

ЯДЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ НА ОСНОВЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Скотт Кемп

Применение ускорителей для получения плутония-239 или урана-233 сравнивается с получением этих материалов в небольшом ядерном реакторе. Это сравнение дается на примерах, понятных для начинающих нарушителей ядерного нераспространения. Сравниваются темпы производства, технические сложности, методы получения, затраты и методы обнаружения.

Статья получена 10 ноября 2004 г. и принята к публикации 5 января 2005 г.

С. Кемп участвует в Программе по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

Почтовый адрес автора – R. Scott Kemp, Program on Science & Global Security, 221 Nassau Street, 2nd Floor, Princeton University, Princeton, NJ, USA. Электронный адрес: rskemp@princeton.edu

Автор благодарит за поддержку программу Уильяма Фулбрайта и программу по науке и всеобщей безопасности при Принстонском университете.

ВВЕДЕНИЕ

Обычно считается, что приобретение делящихся материалов является самым крупным препятствием при создании ядерного оружия. Традиционно, речь идет либо о технологиях обогащения, которые применяются для выделения урана-235 из естественного урана, либо о ядерных реакторах, где создаются искусственные ядерные материалы (плутоний-239 или уран-233). Оба направления уже давно находятся в центре внимания контроля над нераспространением. Напротив, ускорители заряженных частиц не рассматривались контролем над вооружением, но они способны также производить делящиеся материалы, используемые в ядерном оружии.

История показала, что методы, основанные на применении ускорителей, считались весьма неэкономичными (или даже непригодными) направлениями для распространения ядерного оружия. Однако, всеобщее распространение технологических «ноу-хау», конкретные успехи в проектировании простых ускорителей и возрастание легитимных применений ускорителей меняют подобные расчеты. Хотя приобретение делящихся материалов на основе ускорителей заряженных частиц продолжает оставаться технической проблемой, сегодня добиться этого значительно легче, чем несколько десятилетий тому назад.

Не существует инспекционных требований к ускорительным установкам в рамках существующих мер МАГАТЭ, как и нет ограничений, конкретно запрещающих передачу ускорительных технологий из одной страны в другую, ни в каких многосторонних соглашениях, регулирующих контроль над экспортом¹. Два этих фактора – широкая доступность ускорительных технологий и отсутствие институционального мониторинга, оказываются основным побуждением к получению делящихся материалов на основе ускорителей. Экспортный контроль должен пойти дальше, чтобы удалить такие побуждения путем отслеживания ключевых технологий, какие необходимы неопытным нарушителям, и улучшения наблюдений за стремлениями нарушителей.

¹ МАГАТЭ подготавливает технический документ «Последствия разделения и превращения при обращении с радиоактивными отходами», рекомендуя выпуск инструкций, где небольшие ускорители рассматриваются как потенциальные источники распространения.

РАССМОТРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

На пути к получению делящегося материала технически неопытный нарушитель² сталкивается с необходимостью решить ряд вопросов, например, конструкция бомбы, темпы производства, технологическая сложность, возможность, доступность ресурсов и политические аспекты. Беглый просмотр его выборов приводится ниже, чтобы установить разбросы параметров, в пределах которых будет произведен последующий анализ.

Нарушителю надо только одну или две бомбы, чтобы считаться фактически ядерным государством. Для этого нарушитель может выбирать такие технологии, которые либо еще недостаточно хорошо продвинуты, либо рассматриваются как неэффективные для крупномасштабного производства. В этой статье в качестве исходной посылки принимается получение делящегося материала, достаточного для одной бомбы, в течение двух лет, а также приобретение конкретного количества материала в соответствии с конструкцией бомбы.

После решения о приобретении делящегося материала нарушитель должен произвести выбор между типами делящихся материалов, а затем между способами приобретения. Существуют три подходящих делящихся материала и два основных способа приобретения. Уран-235 получается при изотопном обогащении естественного урана. Плутоний-239 и уран-233 – это искусственные изотопы, получаемые при поглощении нейтрона атомом «сырьевого» элемента (для плутония-239 сырьем является уран-238, а для урана-233 – торий-232). Эти нейтроны могут поступать от ядерного реактора или от ускорителя.

Статья ставит своей задачей оценку риска, связанного с ускорителями, по сравнению с риском от ядерного реактора. Масштаб анализа ограничен «местными технологиями» (то есть, изготовлением внутренними силами из целиком местных или приобретенных на свободном рынке ресурсов) и «специальными программами» (то есть, относящимися только к оружейным целям).

Применяемый в оружии плутоний, содержащий в основном плутоний-239, получается из урана-238. Желательно свести к минимуму спонтанное нейтронное излучение путем сведения к минимуму содержание изотопа плутоний-240. Плутоний с содержанием плутония-240 менее семи процентов часто называют «плутонием оружейного качества», и его можно непосредственно получить в ядерном реакторе, который работает с малым выгоранием топлива, или с помощью ускорителя³. Но даже плутоний оружейного качества обладает относительно высокой скоростью спонтанного нейтронного излучения и поэтому может применяться только в оружии «имплозивного» типа. Имплозия сводит к минимуму риск преждевременной детонации – события, при котором мощность оружия составляет только долю от потенциально возможной величины. Пониженная мощность не обязательно должна оказаться препятствием, поскольку она обладает достаточно разрушительной силой для многих задач.

Имплозивное оружие к тому же гораздо труднее изготовить. Полная уверенность, что новая имплозивная конструкция будет действовать, появится только после ядерного испытания. Впрочем, испытание раскрывает собственника ядерного оружия и может поставить нарушителя в политически нежелательную ситуацию⁴.

Уран-233 образуется из ториевого (торий-232) сырья. У него гораздо меньший спонтанный нейтронный фон и он не будет подвержен преждевременной детонации, как плутоний. Его можно использовать в простой сборке ствольного типа – эта конструкция не нуждается в

² Рамки этой статьи ограничены нарушителями, имеющими невысокий технический потенциал, поскольку большинство стран, стремящихся к ядерному оружию, относятся к этой категории.

³ Плутоний с более высоким уровнем содержания плутония-240 все еще может быть использован в ядерном оружии, но потребуется больше материала.

⁴ Испытание истратит запас ядерного материала нарушителя. Это важное обстоятельство, если запас мал, а темпы производства невелики. Иностранная разведка может обнаружить ядерное испытание и убедиться, что весь запас делящегося материала использован. Можно будет обнаружить, что испытание завершилось крупной неудачей – поэтому может последовать вывод, что нарушитель не сумел сконструировать оружие. В обоих случаях нарушитель останется без эффективного средства ядерного сдерживания и может в результате спровоцировать упреждающую иностранную интервенцию.

испытании. Но оружие ствольного типа обычно требует более чем удвоенного количества делящегося материала, нежели оружие имплозивного типа. В статье предполагается, что для оружия ствольного типа требуется 20 кг урана-233.

Как и в случае с плутонием, получение урана-233 приводит к нежелательному загрязнению другими изотопами. Загрязняющий изотоп уран-232 обладает цепочкой распада, где возникает проникающее гамма-излучение⁵. Интенсивность этих гамма-лучей возрастает в течение примерно десяти лет после синтеза урана и при достаточно высоком уровне излучения становится опасным для работающих с ураном лиц. Уран-233 с такой концентрацией урана-232, которая достаточно мала, чтобы позволить работать с ним без защиты в течение нескольких месяцев⁶, можно получить несколькими методами. Один метод, доступный для начинающего нарушителя, связан с размещением ториевых мишеней в графитовом реакторе с естественным ураном или в реакторе на тяжелой воде. Впрочем, торий может составлять только чуть более семи процентов загрузки реактора, чтобы тот не стал подкритичным⁷. Поскольку значительное большинство нейтронов будет поглощаться ураном-238, находящимся в топливе из естественного урана, для производства урана-233, сравнимого по количеству с производимым плутонием, потребуется реактор размером больше стандартного примерно в 13 раз⁸. Реакторы такого размера вряд ли окажутся под силу начинающему нарушителю и почти наверняка они уязвимы к быстрому обнаружению⁹.

НЕБОЛЬШОЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ: УРОВЕНЬ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ

Управление по техническим оценкам (УТО) в докладе конгрессу США (1977 г.) рассмотрело небольшие ядерные реакторы, как пример простого пути к делящимся материалам для начинающих нарушителей¹⁰. В качестве примера приводился реактор с мощностью 25 МВт, способный производить ежегодно около 7 кг плутония оружейного качества¹¹, что немногим меньше массы в 8 кг, которая потребовалась для имплозивной бомбы первого поколения

⁵ Уран-232 образуется в реакции типа $(n,2n)$, для которой нужны нейтроны с энергией свыше 600 кэВ.

