое первоначальное охлаждение элементов ЯВУ, чтобы на протяжении всего процесса прогрева температура плутония была выше 198 К. Расчетным путем установлено, что ЯВУ, ядерная часть которого относится к высокой технологии, а в неядерной части применяется термостойкое ВВ (ТАТВ), способно сохранять работоспособность наибольшее время (при этом температура плутония всегда выше 198 К) при следующем начальном поле температур: плутоний имеет температуру 300 К, уран – 150 К, алюминий и химическое ВВ – 77 К.

Для оценки мощности источника тепла (доли ^{238}Pu), обеспечивающей защищенность плутония, необходимо зафиксировать «время жизни» ЯВУ. В качестве примера будем ориентироваться на «время жизни», равное пяти часам: маловероятно, что за столь короткое время удастся осуществить окончательную стадию сборки, транспортировку и использование ЯВУ. На рисунке 1 представлены профили температуры в ЯВУ имплозивного типа высокой технологии в моменты времени 0; 1 и 5 часов.

На основании выбранного критерия защищенности делящихся материалов (работоспособность ЯВУ на их основе должна быть менее пяти часов) делаем вывод, что требуемая мощность источника тепла составляет 2,1 кВт (рис. 1). В этом случае лишь плутоний, содержащий, по крайней мере, 29% ^{238}Pu , может считаться защищенным материалом.

Поскольку время окончательной стадии сборки и транспортировки ЯВУ имплозивного типа трудно оценить, то следует рассмотреть широкий диапазон значений

для «времени жизни», которое является ключевым фактором при оценке защищенности делящихся материалов (рис. 2).

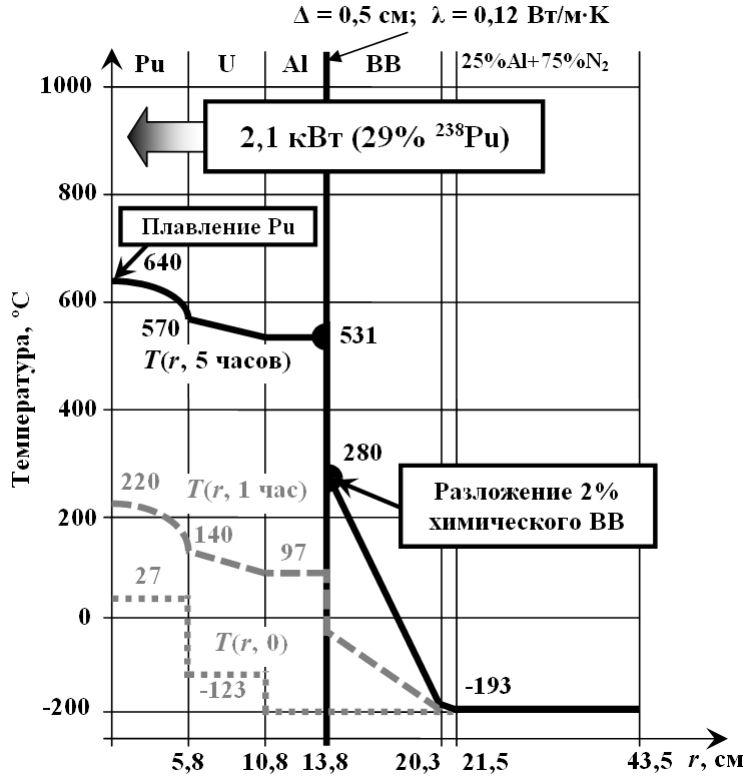


Рис. 1. Профили температуры в ЯВУ имплозивного типа высокой технологии при использовании всех мер продления «времени жизни» устройства

