

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЗАЩИЩЕННОСТЬ ПЛУТОНИЯ

Е.Г.Куликов, Г.Г.Куликов, В.А.Апсэ, А.Н.Шмелев, Н.И.Гераскин
НИЯУ МИФИ, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

Р

Поскольку замыкание ядерного топливного цикла предполагает выделение плутония из облученного топлива и его рецикл в ядерных реакторах в составе загружаемого топлива, то важное практическое значение приобретает проблема защищенности делящихся материалов (плутония). Важно понимать, в какой мере физико-технические свойства делящихся материалов способны препятствовать их переключению на неэнергетические цели. В работе рассматривается термин «защищенность» с физико-технической точки зрения без привлечения мер по физической защите, учету и контролю ядерных материалов. Так, под защищенностью плутония подразумевается техническая невозможность изготовления на его основе ядерного взрывного устройства (ЯВУ) имплозивного типа по причине перегрева компонентов устройства и выхода его из строя.

Цель работы – обсуждение корректности методической стороны подхода, используемого в предыдущих работах по обоснованию защищенности плутония и разработке модели, устраняющей недостатки этих работ. Для этого привлекались исходные данные, методика и результаты предыдущих работ по данной тематике, а также собственные оценки и расчеты авторов.

Получены следующие выводы.

1. Не является обоснованной оценка защищенности плутония, опирающаяся на анализ ЯВУ имплозивного типа, в котором исключается использование современных термостойких и теплопроводных химических взрывчатых веществ (ВВ) ввиду их недоступности.

2. Рассмотрение асимптотического профиля температур в элементах ЯВУ является недостаточно обоснованным при выработке рекомендаций по защищенности плутония.

3. При анализе физико-технических факторов, определяющих защищенность плутония, не исчерпаны варианты, позволяющие замедлить процесс прогрева ЯВУ.

Общий вывод. В фундаментальной монографии доктора Г. Кесслера оказался недостаточно верным основополагающий посыл, который привел к необоснованному заключению о защищенности плутония. Развитие используемой методики и учет других факторов может повысить требования к содержанию изотопа ^{238}Pu в плутонии для обеспечения его защищенности.

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

ВВЕДЕНИЕ

В 1977 г. было объявлено, что в США в 1962 г. успешно испытано ЯВУ на основе реакторного плутония [1]. Вместе с тем в конце 1970-х гг. в рамках МАГАТЭ анализировались стратегии замыкания ядерного топливного цикла [2], где встал вопрос об обеспечении защищенности реакторного плутония. Эта проблема была исследована А. De Volpi [3], который пришел к выводу: «наилучшей стратегией предотвращения использования плутония в военных целях является введение в него изотопа ^{238}Pu ». Данный изотоп плутония является мощным источником тепла, который может привести к неприемлемо высокому перегреву ЯВУ [4].

Рассмотрение вопроса о количественной оценке доли ^{238}Pu , требуемой для защищенности плутония, впервые, по мнению авторов, приведено в работе [5] (1980 г.). Поскольку плутоний является мощным источником спонтанных нейтронов и на его основе невозможно создать эффективное ЯВУ ствольного типа, в работе [5] рассмотрена модель ЯВУ имплозивного типа – сфера делящегося материала (плутония), окруженная слоями темпера, химического взрывчатого вещества (ВВ) и внешней оболочки. Сделан вывод о том, что введение в плутоний, по крайней мере, 5% ^{238}Pu приведет к настолько высоким температурам за счет тепловыделения от α -распада, что химическое ВВ будет расплавлено, а значит, данное ЯВУ имплозивного типа окажется неработоспособным [5].

Дальнейшее развитие подхода к оценке доли ^{238}Pu , требуемой для защищенности плутония, было представлено в работах, автором которых является доктор Гюнтер Кесслер из Карлсруэ (Германия) [6 – 9]. По сравнению с более ранней работой [5] работы доктора Г. Кесслера имеют следующие особенности:

- рассматривается более обоснованная структура ЯВУ: радиус сферы делящегося материала выбран на основе расчетов на критичность (в работе [5] рассмотрен ряд значений радиуса сферы делящегося материала без привязки к критичности);
- проведен анализ свойств различных химических ВВ с целью предусмотреть неработоспособность ЯВУ при использовании любого из доступных химических ВВ;
- учитывается то обстоятельство, что причиной потери работоспособности ЯВУ может являться не только плавление, но также самовозгорание и пиролиз (разложение с образованием газовых компонент) химического ВВ.