⁶ Сфера из урана-233 весом 20 кг (примерно, это бомба ствольного типа) с содержанием урана-232 порядка 0.1 % создает интенсивность дозы 0.5 мЗв/час на расстоянии 0.5 м через год после переработки, а через десять лет интенсивность вырастет до максимальной величины 1.6 мЗв/час. Принятый в США стандарт максимально допустимой дозы для лиц, работающих с излучением, составляет 50 мЗв в год. Поэтому, если процесс разделения урана-233 длится год, американскому работнику позволят работать со свежим материалом сто часов. Но в странах, стремящихся к ядерному оружию, стандарты на безопасность могут быть значительно занижены. Смотрите статью Канга и фон Хиппеля «Уран-232 и противодействие распространению урана-233 из отработанного топлива», *Наука и всеобщая безопасность*, т.9, выпуск 1, 2001 г.

⁷ Там же.

⁸ 180 МВт для урана-233 по сравнению с 14 МВт для плутония-239 при темпах производства одна бомба за два года. При таких расчетах сравниваются темпы производства для создания одной бомбы ствольного типа из урана-233 и одной плутониевой имплозивной бомбы для одного и того же периода нахождения тория-232 в реакторе. Усредненное по спектру поперечное сечение захвата нейтронов (со средней энергией 0.0253 эВ) σ_c для тория-232 равно 6.5 барн, а для урана-238 – 2.4 барн. Если содержание сырьевого материала – тория-232 составляет 7 %, для бомбы ствольного типа требуется $M_T = 20$ кг, а для бомбы имплозивного типа – $M_Y = 8$ кг, то разница в размерах соответствующих реакторов составит примерно $(M_T/M_Y)(1 + 14\sigma_Y/\sigma_T)$.

⁹ John R. Lamarsh, "Dedicated Facilities for the Production of Nuclear Weapons in Small and/or Developing Nations," Section VI-A of Appendix Volume II, Part Two to *Nuclear Proliferation and Safeguards*, June 1977, Congress of the United States, Office of Technology Assessment/ NTIS order #PB-275843.

¹⁰ Там же.

¹¹ При скважности 80 % . Реактор произведет около 9.2 кг, работая без прерываний. При выгорании 122 МВт.д/т доля плутония-240 составит только 0.05 %. Смотрите [9].

(типа сброшенной на Нагасаки)¹². Требования к созданию реактора подытожены ниже и использованы как уровень, с которым сравниваются ускорители.

Рассматриваются только известные реакторы, работающие на естественном уране (если нарушитель может обогащать уран, он просто сможет непосредственно изготовить оружие с ураном-235). Известно, что с топливом из естественного урана могут работать только реакторы с замедлителями из графита или тяжелой воды. В интересах обеспечения нераспространения, графит реакторного качества и тяжелая вода являются материалами, экспорт которых контролируется.

Несмотря на экспортный контроль, графит реакторного качества (с содержанием бора менее 5 ppm) можно производить в «домашних» условиях. Производственный процесс практически таков же, как и для графита электродного качества¹³. Нефтяной кокс обрабатывается в печи без доступа кислорода до тех пор, пока примеси не сублимируются или не испарятся. Избыточные загрязнения бором удаляются при повышении температуры в печах¹⁴.

Брукхейвенский графитовый исследовательский реактор (БГИР), построенный в 1948 г. и закрытый к настоящему времени, является хорошим примером того, как может выглядеть сегодня графитовый реактор начинающего нарушителя¹⁵. Он изготовлен в виде графитового куба с ребром длиной около 6.25 м, который пронизан квадратной сеткой воздушных каналов (по 37 с каждой стороны). Топливные элементы размещались в центральной части каналов, а проходивший мимо них и графитовых стенок воздух служил охладителем. Упрощенный вариант нарушителя потребует около 75 тонн естественного урана и 415 тонн графита¹⁶. По оценкам УТО, для постройки такого упрощенного варианта потребуются один инженер-строитель, один инженер-электрик, два инженера-механика, три специалиста-ядерщика и один специалист-металлург. Работа займет от двух до четырех лет, а капитальные затраты оцениваются в 13.3 миллионов долларов¹⁷.

УСКОРИТЕЛИ

Способность ускорителей производить искусственные делящиеся материалы была известна давно (смотрите приведенный ниже материал по истории электроядерного размножения). Хотя установившиеся ядерные страны предпочитали реакторы по причинам затрат и надежности, приведенные примеры не могут дать ответа по поводу начинающегося распространения. Установившиеся ядерные державы и высокотехнические страны не сталкиваются с экспортным контролем, с ограниченными материальными ресурсами или с недостатком технического опыта, а также с проблемами скрытности – со всем тем, чем приходится заниматься начинающему нарушителю. С учетом подобных особых ограничений некоторые ха-

¹² Предполагается, что имплозивная бомба первого поколения содержала 8 кг плутония. Это количество МАГАТЭ определяет как «важное».

¹³ Смотрите [9].

¹⁴ Углерод сублимируется при 3825 °С, а бор кипит при 4000 °С при атмосферном давлении (*CRC Handbook of Chemistry and Physics, 82nd ed.*, 2001-2002), так что уменьшение уровня содержания бора означает, что на единицу энергии и сырья образуется меньше углерода. Сверхчистый графит (превышающий графит ядерного качества) также может быть получен путем частичного сгорания метана, который является главным компонентом природного газа, практически не содержащего бора и широко доступного по всему миру.

¹⁵ Хотя в домашних условиях можно изготовить любой замедлитель, технические проблемы при конструировании, создании и работе реактора на тяжелой воде в совокупности более трудны для преодоления по сравнению с графитовым реактором. Поэтому представляется, что графитовый реактор окажется более правдоподобным путем для неопытного нарушителя, и поэтому он отобран в статье для сравнения.

¹⁶ Графитовый куб с длиной ребра 7.5 м (весом около 700 т) слишком велик для реактора с тепловой мощностью 25 Мвт. Подойдет куб с длиной ребра 6.3 м (415 т). Он будет стоить 3.8 миллионов долларов, если изготавливать его из нефтяного кокса в печах без доступа кислорода. Вопросы инфляции рассматриваются в следующем примечании.

¹⁷ В капитальные затраты входят расходы на оплату строителям, но не проектантам и операторам. Все расходы в этой статье сведены к долларам 2003 г.: <http://www.jsc.nasa.gov/bu2/inflation/ppi/inflatePPI.htm> и <http://www.bls.gov/ppi/home.htm>.

рактеристики ускорителей кажутся благоприятными. Действительно, ускорители применимы просто потому, что они не являются ядерными реакторами, их непохожесть в настоящее время помещает ускорительные технологии в безопасную зону за пределы следящего ока общественности, которая борется за нераспространение. Сегодня нарушитель сможет построить ускоритель на досуге и даже попросить иностранного содействия, все еще не вызывая интереса к своим намерениям. Ядерные реакторы менее подходят для того, чтобы создать подобную невидимость. Недостатки контроля над нераспространением могут вдохновить нарушителя выбрать ускорители, даже если они не смогут конкурировать по выходу, затратам или технической легкости.

То, что ускорители до сих пор не использовались нарушителями, может быть связано либо с неизвестностью метода, либо с трудностями в приобретении подходящей ускорительной технологии. Эти факторы меняются. За последние десять лет некоторые исследовательские группы предложили использовать ускорители для удаления высокоактивных отходов - актинидов. Эти усилия оставили большое количество литературы, которая послужит для ликвидации неизвестности метода превращения элементов на основе ускорителей и предоставит информацию любому нарушителю, ищущему справочник по этому методу¹⁸. Более того, за последние десять лет отмечены продвижения в коммерческой доступности и разработке недорогих высокоточных ускорителей для лечения рака.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РАССМОТРЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Ускорители обладают возможностью более точно контролировать преобразовательную среду по сравнению с ядерными реакторами. Точно устанавливая энергии нейтронов и характеристики замедления, можно выборочно определять желаемые реакции с захватом нейтронов, сводя к минимуму нежелательные реакции, приводящие к изотопному загрязнению (например, реакции $(n,2n)$ и реакции деления).

При производстве делящихся материалов существуют несколько путей для использования такой гибкости, присущей ускорителям. При производстве плутония можно оптимизировать выход материала, если установить приемлемые уровни изотопного загрязнения. Альтернативой может служить сведение к минимуму делений, отвечающих за большинство радиоактивных распадов и выход обнаруживаемых продуктов, присутствующих в отработанном реакторном топливе, - это повышает безопасность, упрощает операции по переработке и теоретически уменьшает вероятность обнаружения. Эти эффекты управляются конструкцией преобразователя.

Уровень изотопного загрязнения принципиально зависит от нейтронного потока, воздействующего на сырьевой материал, умноженного на время экспозиции (облучения) – этот параметр называется «выгоранием». В реакторах с замедлением нейтронов в тяжелой воде или в графите возможна частая замена топливных элементов, что позволяет оставлять уровень изотопного загрязнения низким. Поэтому ускорители не имеют значительных преимуществ над реакторами в этом отношении. Впрочем, для ядерного реактора нет возможности минимизировать радиоактивность и истечение обнаруживаемых изотопов. Эти аспекты связаны с делениями, которые являются фундаментальным свойством реактора и источником требуемых нейтронов. Ускорители производят нейтроны в независимом режиме и поэтому могут свести к минимуму нежелательные побочные эффекты.

