

ПРОВЕРКА ЧИСЛА БОЕГОЛОВОК НА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТАХ ПОСРЕДСТВОМ ИНСПЕКЦИИ НА МЕСТЕ

Роберт Мозли

Большая часть советских и американских стратегических ядерных боеприпасов в настоящее время размещается на баллистических ракетах с несколькими независимо доставляемыми боеголовками. В текущих и в последующих переговорах по сокращению стратегических ядерных вооружений может понадобиться либо сократить число ракет с несколькими боеголовками, либо сократить число боеголовок на этих ракетах.

Вообще говоря, сокращение числа ракет (или, в случае баллистических ракет на подводных лодках, сокращение числа пусковых установок) является более предпочтительным способом сокращения общего числа ядерных боеголовок. Альтернативный способ таит в себе опасность возможного нарушения режима договора посредством установки ракет, испытанных ранее с большим числом боеголовок.

Следует сравнить риск подобного нарушения с временем и усилиями, необходимыми для контроля возможных действий противной стороны. Процедуры, связанные с нарушением договора, внешне похожи на процедуры обслуживания ядерных боеголовок и блока разведения головных частей, предназначенного для вывода боеголовки на индивидуальные траектории. В некоторых случаях для этого придется поднять баллистическую ракету из пусковой "шахты", а иногда, возможно, эту операцию можно провести и на месте. В таких случаях демонтаж конуса обтекателя и других защитных покрытий и установка дополнительных ядерных боеголовок могут быть проведены менее чем за сутки хорошо подготовленной командой, регулярно выполняющей подобные операции. Несколько таких групп за месяц могут переоборудовать сотни баллистических ракет. При таких обстоятельствах сокращение числа ядерных боеголовки на ракетах может рассматриваться только как временная мера, принимаемая до вступления в силу других, более надежно проверяемых соглашений.

С другой стороны, если для переоборудования баллистических ракет потребуется полностью извлечь ее из пусковой установки (как, скорее всего, будет необходимо для баллистических ракет на подводных лодках и для ракет на подвижных пусковых установках) и переместить ее для установки новых боеголовки в специальные мастерские, то для переоборудования одной ракеты может понадобиться не менее одной недели, а заметное нарушение, связанное с переделкой нескольких сотен ракет, может потребовать до нескольких месяцев. Такая активность может быть сравнительно легко обнаружена и в этом случае меры по сокращению числа ядерных боеголовки на отдельных носителях могут стать полезным методом сокращения ядерных вооружений.

В такой ситуации для подтверждения соблюдения договора необходимо разработать методы проверки числа ядерных боеголовки, которые могли бы обеспечить уверенность в соблюдении положений договора другой стороной. В этой статье будут рассмотрены технические аспекты проверки установленного числа ядерных боеголовки на баллистических ракетах. Основная трудность таких проверок заключается в том, что многие технические детали конструкции блока разведения боеголовки и самих боеголовки, которые могут быть выявлены при проверках, могут рассматриваться проверяемой стороной как секретные, и предлагаемые способы проверки должны обеспечить безопасность этих секретов.¹

Желательно, чтобы инспекция могла проводиться визуально. Если визуальная инспекция может привести к раскрытию излишней информации, то следует рассматривать методы, основанные на использовании проникающих излучений. При этом могут быть использованы как естественное радиоактивное излучение входящих в состав ядерных боеприпасов урана и плутония, так и внешние источники излучений, позволяющие реализовать радиографические методы или регистрацию наведенных излучений. В статье будет показано, что наилучшим методом является радиография.

Автор статьи - это независимый консультант, проживающий по адресу: 601 Лорел Авеню, Менло Парк, Калифорния, США, СА 94025.

КОНЦЕПЦИИ ВЕРИФИКАЦИИ

В договоре по сокращению ядерных вооружений может быть ограничено количество ядерных боеголовок на каждой из ракет указанного типа. Эти ракеты могут подвергаться инспекции на местах как для контроля процесса демонтажа лишних боеголовок так и для гарантии от возможных нарушений договора. Контролирование процесса демонтажа снятых боеголовок и введение мер контроля над освобождающимися расщепляющимися материалами позволит сделать нарушения режима договора менее вероятными.²

Ракеты с уменьшенным числом ядерных боеголовок могут подвергаться дополнительным инспекциям для того, чтобы число боеголовок не было тайно увеличено. Поскольку каждое обнаруженное нарушение будет рассматриваться как нарушение договора, то, для того, чтобы выявить крупномасштабное переоборудование большого числа ракет, можно будет ограничиться проверкой сравнительно небольшого числа случайно выбранных ракет. Например, если одна из сторон решит нарушить договор, не снимая лишние боеголовки с 25 процентов своих ракет, то при проверке одной ракеты вероятность обнаружения нарушения будет равна 25 процентам, а при проверке двух - 44 процентам. В общем случае, если лишние боеголовки не были сняты с доли ракет, равной C , то при проверке S ракет вероятность обнаружения нарушения будет равна $1-(1-C)^S$. Если в дальнейшем будет производиться демонтаж ракет, то во время демонтажа можно провести дополнительную проверку возможных нарушений.

При проверке нескольких ракет в год гораздо легче будет обеспечить извлечение баллистических ракет из шахт или из пусковых установок подводных лодок для доставки на специальные базы с радиографическими рентгеновскими установками. В этом случае значительно уменьшится вероятность повреждения ракет от воздействия контролирующей аппаратуры, а безопасность персонала может быть обеспечена установкой дополнительной радиационной защиты. В ситуации с проверкой малого числа ракет можно будет применять даже мощные источники излучения или другие разрушающие меры контроля, которые смогут сделать ракету небоеспособной.