Кроме того, проанализирована возможность замедления процесса прогрева ЯВУ имплозивного типа с помощью таких мер, как предварительное охлаждение плутония, а также окружение ЯВУ теплоотводящим слоем. При этом необходимо отметить, что рассмотрение подобных возможностей замедления процесса прогрева ЯВУ имплозивного типа было впервые сделано авторами данной статьи в работах [10, 11].

В заключении монографии [9] утверждается, что плутоний с содержанием ^{238}Pu на уровне от 11 до 13% можно считать защищенным материалом, т.е. непригодным для изготовления на его основе ЯВУ имплозивного типа.

Представляется, что основными недостатками монографии [9] являются

- методическая сторона подхода, связанная с выбором структуры и материалов ЯВУ имплозивного типа;
- рассмотрение асимптотического профиля температуры по слоям ЯВУ, достигаемого по прошествии бесконечного времени прогрева;
- отсутствие учета таких возможностей замедления процесса прогрева ЯВУ имплозивного типа, как предварительное охлаждение отражателя нейтронов (природного урана), темпера (алюминия) и неядерной части ЯВУ, а также введение в структуру ЯВУ теплоизолирующих слоев, с помощью которых можно перераспределить поле температуры таким образом, чтобы ЯВУ наиболее долго сохраняло работоспособность.

При этом можно заметить, что монография доктора Г. Кесслера является практически единственной обстоятельной монографией в XXI в., посвященной именно физико-техническому анализу барьеров защищенности реакторного плутония. Учитывая высокий научный авторитет автора, эта монография будет использоваться специалистами (и как показывает практика, уже используется) для разработок (U-Pu)-цикла и формирования представлений о его защищенности от неконтролируемого распространения делящихся материалов.

В данной работе обсуждается методическая сторона подхода доктора Г. Кесслера, высказываются соображения о неполноте выполненного им анализа, приведшей к недостаточно обоснованным выводам о защищенности плутония.

МОДЕЛЬ ГИПОТЕТИЧЕСКОГО ЯВУ ИМПЛОЗИВНОГО ТИПА

Геометрическая модель гипотетического ЯВУ имплозивного типа представлена на рис. 1 [9]. Центральный плутониевый заряд окружен сферическими слоями из природного урана (отражатель нейтронов), алюминия, химического ВВ и внешней оболочки.

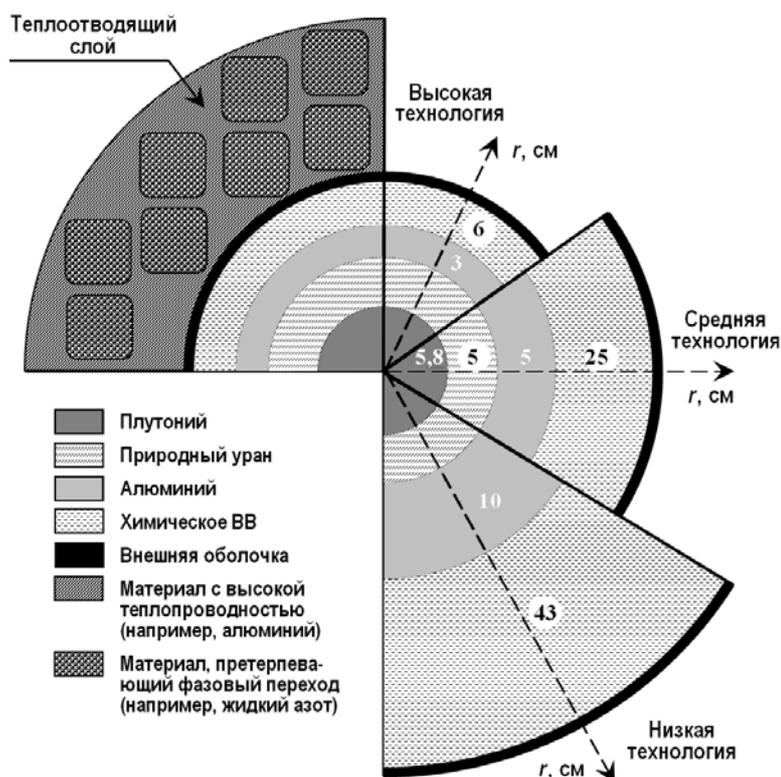


Рис. 1. Геометрическая модель гипотетического ЯВУ имплозивного типа

При сжатии плутония его масса, будучи подкритической в исходном состоянии, становится более плотной надкритической и способной осуществить экспоненциально развивающуюся цепную реакцию деления. В силу быстрой смены поколений нейтронов эта цепная реакция успевает настолько сильно развиться (прежде чем произойдет разрушение самого ЯВУ), что общее выделение энергии тысячратно превосходит энерговыделение химического ВВ.