Все сказанное выше относится к получению урана-233. Ускорители могут также предоставить дополнительные преимущества при производстве урана-233. Чтобы получить приемлемое количество урана-233 для одной бомбы, нужны достаточно крупные реакторы и разумный промежуток времени. Ускоритель может предоставить для этого подход с умень-

¹⁸ Ведущие работы по этому вопросу принадлежат группе Руббиа в ЦЕРН и группе Чарльза Боумана в Лос-Аламосе, например, C. Rubbia et al., (1995), "Conceptual Design of A Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier," CERN/AT/95-44 (ET); Ch. D. Bowman, (1997) "Accelerator-driven Systems in Nuclear Energy: Role and Technical Approach," ADNA Corporation, Los Alamos, NM 87544, ADNA/97-013; Ch. D. Bowman (1998), "Accelerator-driven Systems for Nuclear Waste Transmutation," *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 48: 505-506.

шенным масштабом, больше согласующийся с возможностями начинающего нарушителя¹⁹.

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ

Ускорители применялись для преобразования изотопов еще с 1930 г., а в 1941 г. Glenn Сиборг и его группа получили первые микрограммы плутония-239 при бомбардировке урана-238 дейтронами с энергией 6 МэВ. Но ни в одном из первых методов не образовывалось более одного нейтрона на ускоренную частицу и все методы до современных конструкций сильноточных ускорителей были неэффективными для преобразования.

В 1947 г. при изучении космических лучей с применением счетчиков, заполненных трехфтористым бором, Ванна Коккони понял, что частицы высокой энергии при прохождении через вещество становятся источником большого числа нейтронов. Годом позже Геккерман и Перлман наблюдали, что дейтроны с энергией 190 МэВ при взаимодействии с висмутом создавали 12 нейтронов на дейтрон. Это явление, которое сейчас называется развалом, сделало возможным крупномасштабное преобразование изотопов на ускорителях. Немедленно была осознана возможность применения развала к немирным целям, и через два года после открытия начала действовать программа МТА, название которой переводится достаточно нейтрально: «Ускорители для испытаний материалов» (УИМ).

Программа УИМ с 1950 г. размещалась в заброшенных армейских постройках в Ливерморе (Калифорния). Ее задачей было производство оружейного плутония из избыточного обедненного урана, оставшегося от обогатительной деятельности в США. В это время США зависели от поставок урана из Южной Африки, где он был побочным продуктом на золотых приисках. Программа по производству плутония планировалась так, чтобы освободить США от внешней зависимости в дефицитных материалах. США запустили программу УИМ для прямой конкуренции с реактором, производящим плутоний в Хэнфорде. Программа УИМ конкурировала также с установкой в Саванна Ривер для производства трития, который применялся для увеличения мощности ядерной взрывчатки. К 1952 г. проект УИМ обладал линейным ускорителем дейтронов на энергию 350 МэВ при токе 500 мА, который создавал преобразующие нейтроны на бериллиевой мишени с развалом ядра бериллия.

Через два года программа с несколькими ускорителями была прекращена. К тому времени в США открыли богатые запасы урана, а министерство энергетики США пришло к выводу, что оно не может успешно завершить работу над ускорителями. Профессор Лоуренс, кто руководил программой УИМ, в итоге получил патент на свое изобретение, и хотя его проект никогда не раскрыл крылья, он породил Ливерморскую национальную лабораторию имени Лоуренса – один из ведущих американских центров по научным аспектам ядерного оружия в настоящее время.

В последующие времена производство плутония на основе ускорителей рассматривалось заново множество раз. У Канады были начальные планы по «электроядерному размножителю» еще в 1951 г., и эта концепция продолжала поддерживаться, по крайней мере, до 1981 г. Россия изучала такие системы в 60-е и 70-е гг., а некоторые американские национальные лаборатории делали предложения в течение 70-х гг., включая программу FERFICON, куда входило несколько лабораторий и которая продолжала действовать с 1975 г. по 1988 г. Совсем недавно США и Франция независимо рассматривали получение трития на ускорителях.

Ссылки:

Общие: P. Grand, "The Use of High Energy Accelerators in the Nuclear Fuel Cycle", *Nature* 178: 19 April 1979; Richard Wilson, "Accelerator Driven Subcritical Assemblies", a report to the Energy, Environment and Economy Committee, U.S. Global Strategy Council, Harvard, June 20, 1998; MTA reports UCRL-79151 (LLNL), 1977; UCRL-52144 (LLNL), 1976; BNL-50592, 1976; J. Magill and P. Peerani. "(Non-) Proliferation Aspects of Accelerator Driven Systems" *Journal de Physique IV*, France 9 (1999).

Канадский проект: W.B. Lewis, "The Significance of the Yield of Neutrons from Heavy Nuclei Excited to High Energies", Atomic Energy of Canada Limited (AECL) Research and Development Report, August 25, 1952, AECL-DR-24; Other AECL reports AECL-969, 1953; AECL-3190, 1968.

Тритиевый проект: J.F. Tooker, R. Bourque, D. Christiansen, J. Kamperschroer, G. Laughon, M. McCarthy, M. Schulze, *Overview of the APT Accelerator Design*, General Atomics, (San Diego, CA), TUD06.

¹⁹ Уран-233 может образовываться в каналах реактора на естественном уране, как рассмотрено в данной статье, но для этого потребуется реактор, который по размерам в 13 раз превысит реактор для производства плутония. Такие большие реакторы гораздо труднее построить и их можно обнаружить заранее.

КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМ С УСКОРИТЕЛЯМИ

Как показано на рис.1, в системе с ускорителем имеются три типа оборудования. В правой части рисунка находится преобразователь, содержащий сырьевой материал и обеспечивающий желательные нейтронные условия для преобразования изотопов. Рассматриваются два типа преобразователей – с умножением нейтронов и без умножения. В центре рисунка помещена производящая нейтроны мишень, в которой ионы конкретного изотопа с определенной энергией образуют нейтроны на основе одной или более ядерных реакций. Рассматриваются три типа реакций: развал ядра, фотоядерные реакции, а также реакции (p,n) и (d,n). Наконец, ускоритель (с левой стороны рисунка) обеспечивает ускоренные ионы для попадания в производящую нейтроны мишень. Рассматриваются шесть типов ускорителей: обычные циклотроны, изохронные циклотроны, синхроциклотроны, линейные протонные ускорители, линейные электронные ускорители и ускорители с квадрупольными электростатическими линзами. Эти одиннадцать типов могут быть смонтированы в разных конфигурациях²⁰ для достижения разных целей в соответствии с конкретными ограничениями и ресурсами нарушителя.

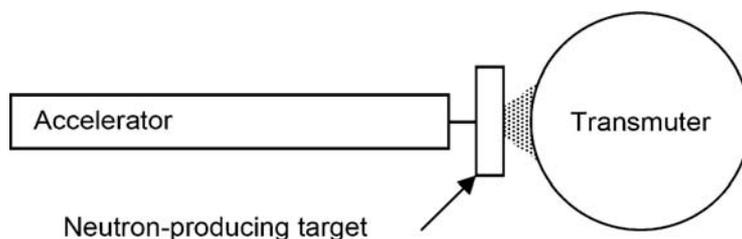


Рис.1: Схема системы на основе ускорителя для получения делящегося материала. Слева находится ускоритель, в центре – мишень для производства нейтронов, а справа – преобразователь изотопов.

Преобразователь

Этот компонент определяет преобразовательную среду на основе своей геометрии и выбранного сырьевого материала. Два представленных ниже преобразователя являются предельными случаями в спектре возможных выборов. В одном из них (без умножения нейтронов) энергия нейтронов ограничена такими значениями, которые благоприятствуют желаемой ядерной реакции и благодаря этому сводят к минимуму нежелательные реакции, например, деления. Это помогает уменьшить изотопное загрязнение и уменьшить радиоактивность продукта, не прошедшего переработку. Преобразователь другого типа (с размножением) жертвует реакциями при заданной энергии ради более высоких темпов производства. В нем больше внимания уделяется делениям, чтобы увеличить интенсивность нейтронов.

Преобразователь без умножения нейтронов может принять форму, сходную с той, которая предложена в ускорительной программе ЦЕРНа по преобразованию реакторных отходов – это большой куб²¹ из свинца с пятиметровым ребром и с расположенном в центре источником нейтронов. Внутри куба можно проделать несколько каналов на подходящем расстоянии от источника нейтронов и заполнить эти каналы сырьевым материалом²². Как показывают

²⁰ Впрочем, не всякое преобразование внесет вклад в систему, производящую нейтроны. Например, электронные ускорители нельзя применять для развала ядер.