Для упрощения проверки большого числа ракет в полевых условиях необходимо изучить возможность того, что полезная нагрузка ракеты в целом может иметь такие отличительные характеристики, которые будут изменяться при изменении числа ус-

тановленных ядерных боеголовок. Такие характеристики могут быть связаны с полем спонтанного радиоактивного излучения, с полем индуцированного излучения при воздействии сравнительно маломощных источников гамма- или нейтронного излучения, с профилем пропускания при радиографических измерениях или с профилем акустического отклика при генерации ультразвуковых волн. Детальное изучение одной из ракет, с которой предполагается снимать ядерные боеголовки, позволит определить как число установленных на ней боеголовок, так и ее отличительные особенности (сигнатуры), которые могут быть использованы для верификации проверки соглашения. Эти сигнатуры должны стать базой для сравнения с данными измерений других ракет того же типа, которые будут модифицироваться в связи с заключенным соглашением.

Большую помощь может оказать опечатывание и маркирование ракет. После того, как была проведена проверка ракеты и ее опечатывание и маркирование, все дальнейшие проверки могут быть сведены к проверке целостности печатей и меток. Эти методы могут оказаться особенно полезными в тех случаях, когда высокие уровни радиационных доз, полученные при повторных радиографических проверках, могут повредить устройства ракеты. Однако, такая схема проверки может работать только тогда, когда запечатанные отсеки ракеты будут открываться очень редко. Гарвин³ предложил альтернативный подход (установку опечатанных и маркированных макетов боеголовок на месте снятых), который снимает необходимость опечатывания всего пространства под обтекателем и позволяет проводить регулярное обслуживание без нарушения печатей.

В некоторых случаях может оказаться полезным проводить маркирование ракет до снятия ядерных боеголовок. После маркирования каждая из ракет будет направляться на специальную площадку для демонтажа лишних боеголовок, которые будут вывозиться с этой площадки в специальных контейнерах с подтверждением того, что в каждом контейнере есть боеголовка. Модифицированная ракета будет запечатана, помечена и возвращена на пусковую установку.

МЕТОДЫ ИНСПЕКЦИИ НА МЕСТЕ

В данной статье рассматриваются четыре метода подсчета ядерных боеголовок при инспекции на месте:

- визуальный осмотр после снятия обтекателя;
- регистрация спонтанного радиоактив-

ного излучения расщепляющихся материалов⁴;

- применение рентгеновской или нейтронной радиографии для выделения ядерных боеголовок по поглощению излучения в плотных расщепляющихся материалах;

- облучение ядерной боеголовки гамма-квантами или нейтронами высоких энергий для индуцирования деления ядер расщепляющихся материалов в ядерных боеголовках и увеличения выхода проникающих ядерных излучений.⁵

Первый метод проверки требует снятия обтекателя, а все остальные - нет.

Визуальный осмотр. Чем меньше технических сложностей возникает в методе верификации, тем он лучше. В данном случае такой метод заключается в снятии кожуха обтекателя и других защитных экранов и прямом подсчете ядерных боеголовок при визуальном осмотре. Несмотря на то, что при этом могут быть получены некоторые сведения о конструкции полезной нагрузки ракеты, этот метод не следует исключать полностью. В открытой литературе уже были опубликованы фотоснимки американских головных частей и блоков разведения боеголовок. Если в Советском Союзе сохранится существующий подход к проблемам верификации, то не исключено, что он согласится на визуальный осмотр.

Даже в том случае, когда полный визуальный осмотр будет неприемлем, может быть допущен частичный осмотр. После снятия обтекателя можно установить специальный временный экран, который позволит подсчитать установленные боеголовки и не даст получить секретную информацию об устройстве самих боеголовок и блока разведения, но в то же время обеспечит возможность подтверждения снятия лишних боеголовок. Такой метод может оказаться полезным для проверки блоков разведения, у которых все боеголовки расположены на одной плоскости.

В большинстве случаев подобный подход ограниченного визуального осмотра потребует свободного доступа к зоне размещения полезной нагрузки ракеты. Для баллистических ракет шахтного базирования эти операции можно будет проводить при тех же возможностях доступа, которые предоставляются для обычных операций обслуживания (в самих шахтах или на специальных площадках, что, вероятно, произойдет в случае ракет на подводных лодках или на подвижных пусковых установках).

Методы визуального осмотра, по-видимому, будут неприменимы в тех случаях, когда на блоке разведения будут установлены тяжелые ложные цели, похожие по своей

конструкции на реальные головные части. Такие объекты могут отличаться от реальных боеголовок, но такие различия по своей природе являются секретными, поскольку их знание позволит отличить ложные цели от реальных головных частей во время полета. Для проверки таких объектов надо либо использовать обсуждаемые ниже методы, либо засчитывать их как реальные боеголовки.

Пассивная инспекция. Метод регистрации собственного радиоактивного излучения находящихся в ядерной боеголовке расщепляющихся материалов может оказаться весьма полезным. Однако, его эффективность сильно зависит от конструктивных особенностей ядерного боеприпаса.

Комбинация детекторов нейтронов и гамма-квантов позволит обнаружить излучение нескольких килограммов расщепляющихся материалов или урана-238 на расстоянии нескольких метров. Установка защиты от этого излучения маловероятна, поскольку весовые и габаритные резервы полезных нагрузок баллистических ракет весьма ограничены.

В статье С.Феттера и др.⁶ проведены оценки собственного радиоактивного излучения четырех гипотетических вариантов конструкций ядерного боеприпаса. В трех вариантах, в которых находятся большие количества урана-238 с сильным гамма-излучением, или плутония-240 с сильным нейтронным излучением, проблем с регистрацией этого излучения не возникает. Однако, в четвертом варианте, в котором используются уран-235 и вольфрам, выходящее излучение очень слабое (около 20 нейтронов в секунду и 30 гамма-квантов в секунду) и обнаружить его на фоне естественного излучения практически невозможно.