В монографии [9] обращено внимание на то, что свойства материала химического ВВ очень чувствительны к температуре. Иными словами, при повышении температуры интенсифицируется его пиролиз, оно может расплавляться, а также испы-

тать самовозгорание. Во всех указанных случаях ЯВУ приходит в неработоспособное состояние.

ФИЛОСОФИЯ ДОКТОРА Г. КЕССЛЕРА, ОБОСНОВЫВАЮЩАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ ПЛУТОНИЯ

В монографии [9] рассмотрены три уровня развития технологии (см. рис. 1), которые прошли ЯВУ имплозивного типа:

- низкий (первые ЯВУ середины 1940-х гг.);
- средний (ЯВУ 1950-х гг.);
- высокий (ЯВУ, созданные после 1960-х гг.).

Этим уровням развития технологии соответствуют различные компоновки ядерной части ЯВУ и материалы различной термостойкости химического ВВ его неядерной части. Так, низкому уровню технологии первых ЯВУ соответствует использование химического ВВ в его неядерной части на основе Composition В и боратола (температура плавления 79 – 80°C, температура интенсивного пиролиза 180 – 200°C, температура самовозгорания 214 – 300°C) [12, 13].

Это значит, что низкому уровню технологии приписываются в ядерной части структура и конструкция первых ЯВУ середины 1940-х гг. Но и в неядерной части ЯВУ тоже предполагается использование только материалов химического ВВ той же середины 1940-х гг., которые характеризуются низкой температурой плавления. Это является в данном случае очень важным методологическим, но в то же время и очень странным предположением автора, выдвинутым им, по существу, во втором десятилетии XXI в. (т.е. 70 лет спустя, когда создавались эти первые ЯВУ).

Действительно, разработка и создание компактных ЯВУ может быть отнесена к уровням средней и высокой технологий, поскольку и исторически такие устройства появились заметно позже первых образцов. Однако в настоящее время вряд ли обоснованно утверждать, что термостойкие химические ВВ (РВХ 9502, ТАТВ) также следует относить к высокой технологии, столь же недоступной, как и создание компактной ядерной части устройств [14, 15]. Термостойкие химические ВВ, созданные в 1970-х гг., используются, например, для буровзрывных работ, описаны в открытой литературе (например, [16]) и не содержат в своем составе специальных материалов. Химические формулы этих термостойких ВВ известны, имеются и сведения о технологии их изготовления. Поэтому предложение автора монографии [9] не включать в круг анализируемых вариантов ЯВУ с низкой технологией ядерной части (середины 1940-х гг.), но окруженной термостойкими ВВ (разработанными в 1960 – 1970-е гг.) в неядерной части, нельзя признать убедительным.

Возможный аргумент о том, что эти термостойкие материалы химических ВВ могут быть недоступны для использования, не выглядит обоснованно. В конце концов, разве невозможно приобрести компоненты термостойкого ВВ и произвести сам материал этого ВВ? Отработка узла ЯВУ, формирующего сферически сходящуюся волну сжатия, как известно, не требует привлечения самой ядерной части (и материалов, ее составляющих). Именно без использования ядерной части в середине 1940-х гг. и была отработана технология имплозии.

Приведенный аргумент подтверждается прецедентом не столь давнего прошлого, когда недоступная центрифужная технология изотопного обогащения урана оказалась доступной для нелегальной сети известного пакистанского доктора Хана [17].

Это позволило Пакистану создать собственную атомную бомбу [18]. Используя свою нелегальную сеть, доктор Хан вполне легально заказывал и скупал в компаниях, разбросанных в различных странах по всему миру, отдельные детали и узлы оборудования для газовых центрифуг. Затем это оборудование было освоено и

использовано для строительства каскадов газовых центрифуг и наработки оружейного урана для пакистанской атомной бомбы.

Поэтому целесообразно рассмотреть модели устройств, соответствующие в ядерной части уровням низкой и высокой технологий (как «крайним» вариантам), а для создания имплозии предположить, что всегда применяется наиболее термостойкое химическое ВВ – ТАТВ (поскольку, оно является доступным в настоящее время) [6 – 9, 16].

КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НЕРАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЯВУ ИМПЛОЗИВНОГО ТИПА

Для того чтобы привести ЯВУ имплозивного типа в неработоспособное состояние, предлагается ввести в делящийся материал источник тепла, который вызовет перегрев элементов ЯВУ. В качестве источника тепла рассматривается изотоп ^{238}Pu (567 Вт/кг [5]), поскольку среди изотопов плутония именно изотоп ^{238}Pu является самым интенсивным источником энерговыделения за счет тепла α -распада [5 – 9].

При этом необходимо учесть все меры, принятие которых может продлить период времени, в течение которого ЯВУ будет сохранять свою работоспособность (назовем этот период «временем жизни» ЯВУ и обозначим $\Delta\tau$). Таким образом, задача обоснования требуемого уровня защищенности плутония (путем добавления изотопа ^{238}Pu) основывается на анализе прогресса ЯВУ имплозивного типа различной структуры при разных условиях теплоотвода и выборе такого варианта, при котором устройство 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.

В качестве мер, которые способны продлить «время жизни» ЯВУ, могут быть приняты следующие:

- предварительное охлаждение элементов ЯВУ;
- окружение ЯВУ теплоотводящим слоем;
- введение в структуру ЯВУ теплоизолирующего слоя, с помощью которого можно перераспределить поле температуры таким образом, чтобы ЯВУ наиболее долго сохраняло работоспособность.

Будем предполагать, что многослойное ЯВУ имплозивного типа имеет сферически-симметричную геометрию. Будем также исходить из того, что источник тепла α -распада – сферически-симметричен, граничные условия на внешней поверхности также сферически-симметричны и начальное распределение температур также описывается сферически-симметричной функцией.

В этом случае 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. Отметим, что помимо плавления и самовозгорания существует еще один процесс, который может привести к нарушению работоспособности химического ВВ, – пиролиз.

Согласно [16], в качестве критерия стабильности химического ВВ можно принять разложение 2% его молекул. Скорость разложения может быть оценена с помощью уравнения Аррениуса [19]. Зная скорость разложения, нетрудно определить долю химического ВВ (ϵ), разложившуюся к заданному моменту времени.

Для подавляющего большинства химических ВВ плавление наблюдается при более низкой температуре, чем самовозгорание, т.е. плавление является более жестким критерием. При этом в зависимости от рассматриваемого химического ВВ его плавление может наблюдаться как раньше, так и позже разложения 2% его молекул. В частности, для TNT плавление наступает раньше разложения 2% молекул, в то время как для ТАТВ разложение 2% молекул наблюдается раньше плавления.

Таким образом, можно заключить, что в зависимости от используемого химического ВВ наиболее жестким критерием, определяющим ограниченность работоспособности ЯВУ имплозивного типа, может являться как плавление химического ВВ, так и разложение 2% молекул химического ВВ.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАССМОТРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ПРОГРЕВА ЯВУ ИМПЛОЗИВНОГО ТИПА

В работе под охлаждением ЯВУ подразумевается то, что до окончательной стадии сборки элементы ЯВУ подвергаются предварительному охлаждению. Причем плутоний и уран охлаждаются в незначительной степени (или же не охлаждаются вовсе), а алюминий и химическое ВВ (материалы, обладающие самыми высокими теплоаккумулирующими свойствами) охлаждаются до более низких температур. Подобное предварительное охлаждение рассматривается исходя из соображений, чтобы ЯВУ сохраняло работоспособность наибольшее время, но при этом в течение всего времени прогрева температура плутония была бы 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 [20]. В итоге подобные фазовые превращения могут привести к частичной или полной потере работоспособности ЯВУ.

Непосредственно перед окончательной стадией сборки охлаждение прекращается, осуществляется достаточно быстрая сборка, а затем – транспортировка собранного ЯВУ уже без холодильного оборудования, но в условиях теплоизоляции от окружающей среды для максимального сохранения устройства в охлажденном состоянии.

Важно отметить, что процесс сборки внешней части ЯВУ (все элементы устройства кроме плутония и урана) может быть осуществлен при комнатной температуре без каких-либо лимитов времени. Затем собранная внешняя часть ЯВУ подвергается предварительному охлаждению. После прекращения предварительного охлаждения необходима лишь окончательная стадия сборки ЯВУ – вложение плутония и урана в полусферы внешней части устройства и окружение теплоизолятором.

В рамках данного рассмотрения потеря работоспособности ЯВУ может произойти только после извлечения элементов ЯВУ из «холодильника». В этой связи можно выдвинуть следующий критерий неработоспособности устройства: ЯВУ имплозивного типа непригодно для практического применения, если оно теряет работоспособность за время, меньшее, чем необходимо для окончательной стадии его сборки, транспортировки и использования.