²¹ Основной изотоп естественного свинца – свинец-208, обладает сечением упругого рассеяния, практически не зависящим от энергии, и очень низким сечением захвата нейтронов (почти на пять порядков величины меньше, чем у имеющих отношение к делу сырьевых материалов). Это объясняется очень стабильным ядром, имеющим два «магических» числа по нуклонам.

²² “Experimental Verification of Neutron Phenomenology in Lead and Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing in Accelerator Driven Systems: A Short Summary,” 5 April 2000, CERN; SL-Note-2000-034 EET.

экспериментальные данные, внутри куба такого размера успешно может удерживаться 96% нейтронов высокой энергии²³. Свинец служит рассеивающим материалом, который замедляет нейтроны из-за упругого рассеяния. Энергия рассеянного нейтрона в лабораторной системе координат выражается уравнением:

$$E'_n = E_n \cdot (A^2 + 2A \cos \vartheta + 1) / (A + 1)^2 \quad (1)$$

где E_n и E'_n - энергии падающего и рассеянного нейтронов, соответственно, A - атомный вес рассеивающего ядра (в случае свинца $A=208$), а ϑ - угол рассеяния²⁴. Из-за большого атомного веса свинца энергия нейтрона при столкновении изменяется очень мало по сравнению с шириной области резонансного захвата сырьевым материалом (обычно эта область простирается примерно на 3 кэВ, причем отдельные резонансы имеют полную ширину около 1эВ на половине высоты). Часто изменения энергии настолько малы, что не превышают расстояния между двумя соприкасающимися резонансами захвата. Это позволяет нейтронам медленно замедляться при прохождении через резонансную область, что повышает вероятность захвата до того, как они дойдут до области, где могут доминировать деление и другие реакции²⁵. Этот эффект иллюстрируется на рис.2, где приведена в линейном масштабе небольшая часть (17%) резонансной области для захвата нейтронов в тории-232. Двадцать две резонансные линии со значениями поперечного сечения, превышающими величину сечения рассеяния в свинце, находятся в этой области. Нейтрону потребуется примерно 73 раза рассеяться на 90 градусов, чтобы пройти через эту область энергий, занятую двадцатью двумя резонансными линиями. Большое количество столкновений во всей резонансной области повышает вероятность захвата нейтронов в сырьевом материале до того, как нейтроны дойдут до тепловой области, где деление становится доминирующей реакцией.

Темпы производства делящегося материала заметно возрастут, если использовать преобразователь с размножением нейтронов. Классическая активная зона ядерного реактора, приведенного в подкритичное состояние путем применения замедлителя худшего, чем реакторного, качества или необогащенного топлива, может функционировать как нейтронный размножитель-преобразователь, когда к ней подвести ускоритель. Такие подкритичные реакторы более просты в конструкции и обращении по сравнению с нормальными ядерными реакторами. Им не нужны системы управления из-за подкритичности и терпимы более широкие изменения реактивности. Изучение этих преобразователей показало, что производство делящихся материалов можно практически увеличить более чем в десять раз по сравнению с преобразователем без размножения нейтронов²⁶. Контроль над изотопным составом

²³ Это справедливо для нейтронных характеристик спектра развала при энергии 1 ГэВ. Нейтроны, созданные ускорителями с меньшей энергией (которые гораздо легче приобрести нарушителю), будут удерживаться даже с более высокой эффективностью, поскольку необходимо меньше столкновений, чтобы опуститься до области резонансного захвата сырьевым материалом, а сечение рассеяния свинца не зависит от энергии. Сырьевой материал, добавленный в рабочий объем, будет захватывать нейтроны, что еще более уменьшит потери нейтронов через поверхность (смотрите также [22]).

²⁴ J. R. Lamarsh, *Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley (Reading, 1972). Уравнение 1.

²⁵ Сырьевой материал эффективно поглощает нейтроны при резонансных энергиях, соответствующих энергии возбуждения связанных уровней в ядре. Поглощение в делящемся материале мало, поскольку сечение деления обратно пропорционально скорости нейтрона, что позволяет сделать более предпочтительным поглощение в сырьевом материале (в предположении, что замедление нейтронов достаточно мало). Нейтроны могут предварительно замедлиться от высоких энергий до энергий, соответствующих резонансному захвату, еще до попадания в сырьевой материал, чтобы избежать нежелательных реакций типа $(n,2n)$, которые приводят к созданию урана-232 или к делению сырьевого материала.

²⁶ Например, в кубической сборке с ребром длиной 2.4 м (загрузка - 102 т естественного урана), где в качестве замедлителя используется обычная вода, происходит 13.8 захватов на исходный нейтрон. Там нейтроны образуются при развале протонами с энергией в диапазоне от 150 МэВ до 1 ГэВ. Такая конфигурация используется как типичный подкритичный реактор во всех представленных примерах. Смотрите Christine D. Riendeau, David L. Moses, Arne

нельзя осуществлять контролем над энергией нейтронов, как это было со свинцовым замедлителем. Вместо этого, приращение нежелательных изотопов уменьшается ограничением выгорания топлива. Поскольку работа активной зоны основана на делении ядер, ее следует загружать смесью делящихся и сырьевых материалов (например, естественным ураном). Поэтому возможность активной зоны по производству урана-233 ограничена в такой же степени, как и возможности ядерных реакторов. Специальные гибридные системы, имеющие как область с умножением нейтронов, заполненную естественным ураном, так и область без размножения нейтронов, заполненную торием, может увеличить темпы производства урана-233 по сравнению с преобразователем типа свинцового блока, хотя и не в такой степени, как подкритичный реактор-преобразователь²⁷.

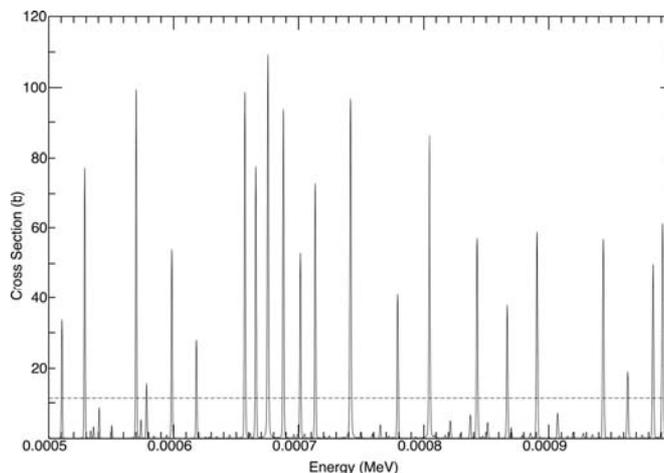


Рис.2: Поперечное сечение радиационного захвата нейтронов в тории-232 (сплошные кривые) и упругого рассеяния нейтронов в свинце (штрихованная линия). На графике видны 22 резонанса захвата (шириной примерно по одному эВ) с высотой, превышающей величину поперечного сечения для свинца. Около 73 рассеяний на угол 90 градусов потребуется нейтрону, чтобы пройти эту область энергий.

Мишень для производства нейтронов

Ускорители могут обеспечить нейтроны путем реакций развала, фотоядерных реакций и реакций типа (p,n) и (d,n). Каждый механизм лучше всего работает в определенном диапазоне энергий. Это ограничивает выбор ускорителя, способного работать практически для любого заданного механизма. Если нарушитель способен приобрести только ускоритель определенного типа, это может заставить его выбрать реакцию для получения нейтронов с меньшей эффективностью. Сопоставимость ускорителей и реакций иллюстрируется на рис. 3.

В источниках нейтронов, основанных на развале ядер, протон с большой энергией²⁸ по-

P.Olson, "Proliferation Potential of Accelerator-Driven Systems: Feasibility Calculations," Oak Ridge National Laboratory, Y-12 Plant, November 1998. Приведены оценки по методу Монте-Карло для возможности производства плутония и умножения числа нейтронов в различных подкритичных ядерных реакторах, изготовленных с использованием материалов неядерного качества или загруженных необогащенным ураном. Но в статье не обсуждаются ускорители, мишени для получения нейтронов, затраты на изготовление, требования к переработке, а также не приводятся относительные оценки технической сложности, особенно для нарушителей, не имеющих технической подготовки.

²⁷ Они здесь не рассматриваются из-за более высокого уровня технических сложностей. Принцип действия изложен в работе J. Galy, J. Magill, H. Van Dam, J. Valko, "A Neutron Booster for Spallation Sources – Application to Accelerator Driven Systems and Isotope Production," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 485 (2002): 739-752.

²⁸ Можно использовать более тяжелые ядра, но протоны дают более высокий выход на единицу вложенной энергии.

падает на тяжелое ядро (атом мишени) и вызывает вылет нескольких нейтронов. Это наиболее эффективный метод получения нейтронов (с точки зрения затрат энергии) при помощи рассматриваемых в статье ускорителей. Детальное изучение развала и соответствующие инженерные проблемы широко доступны в открытой литературе. Проблема развала в том, что требуются сильноточные пучки протонов высокой энергии, а их нельзя получить на ускорителях простой конструкции.