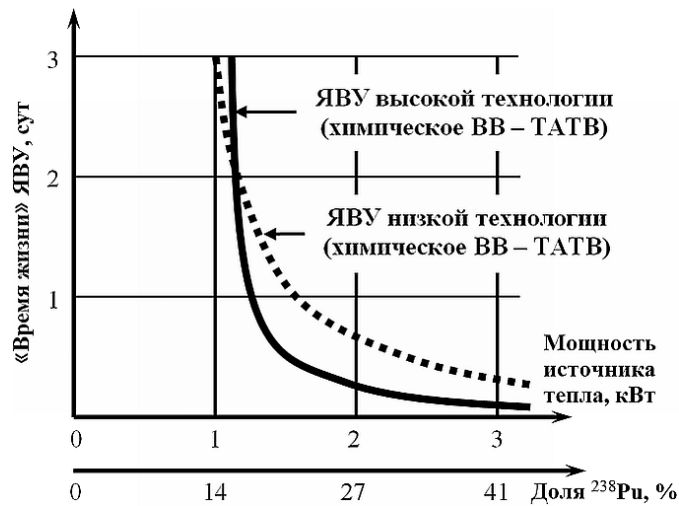


Рис. 2. Зависимость между «временем жизни» ЯВУ и мощностью источника тепла α -распада (долей ²³⁸Pu в плутонии)

В условиях отсутствия точных данных о времени, требуемом для окончательной стадии сборки и транспортировки ЯВУ, невозможно сделать однозначный вывод о содержании ²³⁸Pu, необходимом для защищенности плутония. Из рисунка 2 следует, что требуемое содержание ²³⁸Pu должно превышать, по крайней мере, 14%. Со-

гласно рекомендациям МАГАТЭ, защищенным с точки зрения распространения признается плутоний с содержанием более 80% ^{238}Pu . Исследуемая математическая модель дает примерно такой же результат при рассмотрении «времени жизни» порядка двух часов.

Неопределенность оценки требуемого содержания ^{238}Pu , необходимого для защищенности плутония, обусловлена неопределенностью времени, требуемого для окончательной стадии сборки и транспортировки ЯВУ. В зависимости от этого времени требуемое содержание ^{238}Pu составляет от 14% (время сборки и транспортировки ЯВУ от нескольких дней до недель) до 80% (время сборки и транспортировки ЯВУ два часа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе развитой расчетно-теоретической модели выполнена количественная оценка защищенности плутония. Показано, что важными факторами являются уровень технологии ЯВУ, а также требуемое «время жизни» устройства.

Важно подчеркнуть, что нельзя делать вывод о защищенности плутония на основании рассмотрения ЯВУ только низкой или только высокой технологии. В зависимости от необходимого «времени жизни» более жесткие требования к содержанию ^{238}Pu могут выдвигаться к ЯВУ как высокой технологии («время жизни» более двух суток), так и низкой («время жизни» менее двух суток) (см. рис. 2).

Литература

1. Куликов Е.Г., Куликов Г.Г., Ансэ 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.
2. Carson Mark J. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. // Science & Global Security. – 1993. – Vol. 4. – PP. 111-128.
3. Massey J.V., Schneider A. The Role of Plutonium-238 in Nuclear Fuel Cycles. // Nuclear Technology, – 1982. – Vol. 56.
4. De Volpi A. Denaturing Fissile Materials. // Progress in Nuclear Energy. – 1982. – Vol. 10. – No. 2. – PP. 161-220.
5. Heising-Goodman C.D. An Evaluation of the Plutonium Denaturing Concept as an Effective Safeguards Method. // Nuclear Technology. – 1980. – Vol. 50. – PP. 242-251.
6. Kessler G. Plutonium Denaturing by ^{238}Pu . // Nuclear Science and Engineering. – 2007. – Vol. 155. – PP. 53-73.
7. Kessler G., Chen X.-N. Thermal Analysis of Hypothetical Nuclear Explosive Devices Containing Reactor-grade Plutonium with Higher Content of Pu-238. Obninsk workshop, 29 September – 3 October 2008.
8. Kessler G. Proliferation-Proof Uranium. Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-Proliferation. – KIT Scientific Publishing, Germany, 2011.
9. TATB. In Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/TATB> (accessed 27 Oct. 2017).
10. Mulford R.N., Romero J.A. Sensitivity of the TATB-based explosive PBX-9502 after thermal expansion. – AIP Conf. Proc. 429, 1998.
11. Singh Arjun, Kumar Mahesh, Soni Pramod, Singh Manjit, Srivastava Alok. Mechanical and Explosive Properties of Plastic Bonded Explosives Based on Mixture of HMX and TATB. // Defence Science Journal. – 2013. – Vol. 63(6). – PP. 622-629.
12. Hollowell B.C., Gustavsen R.L., Dattelbaum D.M., Bartram B.D. Shock initiation of the TATB-based explosive PBX 9502 cooled to 77 Kelvin. // Journal of Physics Conference Series. – 2014, Vol. 500(18).
13. Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Ансэ В.А., Куликов Г.Г. Расчетные модели для количественной оценки защищенности делящихся материалов. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 184-195.