Модели ядерных боеприпасов, используемые в статье С.Феттера и др., не соответствуют реальным конструкциям; они основаны на оценках общего количества расщепляющихся материалов в ядерном взрывном устройстве, на известных размерах и весах ядерных боеголовок баллистических ракет, и на общих представлениях о том, что для начала цепной реакции сферическая оболочка из расщепляющихся материалов должна обжиматься сходящейся ударной волной. Полученные оценки интенсивности излучения, по-видимому, имеют точность не хуже одного порядка величины. Они относятся только к первичному компоненту термоядерных устройств. В реальных образцах ядерного оружия интенсивность излучения может быть значительно большей, как из-за применения дополнительного количества расщепляющихся материалов во вторичных

компонентах, так и из-за того, что используемые материалы могут быть загрязнены искусственными радиоактивными изотопами, такими, как уран-232, который был обнаружен в советской ядерной боеголовке во время эксперимента по верификации на Черном море.⁷ Однако, с точки зрения проверяющей стороны, естественно предположить, что при попытках скрытого нарушения договора будут приложены усилия для возможного использования как можно более чистых материалов. Важно отметить, например, что можно значительно уменьшить интенсивность нейтронного излучения ядерных боеприпасов, используя вместо обычного плутония оружейного качества, содержащего шесть процентов плутония-240, высокочистый плутоний-239. Комбинация этого материала и вольфрамового "поршня" делает ядерное взрывное устройство практически необнаружимым. Дополнительная стоимость обработки плутония может составить около одного миллиона долларов за килограмм⁸ - это немало, но вполне возможно.

Определить количество ядерных боеголовок в полезной нагрузке баллистической ракеты на основе измерений их естественного радиоактивного излучения значительно сложнее, чем просто обнаружить это излучение. Излучение разрешенных боеголовок может создать сильный радиационный фон, в условиях которого обнаружить лишние боеголовки можно будет лишь при использовании коллимированных детекторов и при достаточно сильном сигнале от самих боеголовок.

Радиографическая инспекция. Основной задачей радиографической инспекции следует считать подсчет количества областей повышенной концентрации тяжелых металлов высокой плотности в зоне полезной нагрузки баллистической ракеты. Поскольку масса полезной нагрузки ограничена, такие материалы вряд ли будут использоваться в конструкции самой ракеты. Любая концентрация вещества со средней плотностью в 7 г/см^3 или выше⁹ в объеме с радиусом около 10 см может рассматриваться как часть ядерной боеголовки.

Как нейтроны, так и гамма-кванты высоких энергий могут проходить через заметные количества обычных конструкционных материалов (таких, как алюминий, сталь, углерод или пластмассы) и обеспечить приемлемую контрастность при просвечивании зон, в которых могут располагаться ядерные взрывные устройства.

Радиографический метод предусматривает размещение источника нейтронов или гамма-квантов (или рентгеновской труб-

ки¹⁰) с одной стороны обтекателя и детекторов излучения с другой (см. рис.1). Система источников излучения и детекторов должна вращаться вокруг обтекателя для того, чтобы получить несколько проекций радиографических изображений боеголовок, показывающих поглощение в расщепляющихся материалах.^{11,12}

Несмотря на то, что нейтронные генераторы и рентгеновские установки способны обеспечить достаточно малое сечение пучка частиц, радиоизотопные источники могут оказаться более удобными и дешевыми.¹³ Их использование может быть также более приемлемым для проверяемой стороны, поскольку интенсивность радиоизотопного источника не может быть "случайно" увеличена.

В схеме проверки, показанной на рис.1, предполагается использовать источник гамма-квантов с энергией около 1 МэВ. Этот источник может представлять собой радиоактивный изотоп, расположенный в массивном защитном цилиндрическом контейнере с автоматически открывающейся крышкой и коллиматором. Можно применить и электронный ускоритель, который позволит регулировать проникающую способность и интенсивность излучения (за счет повышения сложности и стоимости).

Очень мощный источник с радиоактивным кобальтом-60 активностью в 1 кюри будет излучать около 300 тысяч гамма-квантов в секунду в телесном угле 10^{-4} стерадиана. С другой стороны обтекателя, диаметр которого составляет около двух метров, будет расположена мозаика из сцинтилляционных детекторов гамма-излучения с кристаллами иодистого натрия размером 20×20 сантиметров. В этих детекторах может производиться отбор регистрируемых фотонов по энергиям, что позволит избавиться от фона рассеянных частиц, энергия которых будет меньше начальной. Пространственное разрешение детекторов будет сравнимо с размерами отдельных детекторов мозаики.

На рис.2 показана ориентировочная зависимость пропускания гамма-излучения с энергией фотонов в 1 МэВ в моделированном боеприпасе, рассматривавшемся в статье С.Феттера и др. от расстояния до его центра.¹⁴

Для того, чтобы предотвратить получение секретной информации при радиографической инспекции, можно ограничить пространственное разрешение измерений, контролируя размер детектора, длину и диаметр коллиматора, шаг сканирования, мощность источника и длительность измерений. Данные измерений могут предоставляться ин-