Выход нейтронов при развале сильно зависит от состава и геометрии мишени, а также от энергии падающего протона. На цилиндрической мишени из обедненного урана²⁹ с диаметром 10 см и длиной 60 см макроскопический выход нейтронов на падающий протон можно приблизительно выразить эмпирической формулой:

$$Y_{n/p} = 0.0367 (E_p - 120) \quad (2)$$

где E_p – энергия падающего протона (МэВ)³⁰ ($E_p > 120$ МэВ). Обратите внимание, что выход составит примерно 1:1 при 150 МэВ. Ниже энергий около 100 МэВ выход нейтронов быстро падает. Требуемый ток составляет десятки или сотни миллиампер для разумных темпов производства³¹. Такие энергии и токи, вообще говоря, недостижимы в обычных ускорителях.

В фотоядерных источниках нейтронов электроны высокой энергии инжектируются в мишень, где их энергия преобразуется в энергию фотонов тормозного излучения. Эти фотоны взаимодействуют с ядрами и образуют нейтроны. Экспериментально найдено, что производство нейтронов наиболее эффективно, когда энергия электронного пучка лежит в пределах 100-200 МэВ. Такие энергии применяются в лабораторных электронных ускорителях, используемых для получения нейтронов. Впрочем, темпы производства все еще растут линейно примерно до 1 ГэВ^{32,32}. Выход нейтронов из толстого источника (естественный уран с высокой плотностью) составит (для $16 < E_e < 200$ МэВ)³³:

²⁹ При плотности 19.04 г/см³. Металлическая мишень из естественного урана при такой же плотности, как ожидается, обеспечит слегка более высокий выход.

³⁰ Такая мишень близка к обеспечению максимального выхода нейтронов для развала. J. S. Gilmore, G. J. Russel, H. Robinson, and R. E. Prael, "Fertile-to-Fissile and Fission Measurements for Depleted Uranium and Thorium Bombarded by 800-MeV Protons," *Nuclear Science and Engineering*, 99 (1988): 41-52 in J. Magill and P. Peerani, "(Non-)Proliferation Aspects of Accelerator Driven Systems," *Journal de Physique IV*, France, 9 (1999). Эта статья ограничивает рассмотрение только получением нейтронов на основе развала и исследует только преобразователи, изготовленные из твердого сырьевого материала без замедлителя. Ускорители рассматриваются в основном с исторической точки зрения, и такое рассмотрение не очень подходит для начинающего нарушителя. В статье содержатся полезные оценки спонтанного образования нейтронов от примеси легких изотопов, имеющие отношения к оценкам критической массы и к радиационной опасности при заражении урана-233 ураном-232.

³¹ Например, если желательно получать по 4 кг плутония-239 в год (одна бомба весом 8 кг за два года). придется преобразовать 10^{25} атомов в год. Из уравнения (2) следует, что имеющийся в продаже ускоритель на 235 МэВ создаст 4.22 нейтрона на протон. Если предположить, что потерь нет, потребуется $2.4 \cdot 10^{24}$ протонов в год, или $7.6 \cdot 10^{16}$ протонов в секунду. При электрической эффективности 50 % это соответствует постоянному току 24 мА.

³² При энергиях 100-200 МэВ фотоны тормозного излучения взаимодействуют с мишенью в области гигантского дипольного резонанса. При более высоких энергиях влияние квазидейтрона и дельта-резонанса (образование пи-мезона) уменьшает эффективность реакции. Порог для удаления одного нейтрона равен примерно 7-8 МэВ. A. Fasso, A. Ferrai, P. R. Sala, "Designing Electron Accelerator Shielding with FLUKA," CERN, [<http://www.fluka.org/reference/papers/arlphnuc.ps.gz>]; H. Nifenecker, S. David, J. M. Loiseaux, A. Giorni (December 1998) "Electron Induced Neutron Production," Hybrid Nuclear Reactors, Institut des Sciences Nucleaires, Grenoble. <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/PPNPport/node88.html>

³³ W. C. Barber and W. D. George, "Neutron Yields from Targets Bombarded by Electrons," *Phys. Rev.* 116 (1959):1551-1559. В этой статье приведены уравнения, выведенные из экспериментальных данных. Затем уравнения были подогнаны так, чтобы выход нейтронов при 100 МэВ совпадал со средним значением из статьи Барбера и Джорджа и с экспериментальными данными на установке GELINA (ураново-молибденовая мишень). Совпадения лежат в пре-

$$Y_{n/e} = 6.3 \times 10^{-4} E_e - 7.5 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Фотоядерное получение нейтронов не столь эффективно, как использование развала ядер. Для технологии, которая уже оказывается потребляющей значительное количество энергии, это кажется ограничивающим фактором. Однако, в одном из исследований было найдено, что более низкая стоимость электронных ускорителей (по сравнению с ускорителями протонов) сможет обойти увеличение затрат на энергию, если требуемая интенсивность нейтронов будет ниже 10^{17} нейтронов в секунду – это примерно вдвое меньше того, что требуется для производства 8 кг плутония за два года на преобразователе с размножением нейтронов³⁴.

Нейтронные источники на реакциях (d,n) и (p,n) используют реакции протонов или дейтронов малой энергии (несколько МэВ) на ядрах легких элементов. Возможность иметь меньшую энергию сильно облегчает требуемые ускорительные технологии, что делает такие реакции особенно доступными для начинающего нарушителя. В число этих реакций входят $Li(p,n)$, $Be(p,n)$ и $Be(d,n)$, из которых наиболее эффективна реакция на литии³⁵ – ее выход дается уравнением (для $2.0 < E_p < 7.0$ МэВ)³⁶:

$$Y_{n/p} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot E_p^{2.5} \quad (4)$$

На рис.3 представлен выход нейтронов на падающий ион (то есть на протон или электрон в зависимости от ускорителя) для каждой из реакций, рассмотренных ранее. Развал обеспечивает наибольший выход, но требует протоны высокой энергии. Фотоядерные реакции (на электронных ускорителях) могут дать выходы нейтронов, аналогичные реакции (p,n) , но они требуют больше энергии на ион. Поэтому фотоядерные реакции более благоприятны только тогда, когда проще приобрести электронные ускорители, чем протонные. Реакция $Li(p,n)$ демонстрирует более низкие характеристики по сравнению с развалом, но позволяет нарушителю пользоваться ускорителями с меньшей энергией.

Ускоритель

Ускорители оказываются наиболее технически сложным компонентом в системе, питаемой ускорителем. Только машины, способные ускорять протоны до энергий свыше 2 МэВ или электроны до энергий более 16 МэВ, подходят для одной или нескольких реакций, детализированных выше. Требуются сильноточные ускорители для производства материала разумными темпами. В тех случаях, когда конкретный ускоритель не может обеспечить достаточно высокий ток, удовлетворяющий требованиям производства, можно использовать параллельно много машин. Машины, имеющие одновременно нужные энергии и требуемые токи в пучке, достаточно редки, и их приобретение может вызвать проблемы. В число возможных источников входят коммерческие системы и сооруженные в домашних условиях ускорители с иностранной помощью или без нее. Более старые и более простые технологии

делах трех процентов. Данные от установки GELINA приведены в работе M.Flascal et al., "GELINA Neutron Target Optimization," European Commission Directorate-General Joint Research Center, Belgium; and the Delft University of Technology, Mekelweg, Netherlands. <http://www.itn/mces.pt/ICRS-RPS/oralpd/Tuesday11/Session12.4/Plompen02.pdf>

³⁴ Линейные электронные ускорители дешевле протонных линейных ускорителей со сравнимыми энергиями благодаря тому, что электроны достигают релятивистских скоростей при гораздо меньших энергиях, нежели протоны. Brolley, A. Vertes (2003), "Concept of a Small-Scale Accelerator Driven System for Nuclear Waste Transmutation," *Annals of Nuclear Energy*. Reactor Analysis Department, KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapest.

³⁵ Содержание лития-7 составляет 92.6 % в естественном литии, так что не требуется отделять другие изотопы.

³⁶ Уравнение выведено автором из экспериментальных данных, полученных в работе K. Porges et al., "Thick Target Neutron Yields of Lithium and Beryllium Targets Bombarded with Protons and Deuterons" in *Applied Physics Division Annual Report July 1 1970 to June 30 1971*, Argonne National Laboratory (IL, January 1972) Report ANL-7910, pp. 361-362.

являются более доступными кандидатами для местного изготовления, чем более продвинутые устройства последних нескольких десятилетий.