Таким образом, данная схема, основывающаяся на временном факторе, требует рассмотрения нестационарного процесса прогрева ЯВУ имплозивного типа с целью, чтобы сравнить время достижения критических температур для элементов ЯВУ с тем временем, которое требуется для окончательной стадии сборки, транспортировки и использования устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно заключить, что в фундаментальной монографии доктора Г. Кесслера [9] сомнительным является то, что барьер, определяющий защищенность плутония, по

существо, был поставлен в прямую зависимость от выдвинутого автором барьера недоступности термостойкого обычного ВВ. Недостаточно верный основополагающий посыл привел к необоснованному заключению о защищенности плутония.

Кроме того, рассмотрение асимптотического профиля температур в элементах ЯВУ является недостаточно обоснованным при выработке рекомендаций по защищенности плутония, поскольку окончательная стадия сборки, транспортировки и использования устройства требует определенного конечного времени.

Помимо этого не исчерпаны еще и дополнительные возможности, которые замедляют процесс прогрева ЯВУ.

Таким образом, авторами разработана расчетно-теоретическая модель для оценки защищенности плутония, которая устраняет недостатки предыдущих работ по данной тематике. Развитая модель основывается на обоснованной структуре ЯВУ, рассматривает нестационарный процесс прогрева и принимает во внимание дополнительные меры по замедлению процесса прогрева.

Литература

1. *Gillette Robert* Impure Plutonium Used in '62 A-Test. – Los Angeles Times, September 16, 1977. – Part 1. – P. 3.
2. International Conference on Nuclear Power and its Fuel Cycle, Vol. 2. «The nuclear fuel cycle, part 1». – Salzburg, Austria, 2-13 May 1977.
3. *DeVolpi A.* Denaturing Fissile Materials // Progress in Nuclear Energy. – 1982. – Vol. 10. – № 2. – PP. 161-220.
4. *Carson Mark J.* Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. // Science & Global Security. – 1993. – Vol. 4. – PP. 111-128.
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. International Workshop on Non-proliferation of Nuclear Materials. – Obninsk, Russia, 29 September – 3 October 2008.
8. *Kessler G.* Proliferation Resistance of Americium Originating from Spent Irradiated Reactor Fuel of Pressurized Water Reactors, Fast Reactors and Accelerator-Driven Systems with Different Fuel Cycle Options. // Nuclear Science & Engineering. – 2008. – Vol. 159. – PP. 56-82.
9. *Kessler G.* Proliferation-Proof Uranium. Plutonium Fuel Cycles. / Safeguards and Non-Proliferation. KIT Scientific Publishing, Germany, 2011.
10. *Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Ансэ В.А., Куликов Г.Г.* Расчетные модели для количественной оценки защищенности делящихся материалов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 184-195.
11. *Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G.* Mathematical models for quantitative evaluation of fissionable materials proliferation protection. American Nuclear Society. IV-th Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management 2009 (ANFM IV). – Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.
12. Электронный ресурс: https://en.wikipedia.org/wiki/Composition_B (дата доступа 11 апр. 2017).
13. Электронный ресурс: <https://en.wikipedia.org/wiki/Baratol> (дата доступа 11 апр. 2017).
14. Электронный ресурс: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer-bonded_explosive (дата доступа 11 апр. 2017).
15. Электронный ресурс: <https://en.wikipedia.org/wiki/PBX> (дата доступа 11 апр. 2017).
16. *Манелис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И., Струнин В.А.* Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. – М.: Наука, 1996. – 224 с.

17. Доктор Хан: ядерный контрабандист прервал затянувшееся молчание. // Интернет-журнал AtomInfo.ru, 10.09.2009. Электронный ресурс: <http://www.atominfo.ru/news/air7423.htm> (дата доступа 22 окт. 2016).

18. Ядерное нераспространение: Учебное пособие для ВУЗов. В 2-х томах. Т. 1. / Под общ. ред. В.А. Орлова. – М.: ПИР-Центр, 2002. 528 с.

19. *Stiller W.* Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics. 100 Years of the Arrhenius Equation. – Leipzig: BSB W. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1989.

20. Плутоний. Фундаментальные проблемы. Т. 2. Пер. с англ. / Под ред. д.ф.-м. н. Б.А. Надькто и к.т.н. Л.Ф. Тимофеевой. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.