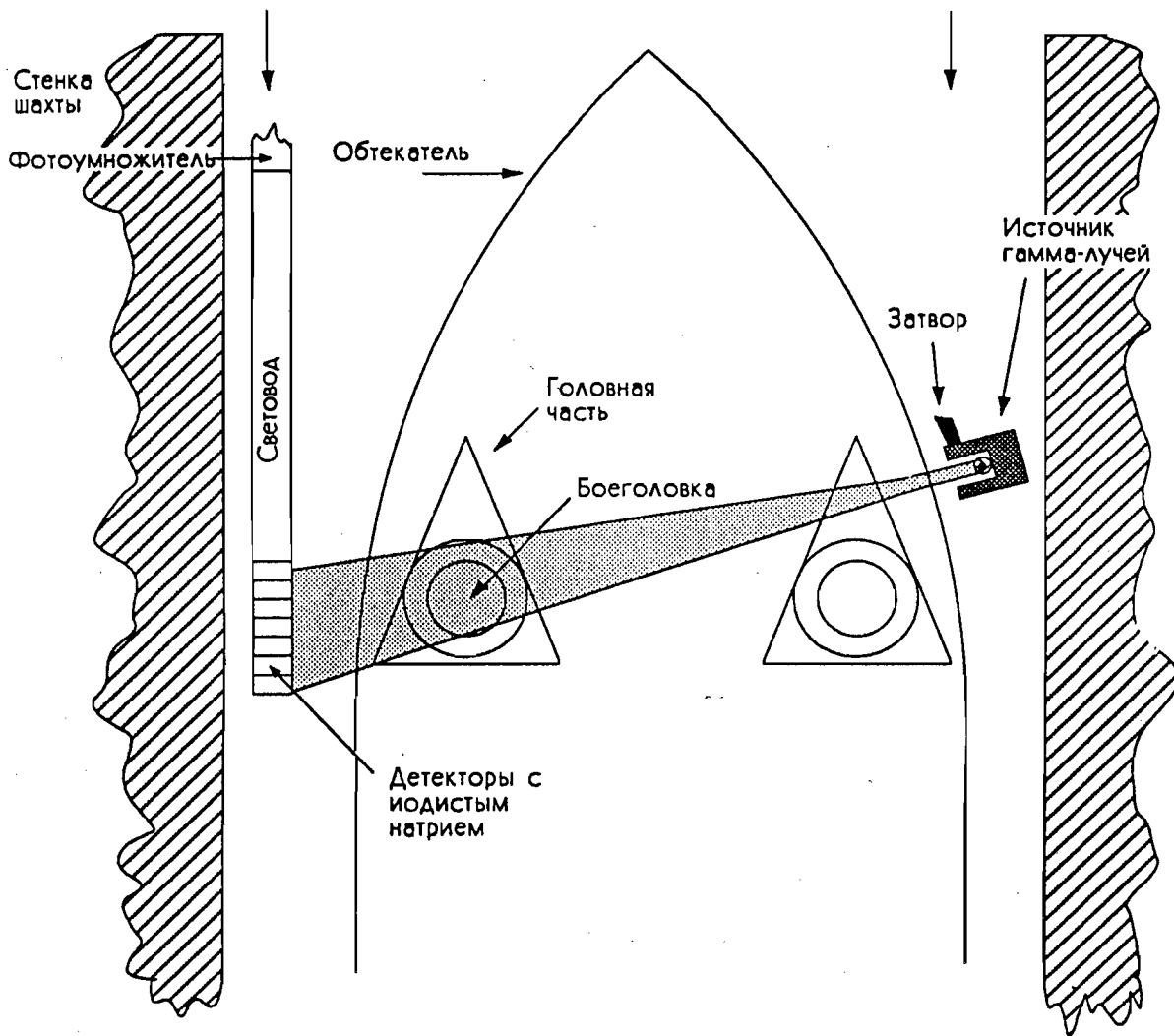


Рисунок 1

Радиографическое обследование баллистической ракеты в шахте.

спектрам и проверяемой стороне одновременно. Можно провести проверку разрешения перед измерениями при помощи стандартного поглотителя из тяжелого металла (например, обедненного урана). Необходимо также проводить контроль радиационной

дозы для того, чтобы не нанести поврежденный проверяемой аппаратуре.

Кроме того, можно разработать алгоритм, предназначенный для преобразования данных измерений таким образом, чтобы ограничить выявляемые при измерениях

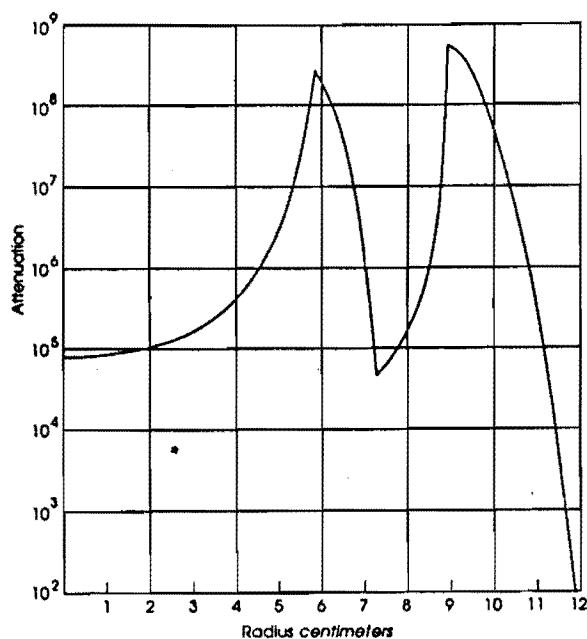


Рисунок 2

Поглощение проходящего пучка гамма-лучей при радиографическом обследовании (разрешение сравнимо с диаметром "поршня" боеголовки).

детали. Возможным вариантом такого алгоритма может быть поиск области сильного поглощения в заданном месте. Программа обработки данных может разрабатываться, контролироваться и испытываться обеими сторонами.

На рис.3 показана зависимость пропускания от угла сканирования при размещении нескольких боеголовок по периметру круга при разрешении, равном диаметру "поршня". Через центральную область ядерного боеприпаса могут пройти только около 10 фотонов из миллиона. Поглощение в "поршне" само по себе может достигнуть около 50 000 во внешних его областях (вне блока расщепляющихся материалов). С другой стороны, поглощение в блоке взрывчатого вещества будет по меньшей мере в десятки раз меньше. Несмотря на то, что реальная конфигурация ядерного взрывного устройства может отличаться от модели, в любом случае в ней будут находиться сравнимые по размерам блоки из тяжелых металлов.