Для данной реакции получения нейтронов и данной энергии ускорителя затраченная электрическая энергия прямо пропорциональна числу произведенных нейтронов. Требования к мощности зависят от использованного механизма получения нейтронов (развал, фотоядерный и т.д.), конструкции выбранного преобразователя (с размножением нейтронов или без него) и других аспектов, влияющих на общую эффективность системы (экономика нейтронов, потери при переработке, эффективность и т.п.). Для производства оружейного материала требуются значительные затраты на электроэнергию, что может уменьшить привлекательность ускорителей. В ряде случаев нарушителю может оказаться необходимым построить специальную электростанцию. Хотя затраты на электроэнергию будут крупным компонентом расходов, ежегодные затраты на несколько ускорительных систем окажутся в пределах оцененных затрат на создание ядерного реактора типа БГИР.

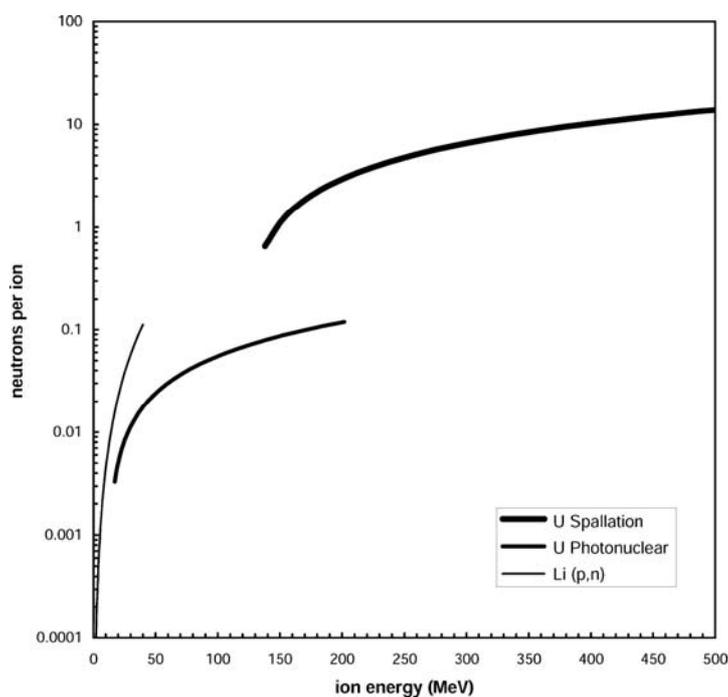


Рис.3: Сравнительные выходы нейтронов от разных реакций. Самая жирная линия принадлежит реакции развала ядер урана, более светлая – фотоядерной реакции на уране, а совсем тонкая – реакции Li(p,n). По оси абсцисс отложена энергия иона в МэВ (линейная шкала), по оси ординат – число нейтронов на ион (логарифмическая шкала).

При последующих подсчетах использования и стоимости электроэнергии используются следующие параметры. Предполагается, что ускорители работают с электрической эффективностью 50%. Это типично для имеющихся в продаже ускорителей. Грубо изготовленные ускорители, особенно те, которые работают при плохом вакууме в камере для пучка, могут иметь меньшую эффективность. Предполагается, что установка работает на полную мощность 80% времени. Считается, что цена за электроэнергию составит 0.06 доллара за кВт-час³⁷.

Для сравнения укажем, что промышленное предприятие может потреблять 10-50 МВт электроэнергии. Если потребуются новые ресурсы электричества, нарушитель мог бы заку-

³⁷ Цены приведены в американских долларах. Значение 0.06 доллар/кВт-час основано на усреднении по всему миру (каждая страна входит с одинаковым весом) минимальной цены промышленной энергии (не цены энергии в сети) за девятилетний период (1994-2002 гг.) Инфляция не учитывалась. Исключались атомные державы и члены Евросоюза. Данные представлены министерством энергетики США: ссылка в Интернете <http://www/eia.doe.gov/emeu/international/elecprti.html>.

пить разработанные газотурбинные генераторы с капитальными затратами около 400 тысяч долларов за МВт со средней рабочей ценой 0.04 доллара за кВт-час³⁸.

Технологии обычных циклотронов берут начало о 1931 г. Обычные циклотроны ограничены по энергии частиц релятивистскими эффектами до значений ниже примерно 25 МэВ. Таких энергий едва хватит для преодоления кулоновского барьера ядер урана, и поэтому нет возможности осуществить реакции развала даже с низким выходом. Источники нейтронов можно получить только на основе реакций типа (p,n), хотя для этого потребуются большие токи в пучке. Без механизмов фокусировки эффекты пространственного заряда ограничивают токи пучка десятками или сотнями микроампер³⁹. Но даже при токе 500 мкА и энергии 25 МэВ потребуется иметь около 250 циклотронов, соединенных с преобразователем, работающим в режиме умножения нейтронов. Такая конфигурация потребует около 6.2 МВт электроэнергии стоимостью примерно в 5.2 миллионов долларов, чтобы получить взрывчатку для одной имплозивной бомбы.

В изохронных циклотронах магнитное поле изменяется с радиусом, и это компенсирует релятивистские эффекты, позволяя иметь высокие энергии, необходимые для развала ядер. Часто в изохронных циклотронах используется также изменение магнитного поля по азимуту, или секторная фокусировка⁴⁰ – метод преодоления эффектов пространственного заряда, что позволяет получать более высокие токи в пучке. Но такие улучшения циклотрона могут оказаться значительной инженерной проблемой для технически малоопытного новичка. Их создание может оказаться более сложным, чем постройка небольшого ядерного реактора для производства плутония. Например, двухметровый циклотрон, созданный в лаборатории Лоуренса (Беркли, Калифорния) в 1958 г., был первым изохронным циклотроном. Потребовались много лучших в те времена специалистов по ускорителям, чтобы за более чем четыре года продвинуться от первой конструкции до первого успешного запуска машины⁴¹. Для сравнения заметим, что создание небольшого реактора для производства плутония потребует, по оценкам, восемь ученых на два-четыре года⁴².

Изохронные циклотроны с секторной фокусировкой продаются. Частная фирма IVA («Применение ионных пучков») в Бельгии рекламирует циклотрон на 150 МэВ с током 2 мА, который способен произвести 960 г плутония в год с преобразователем, использующем размножение нейтронов, или же 68 г делящегося материала с преобразователем в виде свинцового блока. Как сообщается, цена этого ускорителя составляет около 40 миллионов долларов. Четыре таких ускорителя смогут получить на подкритичном реакторе материал, достаточный для одной бомбы, за два года. При этом потребление электроэнергии составит 18 МВт для одной имплозивной бомбы, а стоимость энергии - примерно 15 миллионов долларов.

Другой циклотрон IVA обладает заявленной энергией 18 МэВ с током 2 мА, хотя ток может быть увеличен после усовершенствования ионного источника. Предел тока циклотрона, связанный с пространственным зарядом, находится в диапазоне 5-10 мА⁴³. При выведенном

³⁸ Основано на информации о генераторах LM6000 компании «Дженерал Электрик» (с газовыми турбинами) мощностью по 40 МВт, работающих на природном газе. Эти и аналогичные разработанные системы могут быть поставлены немедленно и запущены через 3-4 месяца. Цены в долларах 2003 г., как указано в докладе для министерства энергетики Новой Зеландии [<http://www.med.govt.nz/ers/electric/new-generation-options/skm/index/html>]. Операционные расходы основаны на цене газа (20 долларов за Гкал) и эффективности 40 %. Итоговая цена, отличающаяся от 0.06 доллар/кВт-час, не включает в себя уход, распределение, страховку, зарплату персонала и т.п.

³⁹ Оценено из обзора по циклотронам.

⁴⁰ Методика вертикальной фокусировки естественно расходящегося пучка заряженных ионов заключается в коррекции дефокусировки, возникающей при увеличении напряженности магнитного поля.

⁴¹ "The 88-Inch Sector-Focused Cyclotron," Lawrence Radiation Laboratory Publication #54, 1967. Обновленный материал смотрите на <http://www.lbl.gov/nsd/user88/cyclotronbook.html>.

⁴² Смотрите ссылку [9].

⁴³ P. Collins, Y. Jongen, G. Lannoeye, *Recent Advances in the Design of A Cyclotron-Driven Intense, Subcritical Neutron Source*, Ion Beam Applications, s.a., Belgium; P. Collins, Y. Jongen,

токе 10 мА такой циклотрон может производить по 147 г плутония в год с применением преобразователя-размножителя. Для производства 4 кг плутония в год потребуется 27 подобных циклотронов с требуемой мощностью электроэнергии 9.8 МВт, так что затраты на электроэнергию составят 10 миллионов долларов из расчета на одну имплозивную бомбу.

Синхроциклотроны компенсируют релятивистское отставание изменением магнитного поля со временем по определенному закону. Следовательно, по определению машина оказывается импульсной, поскольку в данное время может ускоряться только один сгусток частиц. Хотя эти частицы могут достигнуть высокой энергии (700 МэВ или более), импульсный режим работы обычно ограничивает средний ток до нескольких мкА. Поэтому синхроциклотроны непрактичны для производства оружия⁴⁴.