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

CALCULATIONAL MODEL AND PHYSICAL AND TECHNICAL FACTORS THAT DETERMINE PLUTONIUM PROLIFERATION PROTECTION

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

National Nuclear Research University «MEPhI»

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

Since closed nuclear fuel cycle presumes plutonium extraction from spent nuclear fuel with further plutonium recycling in fresh fuel compositions, the non-proliferation problem of fissile material (plutonium) takes the more practical significance. So, it is important to answer the following question: up to what extent could physical and technical properties of fissile materials counteract with diversion of these materials from peaceful to illegal, non-power applications?

In the present work the term “proliferation protection” is understood from physical-technical point of view, while measures of physical protection, accounting and control of nuclear materials are not considered. Thus, plutonium proliferation protection means that it is technically impossible to assemble implosion-type nuclear explosive device (NED) on its basis due to overheating of device components and its consequent non-functionality.

The aim of the work consisted in assessing correctness of the methodological approach used in previous works devoted to plutonium proliferation protection and developing the model, eliminating defects of these works.

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 conclusions.

1. It is not a reasonable estimation of plutonium proliferation protection, if this evaluation is based on analysis of such an implosion-type NED, which excludes the use of advanced heat-resistant and thermally high conductive chemical high explosive (HE) because of its inaccessibility.

2. Consideration of asymptotic temperature distribution in NED components could lead to wrong recommendation on plutonium proliferation protection.

3. When analyzing the physical and technical factors determining plutonium proliferation protection the options to slow down NED warm up process were not exhausted.

General conclusion. The basic principle Professor Kessler has used in his fundamental monograph appeared to be ill-grounded and led to the wrong evaluation of plutonium proliferation resistance. Development of the used methodology with correct accounting for some additional effects can produce the more stringent requirements to ^{238}Pu content in plutonium that is able to provide its reliable proliferation protection.

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

REFERENCES

1. Gillette Robert. Impure Plutonium Used in '62 A-Test. Los Angeles Times, September 16, 1977, Part 1, p. 3.
2. International Conference on Nuclear Power and its Fuel Cycle. Vol. 2 «The nuclear fuel cycle, part 1». Salzburg, Austria, 2-13 May 1977.
3. DeVolpi A. Denaturing Fissile Materials. *Progress in Nuclear Energy*. 1982, v. 10, no. 2, pp. 161-220.
4. Carson Mark J.. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. *Science & Global Security*. 1993, v. 4, pp. 111-128.
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. International Workshop on Non-proliferation of Nuclear Materials. Obninsk, Russia, 29 Sep. – 3 Oct. 2008.
8. Kessler G. Proliferation Resistance of Americium Originating from Spent Irradiated Reactor Fuel of Pressurized Water Reactors, Fast Reactors and Accelerator-Driven Systems with Different Fuel Cycle Options. *Nuclear Science & Engineering*. 2008, v. 159, pp. 56-82.
9. Kessler G. *Proliferation-Proof Uranium. Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-Proliferation*. Germany, KIT Scientific Publishing, 2011.
10. Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G. Calculational models for quantitative evaluation of proliferation protection for fissionable materials. *Izvestiya vuzov. Yadernay Energetika*. 2010, no. 2, pp. 184-195 (in Russian).
11. Kulikov E., Shmelev A., Apse V., Kulikov G. Mathematical models for quantitative evaluation of fissionable materials proliferation protection. American Nuclear Society. IV-th Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management 2009 (ANFM IV). Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.
12. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Composition_B (accessed Apr. 11 2017)
13. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Baratol> (accessed Apr. 11 2017)
14. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer-bonded_explosive (accessed Apr. 11 2017)
15. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/PBX> (accessed Apr. 11 2017)

16. Manelis G.B., Nazin G.M., Rubcov Ju.I., Strunin V.A. *Thermal decomposition and burning of explosives and powders*. Moscow. Nauka Publ., 1996, 224 p. (in Russian).

17. Dr Khan: Nuclear Smuggler Broke the Silence.

Available at: <http://www.atominfo.ru/news/air7423.htm> (accessed Oct. 22 2016) (in Russian).

18. Orlov V.A. *Nuclear non-proliferation*. Vol. 1. Moscow. PIR-Center Publ., 2002. 528 p. (in Russian).

19. Stiller W. *Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics. 100 Years of the Arrhenius Equation*. Leipzig, BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1989.

20. *Plutonium. Fundamental problems*. Vol. 2. Ed. by B.A. Nadykto and L.F. Timofeeva. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2003 (in Russian).

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