Несмотря на то, что для инспекции зоны полезной нагрузки за приемлемое время (порядка одного часа) потребуется довольно мощный источник, его пучок на расстоянии в один метр будет создавать дозу менее 10^{-5} рад в секунду, а на расстоянии в 10 см - менее одного миллирада в секунду. Такая доза опасна для человека, но она вряд ли вызовет

повреждение электронной аппаратуры.

Взаимодействие нейтронов отличается от взаимодействия гамма-квантов и поэтому сравнение результатов измерений с нейтронами и с гамма-квантами позволит получить более обширную информацию об используемых материалах. Это может оказаться излишним для верификационных систем, потому что инспекторы могут получить информацию, которую проверяемая сторона считает секретной. Коллимирование нейтронных источников сложнее, чем источников гамма-квантов, а измерение энергии нейтронов в данном случае не приведет к серьезным преимуществам. Поэтому для поставленной задачи применение источников гамма-квантов предпочтительнее.

Серьезной проблемой радиографических измерений в полевых условиях может оказаться отсутствие места для размещения источника излучения с одной стороны обтекателя и детекторов с другой. В некоторых шахтах это оборудование можно разместить только над ракетой. В этом случае придется поднимать ракету из шахты и проводить измерения над шахтой. Не исключено, что в некоторых шахтах обслуживание ракет проводится именно таким способом. Использование радиографии для проверки ракет на подводных лодках может потребовать перемещения ракеты из пусковой установки на

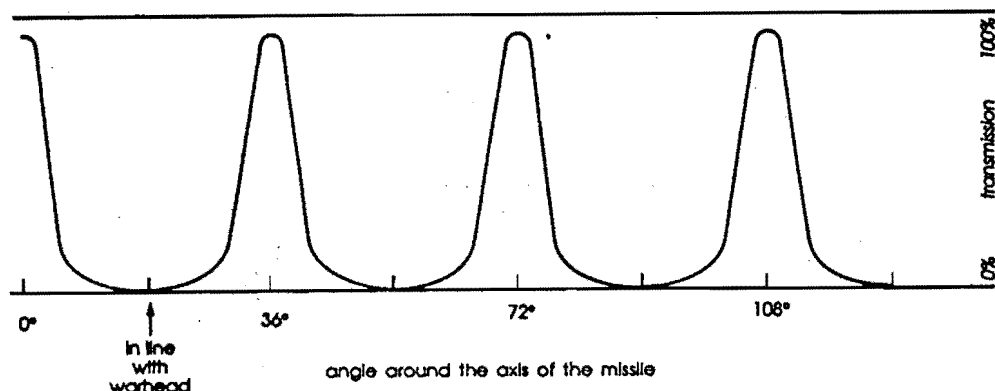


Рисунок 3

Интенсивность проходящего пучка гамма-лучей при радиографическом обследовании ракеты с десятью боеголовками, расположенными по кругу, при вращении источника и детектора вокруг конуса обтекателя (разрешение сравнимо с диаметром "поршня" боеголовки).

специальную базу. Аналогичные требования могут возникнуть и при проверке ракет, размещенных на подвижных пусковых установках.

Измерения излучения, возникающего при индуцированном делении. В тех случаях, когда радиографические измерения по какой-либо причине оказываются невозможными, в качестве альтернативного метода проверки может быть использовано облучение зоны полезной нагрузки нейтронным или гамма-излучением внешнего источника, вызывающим деление ядер расщепляющихся материалов. Возможная конфигурация аппаратуры для такой проверки показана на рисунке 4.

При поиске лишних (необъявленных) боеголовок методом "активационной" инспекции присутствие разрешенных боеголовок может создавать заметный радиационный фон. В частности, если в каждой из разрешенных ядерных боеголовок находится по четыре килограмма обычного плутония оружейного качества, то каждая из них будет излучать около 400 тысяч нейтронов в секунду.¹⁵ Поэтому для надежной регистрации в каждой из необъявленных боеголовок при вынужденном делении ядер плутония должно быть образовано достаточно большое количество нейтронов.

Частицей, лучше всего приспособленной для индуцированного деления ядер, является нейтрон. Однако, для обнаружения лишних боеголовок в присутствии разрешенных, применение нейтронных пучков не

очень удобно. Нейтроны пучка будут рассеиваться и попадать в разрешенные боеголовки, находящиеся вне поля прямого пучка. Рассеянные нейтроны малых энергий вызывают деление ядер с большей вероятностью, чем нейтроны высоких энергий из первичного пучка.¹⁶ При хорошей коллимации детектора можно уменьшить влияние этого эффекта; дополнительный отбор рассеянных событий может быть обеспечен измерением энергии регистрируемых частиц.¹⁷ Возможен альтернативный метод, связанный с использованием линейного электронного ускорителя, способного генерировать пучок тормозных¹⁸ гамма-квантов с энергиями в 10 - 15 МэВ. Этот пучок может быть коллимирован, а энергия фотонов будет лежать выше порога вынужденного фотоделения ядер, равного примерно 5 МэВ. Для того, чтобы исключить вклад образования нейтронов в конструкционных материалах при обычных фотоядерных реакциях, измерения можно проводить при нескольких энергиях фотонов. В отличие от нейтронов, каждое рассеяние фотона на большой угол приводит к тому, что его энергия значительно уменьшается, и вынужденное фотоделение становится невозможным.