Линейные протонные ускорители способны получать одновременно большие токи и высокие энергии, требуемые для развала ядер. Созданные в 1950 г. для программы производства делящихся материалов (упоминавшаяся ранее программа УИМ)⁴⁵ ускорители имели такую конструкцию. Теоретически, можно построить линейный ускоритель, способный производить ежегодно взрывчатку для нескольких бомб. Но в большинстве приложений циклотроны более предпочтительны, чем линейные ускорители, которых нет в продаже. Это наводит на мысль, что линейные ускорители столь же трудны для изготовления, как, по крайней мере, изохронные циклотроны. Если мы рассматривали изохронные циклотроны как более сложные для изготовления по сравнению с небольшими ядерными реакторами, то нам следует рассматривать линейные протонные ускорители как еще более сложную задачу. Впрочем, иностранная помощь способна отвергнуть такой довод, а подобная помощь в настоящее время может пройти незамеченной.

Линейные электронные ускорители легче изготавливать, чем их протонные аналоги. Электроны становятся релятивистскими при меньших энергиях, чем протоны, из-за своей малой массы покоя. Поэтому все дрейфовые трубки в электронном ускорителе могут иметь одну и ту же длину. Хотя такие ускорители могут оказаться более практичными, чем большинство протонных ускорителей, для домашнего производства, они все же требуют технических сложностей, превышающих то, что нужно для простого циклотрона.

Ускорители с электростатическими квадрупольями (УЭК) – наиболее простые из рассмотренных в статье ускорителей (Рис. 4). На существующих машинах можно ускорять протоны до 2.5 МэВ в простом варианте и до 5 МэВ в варианте тандема. Квадрупольная фокусировка позволяет иметь особенно высокие токи пучка, что делает возможным успешное использование реакции (p,n). Ограничивающим фактором для УЭК является предельная мощность силового питания. Продемонстрированы конструкции с током свыше 100 мА и предложены конструкции с током свыше 1 А. Если иметь ускоритель в тандемном варианте на энергию 5 МэВ с током 100 мА, то для получения взрывчатки к одной имплозивной бомбе за два года потребуется присоединить в параллель к подкритичному реактору-преобразователю 50 таких ускорителей⁴⁶.

На рис.5 показано, насколько совместимы различные ускорители с рассмотренными ранее тремя реакциями для получения нейтронов. На оси ординат представлены значения полной мощности, требуемой, чтобы получить достаточное количество делящегося материала для одной имплозивной бомбы (8 кг) в течение двух лет. Эти значения приведены для преобразователя без размножения нейтронов (слева) и с размножением нейтронов (справа)⁴⁷. Характерные энергии частиц для разных ускорителей указаны горизонтальными полосами. Примеры конфигураций и соответствующие требования к электроэнергии даны далее в Табл. 1.

High Beam Intensities for Cyclotron-Based Radioisotope Production, Ion Beam Applications, s.a., Belgium.

⁴⁴ "Three Generations of Cyclotrons", составлено на основе [41].

⁴⁵ Смотрите раздел «История электроядерного размножения» в тексте.

⁴⁶ Принимаются скважность 80 % и подкритичный реактор, где на один падающий нейтрон образуются 13.8 нейтронов, захватываемых в материале реактора.

⁴⁷ Преобразователь с размножением нейтронов, указанный на этом графике, образует 10 нейтронов (а не 13.8, как указано в предыдущей ссылке) на один падающий – это связано с ограничениями графического математического обеспечения.

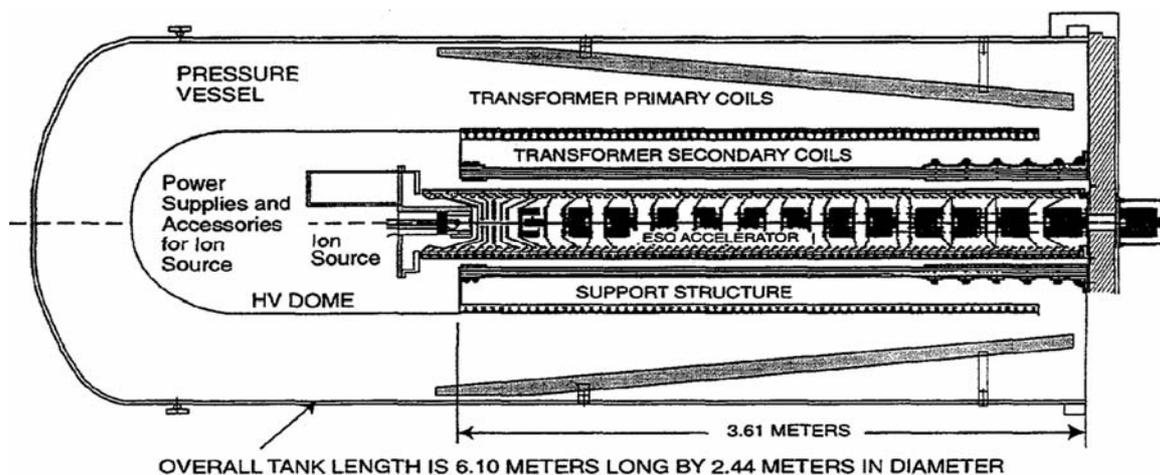


Рис. 4: Чертеж (в разрезе) ускорителя с электростатическими квадрупольями (энергия 2.5 МэВ, ток 125 мА). Показаны ионный источник, клапан высокого давления и сильноточное силовое питание с индуктивной связью. В.А.Ludewigt et al., *An Epithermal Neutron Source for BNCT based on an ESQ-Accelerator*, July 1997, LBNL-40642. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): клапан, внешняя обмотка трансформатора; внутренняя обмотка трансформатора; силовое питание и детали ионного источника, ионный источник, ускоритель с электростатическими квадрупольями; высоковольтный кожух, поддерживающая структура; полная длина бака 5.1 м, диаметр 2.44 м.

Табл. 1: Требования к электрической мощности для производства 4 кг делящегося материала в год (по одной имплозивной бомбе с 8 кг материала каждые два года)(1)

Конфигурация	М	Ц
УЭК на 5 МэВ (тандем), реакция Li(p,n), свинцовый блок	750	630
То же самое, но с подкритичным реактором	53	45
Сильноточный циклотрон IBA на 18 МэВ, реакция Li(p,n), свинцовый блок	135	110
То же самое, но с подкритичным реактором	9,8	8,2
Обычный циклотрон на 25 МэВ, реакция Li(p,n), свинцовый блок	87	73
То же самое, но с подкритичным реактором	6,3	5,3
Линейный электронный ускоритель на 100 МэВ, свинцовый блок	170	150
То же самое, но с подкритичным реактором	12	10
Циклотрон IBA на 150 МэВ, развал ядер урана, свинцовый блок	18	15
То же самое, но с подкритичным реактором	1,3	1,1
Ускоритель на 235 МэВ, развал ядер урана, свинцовый блок	7,2	6,1
То же самое, но с подкритичным реактором	0,51	0,43

Второй столбец (М) – требуемая мощность электропитания в МВт.
Третий столбец (Ц) - цена затраченной электроэнергии (миллионы долларов) на производство одной бомбы с 8 кг делящегося материала.
Примечание (1): Величины рассчитаны в соответствии с примечанием³¹. Мощность рассчитывается по требуемому току в ускорителе, умноженному на максимальную энергию частиц в ускорителе. Затраты на электроэнергию исходят из принятой цены 0.06 долларов на один кВт.час. Другие параметры приведены в разделе «Ускоритель».

Ядерное оружие ствольного типа из урана-233 потребует 20 кг делящегося материала, так что значения на левой оси ординат надо умножить на коэффициент 2.5. Обратите внимание, что преобразователь в виде подкритичного реактора не может быть непосредственно использован для получения урана-233, и поэтому умножение на 2.5 нельзя применять к правой ординате. Можно использовать гибридные преобразователи в качестве умножителя нейтронов для производства урана-233, но они не разбираются в нашей статье⁴⁸.

⁴⁸ Гибридные преобразователи подробнее объясняются в ссылке [27].