14. *Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G.* Mathematical models for quantitative evaluation of fissionable materials proliferation protection, American Nuclear Society. 4-th Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management 2009 (ANFM IV). – Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.
15. Плутоний. Фундаментальные проблемы. Т. 1. / Пер. с англ. под ред. Б.А. Надыкто и Л.Ф. Тимофеевой. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
16. Плутоний. Фундаментальные проблемы. Т. 2. / Пер. с англ. под ред. Б.А. Надыкто и Л.Ф. Тимофеевой. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
17. *Paradopoulos A.M.* State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. // *Energy and Buildings*. – 2005. – Vol. 37. – PP. 77-86.
18. Аэрогель. – Википедия. Электронный ресурс: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Аэрогель>. (дата доступа 11.11.2017).
19. *Gurav Jyoti L., Jung In-Keun, Park Hyung-Ho, Kang Eul Son, Nadargi Digambar Y.* Silica Aerogel: Synthesis and Applications. // Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Nanomaterials*. – Vol. 2010. – Article ID 409310.
20. *Ayers Michael R., Hunt Arlon J.* Synthesis and properties of chitosan–silica hybrid aerogels. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2001. No. 1-3. – PP. 123-127.
21. *Parvathy Rao A., Venkateswara Rao A., Bangi Uzma K.H.* Low thermalconductive, transparent and hydrophobic ambient pressure dried silica aerogels with various preparation conditions using sodium silicate solutions. // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2008. – No. 1. – PP. 85-94.
22. *IAEA Safeguards Glossary. 2001 Edition. International Nuclear Verification Series No. 3.* – Vienna: International atomic energy agency, 2002.

Поступила в редакцию 09.10.2017 г.

Авторы

Куликов Евгений Геннадьевич, старший преподаватель

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Куликов Геннадий Генрихович, ведущий инженер

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС

E-mail: apseva@mail.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор

E-mail: shmelan@mail.ru

Гераскин Николай Иванович, и.о. заведующего кафедрой, доцент

E-mail: nigeraskin@mephi.ru

UDC 621.039.58

QUANTITATIVE EVALUATION OF PLUTONIUM PROLIFERATION PROTECTION

Kulikov E.G., Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Geraskin N.I.

NRNU MEPhI, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

ABSTRACT

Mathematical model developed in the article [1] could be applied for quantitative evaluation of plutonium proliferation protection. One should analyze warm up process of nuclear explosive devices (NEDs) of a different structure under various conditions of artificial heat removal and define the case with the longest lifetime of NED. Content of ^{238}Pu in plutonium, which provides a short enough lifetime of NED even in this most dangerous case, could be regarded as sufficient for protection from plutonium proliferation.

The aim of the work consisted in performing quantitative evaluation of ^{238}Pu content in plutonium to guarantee its proliferation protection as well as defining factors which strongly affect such an evaluation.

During implementation of the work we have used input data, methodology and main results of the previous works on this topic as well as our own evaluations and results of numerical analyses.

We obtained the following results.

1. Important factors are technology level of NED and required lifetime of the device.
2. Depending on the required lifetime of NED more stringent requirements for ^{238}Pu content in plutonium could be laid down in cases of both high and low technology levels of NED.

General conclusion. It has been demonstrated that plutonium can be considered as a proliferation-protected material if it contains at least 55% ^{238}Pu (implosion-type NED on its basis is functional less than 5 hours – it is unlikely that in such a short time it is possible to assemble and transport NED).