К сожалению, сечение деления ядер под действием фотонов примерно в тысячу раз меньше, чем под действием нейтронов высоких энергий. Эта разница в вероятности процессов может быть скомпенсирована увеличением мощности пучка от линейного ускорителя, что, однако, повысит вероятность

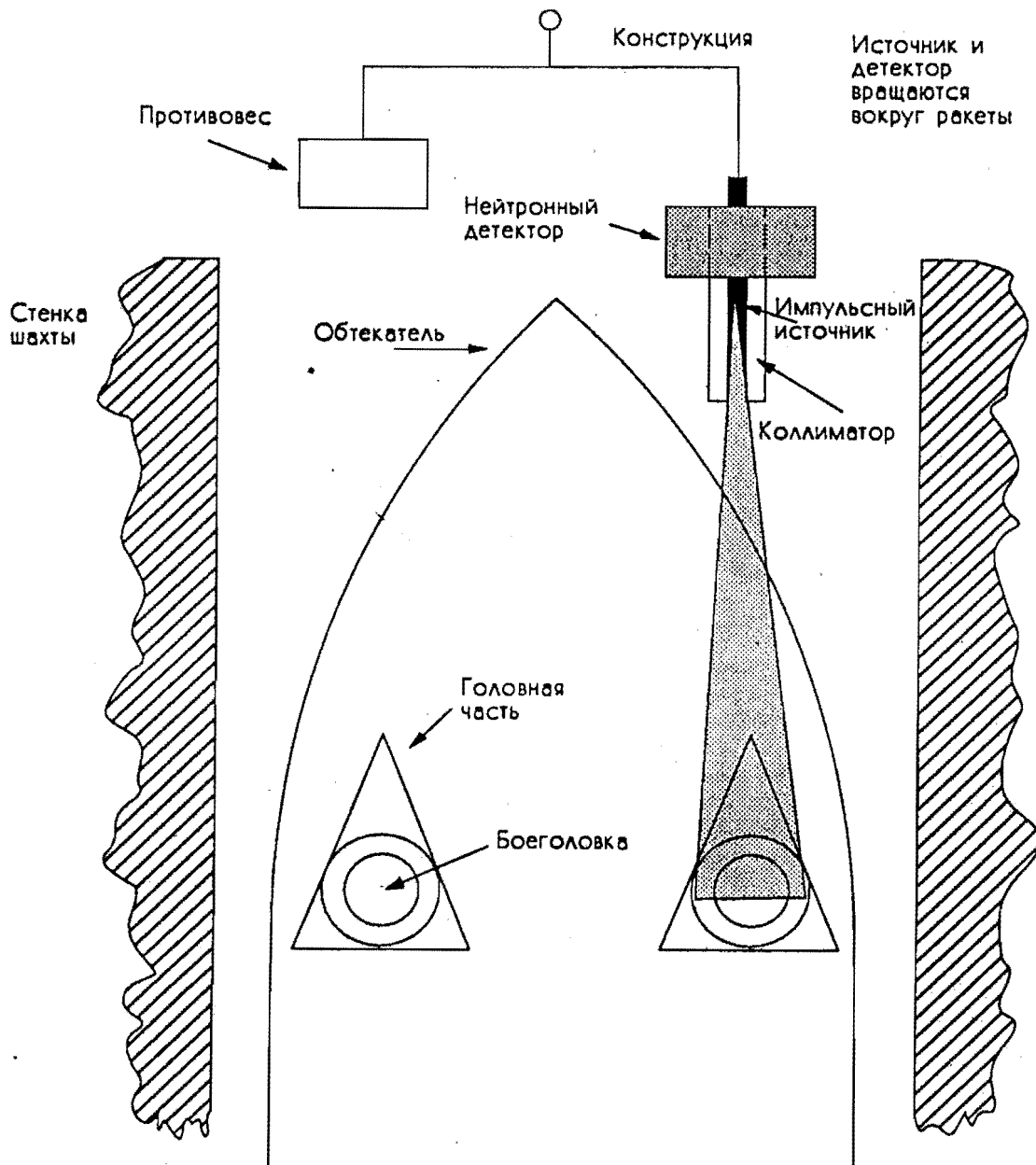


Рисунок 4

Поиск скрытой боеголовки по индуцированному делению ядер.

радиационных повреждений.

Характеристики регистрируемых при измерениях частиц должны отличаться от характеристик частиц первичного пучка и частиц, образующихся в ядерных реакциях, отличных от реакций деления. Некоторые из возможных комбинаций приведены в табл. 1. Например, при обнаружении вынужденного деления ядер нельзя использовать мгновен-

ное гамма-излучение, поскольку такое излучение может сопровождать и многие другие ядерные реакции в обычных материалах. Аналогично, несмотря на то, что поток мгновенных нейтронов от фотоделения довольно велик, вероятность образования нейтронов в других фотоядерных реакциях может быть в 10 раз выше.

Таблица 1

Комбинации частиц первичного пучка и детектируемых частиц, приемлемые для поиска расщепляющихся материалов

Первичный пучок	Детектируемые частицы
Нейтроны малых энергий	Нейтроны больших энергий
Гамма-кванты	Нейтроны
Импульсные нейтроны	Запаздывающие нейтроны или гамма-кванты
Импульсные фотоны	Запаздывающие нейтроны или гамма-кванты

Наиболее выделяемым типом частиц от вынужденного фотоделения ядер следует считать запаздывающие нейтроны. Несмотря на то, что поток запаздывающих нейтронов деления примерно в 100 раз меньше, чем поток мгновенных, вероятность образования таких нейтронов в других ядерных реакциях пренебрежимо мала. Напротив, образование запаздывающих гамма-квантов в обычных ядерных реакциях возможно.

По этим причинам мы предлагаем такую процедуру верификации, в которой импульсный источник фотонов располагается над конусом обтекателя ракеты и последовательно сканирует его поверхность с регистрацией запаздывающих нейтронов при помощи частично коллимированного детектора (см. рис.4).

Коллимированный пучок фотонов от линейного ускорителя создать очень легко, и поэтому расстояние от линейного ускорителя до проверяемого объекта большого значения не имеет. Размеры пучка могут быть подстроены под размеры блока расщепляющегося материала в ядерной боеголовке. При оценке величины полезного сигнала запаздывающих нейтронов мы можем считать, что все фотоны пуска попадают в нужное место.

Предполагается, что фотоны тормозного излучения образуются в результате торможения электронов с энергией 15 МэВ в плотной мишени; такой пучок будет содержать фотоны любых энергий от 0 до 15 МэВ, причем их спектр будет таким, что в энергетических интервалах равной ширины будет содержаться примерно одинаковая энергия. Деление ядер может быть вызвано только теми фотонами, энергия которых превышает 5 МэВ. Доля фотонов, которые приведут к полезному эффекту, будет определяться отношением сечения фотоделения к полному сечению поглощения фотонов. В рассматриваемых моделях ядерных боеголовок

основным поглотителем фотонов на пути к расщепляющимся материалам будет вольфрамовый "поршень" (если в конструкции применяется "поршень" из урана, то деления ядер смогут происходить и в нем самом). "Поршень" толщиной в три сантиметра может пропустить всего пять процентов падающего излучения с энергией от 5 до 15 МэВ. Длина пробега таких фотонов в расщепляющихся материалах составляет около одного сантиметра и всего лишь один фотон из двадцати тысяч поглотившихся сможет вызвать фотоделение ядра. Таким образом, на одно деление ядра расщепляющегося материала в ядерном боеприпасе должно поглотиться не менее 400 000 фотонов, а если учесть величину выхода запаздывающих нейтронов, то требуемое число фотонов увеличится еще на два порядка величины.

В нейтронном детекторе типа SLAB¹⁹ с площадью 0,56 м² и эффективностью около семи процентов, расположенном на расстоянии в три метра от гипотетического расположения ядерной боеголовки можно будет обнаружить около 1 из 3000 нейтронов, вылетевших из боеголовки. Интенсивность фонового излучения боеголовок может составить примерно 400 000 нейтронов в секунду, и, если на расстоянии трех метров от детектора будет расположено три таких боеголовки, то фоновая скорость счета может достигнуть 400 событий в секунду. Для того, чтобы получить пятикратное превышение полезного сигнала над статистическими флуктуациями фона²⁰, нужно, чтобы общее число отсчетов полезного сигнала за время экспозиции было в пять раз больше, чем квадратный корень из общего числа фоновых отсчетов.

Анализ временного распределения запаздывающих нейтронов показывает, что примерно половина из них вылетает за первые десять секунд. Если радиационные повреждения, зависящие от скорости получения дозы, не существенны, но целесообразно использовать источники гамма-квантов с очень короткими импульсами (вплоть до одной микросекунды), и затем проводить измерения запаздывающих нейтронов в течение примерно десяти секунд.

Алгебраическое представление предыдущих рассуждений таково. Величина сигнала S должна быть связана с величиной фона V соотношением:

$$S = 5\sqrt{V}$$

В свою очередь, величина сигнала равна:

$$S = \frac{\epsilon N_s t}{4\pi R^2}$$

где A - площадь детектора, ϵ - эффективность регистрации, N_s - число нейтронов, испускаемых блоком расщепляющегося материала за секунду, t - время измерения в секундах и R - расстояние до детектора. Величина $N_s t$ может быть представлена в виде:

$$N_s t = I a F D d$$

где I - число фотонов с энергией более 5 МэВ, направленных на проверяемую боеголовку, a - коэффициент ослабления потока фотонов на пути к расщепляющемуся материалу, F - доля фотонов, вызывающих деление ядер, D - число запаздывающих нейтронов на одно деление и d - доля запаздывающих нейтронов, вылетевших за время t . Величина фона определяется выражением:

$$B = \frac{\epsilon N_B t}{4\pi R^2}$$

где N_B - число спонтанных нейтронов, испускаемых в единицу времени всеми проверяемыми боеголовками (предполагается, что расстояние r от детектора до всех боеголовок одинаково). Мы считаем, что естественный фон нейтронов значительно меньше фона спонтанного излучения ядерных боеголовок.

Исходя из этих предположений, можно получить общее выражение для необходимого числа фотонов с энергией более 5 МэВ в импульсе:

$$I = \frac{5\sqrt{N_B t} \sqrt{4\pi R^2}}{a F D d \sqrt{\epsilon}}$$

Используя следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} N_B &= 1,2 \cdot 10^6 \\ t &= 10 \text{ сек} \\ r &= 300 \text{ см} \\ a &= 0,05 \\ F &= 5 \cdot 10^{-5} \\ D &= 0,01 \\ d &= 0,5 \\ A &= 5 \cdot 600 \text{ см}^2 \\ \epsilon &= 0,07, \end{aligned}$$

можно получить, что для получения обнаружимого сигнала запаздывающих нейтронов от необъявленной боеголовки требуется

$7,4 \cdot 10^{13}$ фотонов с энергией более 5 МэВ. В области энергий от 5 до 15 МэВ в среднем попадает один фотон на 15 МэВ энергии. Поэтому для получения обнаружимого сигнала в области расположения ядерной боеголовки должно быть выделено примерно 10^{15} МэВ энергии фотонов. Если пучок освещает площадь, равную проекции области размещения расщепляющихся материалов в ядерной боеголовке (примерно 150 см^2), и пробег фотонов составляет примерно 20 г/см^2 , то облучению подвергнется примерно 3 000 граммов вещества и поглощенная доза составит примерно $4 \cdot 10^{11}$ МэВ/г, или 6 000 рад. Учитывая, что пучок может быть сконцентрирован на меньшей площади, что процедуры инспекции могут привести к побочному увеличению дозы в несколько раз, и что на пути к боеголовке может произойти дополнительное поглощение пучка, для надежного выделения сигнала может потребоваться пучок с мощностью, большей на один или два порядка величины. В этом случае поглощенная доза может оказаться достаточной для радиационного повреждения чувствительных электронных компонентов аппаратуры баллистической ракеты, блока разведения или ядерных боеголовок.²¹