Key words: plutonium, plutonium-238, proliferation protection, nuclear explosive device, chemical explosive, cryogenic temperatures.

REFERENCES

1. Kulikov E.G., Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Geraskin N.I. Computational model and physical and technical factors that determine plutonium proliferation protection. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 1, pp. 23-32.
2. Carson Mark J. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. *Science & Global Security*, 1993, v. 4, pp. 111-128, 1993.
3. Massey J.V., Schneider A. The Role of Plutonium-238 in Nuclear Fuel Cycles. *Nuclear Technology*, 1982, v. 56.
4. De Volpi A. Denaturing Fissile Materials. *Progress in Nuclear Energy*. 1982, v. 10, no. 2, pp. 161-220.
5. Heising-Goodman C.D. An Evaluation of the Plutonium Denaturing Concept as an Effective Safeguards Method. *Nuclear Technology*. 1980, v. 50, pp. 242-251.
6. Kessler G. Plutonium Denaturing by ^{238}Pu . *Nuclear Science and Engineering*, 2007, v. 155, pp. 53-73.
7. Kessler G., Chen X.-N. Thermal Analysis of Hypothetical Nuclear Explosive Devices Containing Reactor-grade Plutonium with Higher Content of Pu-238. Obninsk workshop, 29 September – 3 October 2008.
8. Kessler G. *Proliferation-Proof Uranium/Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-*

Proliferation. Germany. KIT Scientific Publishing, 2011.

9. TATB – Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/TATB> (accessed 27 Oct. 2017).

10. Mulford R.N., Romero J.A. Sensitivity of the TATB-based explosive PBX-9502 after thermal expansion. *AIP Conf. Proc.* 429, 1998.

11. Arjun Singh, Mahesh Kumar, Pramod Soni, Manjit Singh, Alok Srivastava. Mechanical and Explosive Properties of Plastic Bonded Explosives Based on Mixture of HMX and TATB. *Defence Science Journal*, 2013, v. 63, no. 6, pp. 622-629.

12. Hollowell B.C., Gustavsen R.L., Dattelbaum D.M., Bartram B.D. Shock initiation of the TATB-based explosive PBX 9502 cooled to 77 Kelvin. *Journal of Physics Conference Series*. 2014, v. 500, no. 18.

13. Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G. Computational models for quantitative evaluation of proliferation protection for fissionable materials. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2010, no. 2, pp. 184-195.

14. Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G. Mathematical models for quantitative evaluation of fissionable materials proliferation protection. American Nuclear Society - IV Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management 2009 (ANFM IV). Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.

15. Plutonium. *Fundamental problems*. Vol. 1. Sarov. RFNC-VNIIEF Publ., 2003.

16. Plutonium. *Fundamental problems*. Vol. 2. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2003.

17. Papadopoulos A.M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 2005, v. 37, pp. 77-86.

18. Aerogel – Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel> (accessed 22 Oct. 2016).

19. Jyoti L. Gurav, In-Keun Jung, Hyung-Ho Park, Eul Son Kang, Digambar Y. Nadargi. Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *Hindawi Publishing Corporation, Journal of Nanomaterials*, Volume 2010, Article ID 409310.

20. Ayers Michael R., Hunt Arlon J. Synthesis and properties of chitosan–silica hybrid aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, no. 1-3, pp. 123-127.

21. Rao A. Parvathy, Rao A. Venkateswara, Bangi Uzma K. H. Low thermalconductive, transparent and hydrophobic ambient pressure dried silica aerogels with various preparation conditions using sodium silicate solutions. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2008, no. 1, pp. 85-94.

22. *IAEA Safeguards Glossary. 2001 Edition. International Nuclear Verification Series No. 3.* Vienna. International Atomic Energy Agency, 2002.

Authors

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Senior Lecturer

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Kulikov Gennady Genrikhovich, Leading Engineer

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of the Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Geraskin Nikolay Ivanovich, Department Head, Associate Professor

E-mail: nigeraskin@mephi.ru