ВЫВОДЫ

В соглашениях по сокращению ядерных вооружений уменьшение числа ядерных боеголовок за счет сокращения числа боеголовок на существующих баллистических ракетах может оказаться нецелесообразным, если будет существовать возможность быстрого переоборудования ракет с установкой прежнего числа боеголовок. Тем не менее, если эту проблему можно будет преодолеть, то имеется несколько способов решения возникающих проблем проверки этих соглашений. Наиболее простыми и надежными являются методы визуальной инспекции, но в некоторых случаях их применение может оказаться нежелательным. Другие обсуждаемые в этой статье методы проверки основаны на применении проникающей радиации. Наиболее приемлемым из этих методов следует считать радиографию. Можно сконструировать ядерные боеголовки, которые будет очень трудно обнаружить по их собственному спонтанному излучению, в то время как применение внешних источников нейтронов для возбуждения деления ядер расщепляющихся материалов малоэффективно из-за повышения фона, связанного с делением ядер в материалах разрешенных боеголовок. Применение источников гамма-квантов для возбуждения фотоделения ядер может привести к недопу-

стимо высокому уровню облучения электронных компонентов баллистических ракет.

Выбор используемых систем может определяться также условиями доступа к инспектируемой полезной нагрузке, особенностями конструкции блока разведения головных частей (в особенности, если боеголовки размещены на нескольких уровнях), процедурами демонтажа лишних боеголовок (будет ли в этом случае ракета извлекаться из пусковых установок, или нет) и уверенностью в надежности системы печатей и меток. Поэтому для определения методов верификации в каждом конкретном случае было бы целесообразно в процессе переговоров провести предварительный анализ пусковых установок и самих ракет для выбора наиболее подходящей схемы верификации.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ.

1. В процессе переговоров по сокращению стратегических вооружений советская и американская стороны согласились разрешить инспекции баллистических ракет обеих сторон для того, чтобы выработать методы проверки невозможности установки на ракетах числа боеголовок, превышающего согласованное. Во время предстоящего визита на авиабазу Уоррен (Шайенн, штат Вайоминг) советские эксперты должны ознакомиться с блоком разведения головных частей ракеты MX; планируются также инспекции американской ракеты "Трайидент-2" и советской ракеты SS-N-23. Aviation Week and Space Technology, 29 января 1990 года, стр. 17.
2. Теодор Б. Тэйлор, "Контролируемое уничтожение ядерных боеголовок", Наука и всеобщая безопасность, т.1, вып.1, 1991, стр. 6-20.
3. Richard L. Garwin, "Tags and Seals for Arms Control Verification", 1 August 1988, pp. 11,12 (неопубликованная рукопись).
4. Этот метод обсуждался ранее в работе Alex de Volpi, "Expectations from SALT", Bulletin of the Atomic Scientists, April 1970, p.6.
5. См. ссылку 4.
6. Стив Феттер и др., "Обнаружение ядерных боеголовок", Наука и всеобщая безопасность, т.1, вып.3, 1991, стр. 24-30.
7. См. помещенные в этом выпуске статьи по совместному эксперименту на Черном море.
8. См. ссылку 6.
9. Плотность различных материалов, выраженная в г/см³, равна: для алюминия 2,7; для железа 7,9; для свинца 11,3; для плутония 16 - 18 (в зависимости от кристаллической структуры); для урана 19.
10. Обычная терминология такова - если фотон образуется в результате радиоактивного распада, то его называют гамма-квантом, а если эти фотоны генерируются в рентгеновской установке, то их называют рентгеновским излучением.
11. Alex de Volpi, "Fast Neutron Radiography with National Security Applications", Arrgonne National Laboratory.
12. Alex de Volpi, "Applications of Cineradiography to Nuclear Reactor Safety Studies", RSI, 1984, v. 55, p. 1197.
13. T. Gozani, "Active Non-destructive Assay of Nuclear Materials, Principles and Applications", Washington, DC, US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-0602, pp. 109-120 (источники гамма-излучения) и pp. 83-107 (источники нейтронов).
14. В первом приближении проходящий через слой вещества пучок фотонов или гамма-квантов ослабляется по экспоненциальному закону. Таким образом, если определенный слой вещества ослабляет интенсивность излучения в два раза, то слой удвоенной толщины ослабит интенсивность в четыре раза.
15. См. ссылку 6.
16. Сечение деления ядер медленными (или "тепловыми") нейтронами в сотни раз больше сечения деления ядер быстрыми нейтронами.
17. Была проведена разработка нейтронного детектора двойного рассеяния, способного измерять угол прихода и энергию нейтронов спектра деления. Если можно будет обеспечить точность измерения углов около десяти градусов и эффективность регистрации около одного процента, то можно будет добиться значительного снижения фона и такой детектор может оказаться очень полезным в стационарных установках (см. работу W.Saylor, R.Byrd, Y.Yariv et al., "A Neutron Source Imaging Detector for Nuclear Arms Treaty Verification", Los Alamos, LA-UR-90-581).
18. Электроны высоких энергий рождают фотоны при столкновениях с частицами вещества.
19. Детектор SLAB описан в работе T.Gozani (ссылка 13).
20. Интенсивность естественного фонового

излучения значительно ниже.
21. См., например, работу G.C.Messenger,
M.S.Ash, "The Effects of Radiation on

Electronic Systems, New York, Van Nos-
trand Reinhold, 1986.