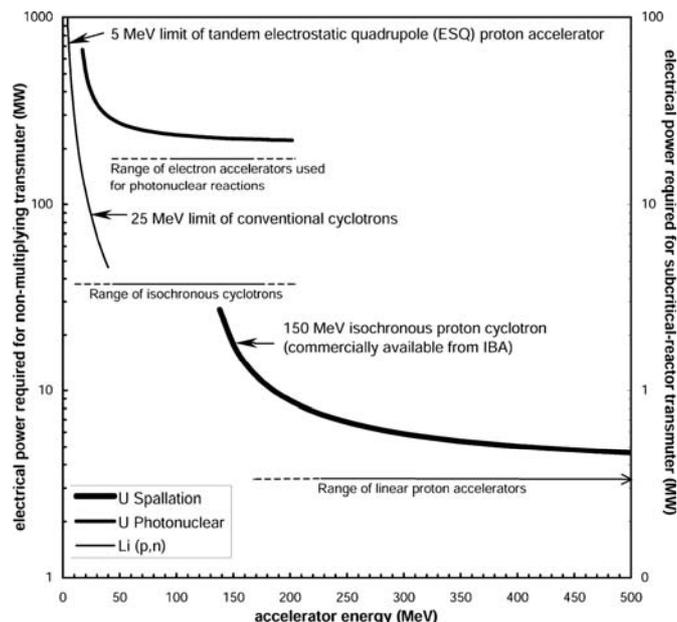


Рис.5: Требования к электроэнергии для различных ускорителей и их совместимость с реакциями получения нейтронов. По оси абсцисс отложена энергия ускорителя (линейный масштаб) в единицах МэВ. По оси ординат (слева) в логарифмическом масштабе отложена мощность электропитания (МВт) в случае использования преобразователя без размножения нейтронов. Справа на оси ординат приведены значения мощности для преобразователя в виде подкритического реактора. Надписи на рисунке (сверху вниз):

- ← Предел энергий (5 МэВ) для протонного ускорителя с электростатическими квадрупольями;
- Диапазон энергий ускорителей, пригодных для фотоядерных реакций;
- ← Предел энергий (25 МэВ) для обычных циклотронов;
- Диапазон энергий изохронных циклотронов;
- ← Изохронный протонный циклотрон на 150 МэВ (продается фирмой IBA);
- Диапазон энергий линейных протонных ускорителей.

Самой жирной линией отмечена реакция развала ядер урана, затем следует реакция фотоделения ядер урана, а самая тонкая линия соответствует реакции (p,n) на ядрах лития.

ПЕРЕРАБОТКА

Переработка потребуется для отделения свежего полученного делящегося материала от сырья и отходов. Используемые для этого химические процессы подробно рассмотрены в открытой литературе, а все реагенты свободно продаются. В некоторых исследованиях предпринимались попытки установить тот уровень, когда переработка становится барьером для распространения. Авторы пришли к заключению, что это легкая задача даже для начинающего нарушителя⁴⁹. Например, в докладе Сандийской национальной лаборатории (1996 г.) переработка характеризуется как «относительно простой процесс, который может провести недружелюбная группа на временной установке»⁵⁰.

⁴⁹ W. G. Sutcliffe and T. J. Trapp, Eds., *Extraction and Utility of Reactor-Grade Plutonium for Weapons (U)*, Lawrence Livermore National Laboratory, April 27, 1995; смотрите также [9].

⁵⁰ J. P. Hinton et al., *Proliferation Resistance of Fissile Material Disposition Program (FMDP), Plutonium Disposition Alternatives: Report of the Proliferation Vulnerability Red Team*, Sandia National Laboratories, Report no. SAND97-8201, October 1996, Section 4.1.1.3, pp. 4.3-4.9, in V. Glinsky, M. Miller, and H. Hubbard, *A Fresh Examination of the Proliferation Dangers of Light Water Reactors*, The Nonproliferation Policy Education Center. В указанных выше докладах проведены оценки затрат, численности персонала и сроков – аналогичные сведения доступны и из исторических документов. Часто цитируется предложение по конструкции завода «Филлипс», предназначенного для топлива с выгоранием 10000 МВт.д/т. Точность таких оценок

Некоторые оговорки по поводу подобных утверждений стоит сделать с учетом примеров начальных усилий по переработке в странах, вовлеченных в этот процесс. Одним из них этих примеров служит Китай. Более 10 лет Китай шел по пути исследований методик переработки, куда входила небольшая программа по извлечению материала из раствора, начатая после получения американских технических публикаций с деталями методики. Вскоре после взрыва первой китайской ядерной бомбы, сделанной из обогащенного урана, было принято решение о закрытии исследований по альтернативным технологиям переработки и быстром сооружении демонстрационной установки, использующей американскую технологию извлечения из раствора. Даже в этом случае потребовалось полтора года и 200-300 техников (из которых 60 имели значительный радиохимический опыт) для создания демонстрационного завода с производительностью 10 тонн в год⁵¹, который выдавал бы один кг плутония в год от реактора типа БГИР (с выгоранием урана 122 МВт.д/т).

Первые перерабатывающие предприятия могут обладать производительностью в диапазоне 10-60 тонн в год. Небольшой завод в Северной Корее перерабатывал 110 тонн в год⁵².

Перерабатывающие установки для небольшого реактора по производству плутония

Радиоактивность топлива, выгруженного из реактора типа БГИР, составит примерно одну шестую часть от активности типичного энергетического реактора, но все же потребует значительной защиты⁵³. Типичные размеры начальной установки подразумевают, что 75 тонн из активной зоны реактора БГИР потребуют 1-3 лет для переработки. В докладе Управления по техническим оценкам (1977 г.) оценены затраты в 55 миллионов долларов (с точностью порядка множителя двойки) на создание в США простого завода по переработке, предназначенного для топлива от реактора типа БГИР⁵⁴. Это значение в четыре раза превышает оценки затрат на сам реактор и в много раз затраты на электричество для большинства рассмотренных конфигураций ускорителя и преобразователя.

Переработка для системы ускорителя

Нагрузка на переработку топлива для системы ускоритель-преобразователь зависит в основном от выбранного преобразователя. Преобразователи с умножением нейтронов в значительной степени полагаются на деления ядер и поэтому имеют уровни радиоактивности, сравнимые с ядерными реакторами. Они будут также обладать тенденцией к аналогичной величине загрузки. Подкритичный реактор размером 2.4 м с водяным замедлителем,

вызывает вопросы, поскольку известно, что заводы по переработке часто оказывались более дорогими и более сложными, чем следовало из подобных предварительных оценок (смотрите [9]). Для информации о заводе «Филлипс» смотрите Н. Schneider et al., *A Study of the Feasibility of a Small Scale Reprocessing Plant for the Dresden Nuclear Power Station*, Report IDO-14521, Phillips Petroleum Company, April 28, 1961. Доступно через национальную техническую информационную службу США.

⁵¹ *Modern China's Nuclear Industry, edited by the Dangdai Zhongguo (China Today)* – на китайском языке. Выдержки переведены на английский язык, JPRS-CST-88-008, pp. 11-19 и доступны через национальную техническую информационную службу США.

⁵² Sharon A. Squassoni, *North Korea's Nuclear Weapons: How soon an Arsenal?*, *Congressional Research Service Report*, Order Code RS21391, February 2, 2004 [<http://fpc.state.gov/documents/organization/29649.pdf>]

⁵³ Предположим, что реактор типа БГИР работает с выгоранием 122 МВт.д/т и со скважностью 100 %, в топливо выдерживается в течении 120 дней. При этом радиоактивность уменьшается примерно в 100 раз до уровня 45000 Ки/т. Эту величину следует сравнить с 287000 Ки/т для топлива, выгруженного из ЛВР с мощностью 1 ГВт (по электричеству), причем реактор работает с выгоранием 33000 МВт.д/т и с полной загрузкой, а топливо выдерживалось в течение 10 лет. Данные по БГИР взяты в [9], а данные по ЛВР из справочника Anthony V. Nero, Jr., *A Guidebook to Nuclear Reactors*, University of California, 1979, pp. 36-37.

⁵⁴ Пересчитано на доллары 2003 г.

использованный в статье в качестве примера, содержит 102 т урана, что на 30% превышает массу топлива в реакторе типа БГИР.

В системах, где деление сведено к минимуму (например, преобразователь в виде свинцового блока), можно уменьшить радиоактивность. Поскольку радиационная защита часто имеет максимальную стоимость на заводе по переработке⁵⁵, а оборудование для дистанционных операций и автоматизации процесса занимают второе место по расходам, уменьшение радиоактивности сделает переработку более приемлемой. Кроме того, загрузка сырьевым материалом может снизиться по сравнению с реактором или подкритичным преобразователем, что уменьшает количество материала, которое следует переработать. Хотя применяемые вместе с ускорителями преобразователи с минимумом делений потребляют больше чем на порядок величины электроэнергии, повышенная плата за электричество может быть компенсирована (частично или полностью) уменьшением расходов на переработку.

ОБНАРУЖЕНИЕ

Успешное осуществление скрываемой программы по делящимся материалам (будь то реактор типа БГИР или система с использованием ускорителя) потребует от нарушителя избегать действий, способных привести к непосредственному обнаружению или к требованию на проведение инспекции со стороны Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Если даже нарушитель работал с учетом таких ограничений, существуют технические механизмы дистанционного обнаружения признаков, типичных для производства делящихся материалов. Процесс деления, используемый для умножения числа нейтронов внутри ядерного реактора или подкритичного реактора-размножителя, который возбуждается ускорителем, предоставляет ряд подобных признаков: тепло, радиоактивность и различные продукты деления. Впрочем, для обсуждаемых в статье систем небольшого размера нет известных методов обнаружения, которые оказались бы надежно нечувствительными к простым мерам противодействия.

Тепло, испускаемое реактором с мощностью 25 МВт, составляет только долю тепла, которое излучают крупные промышленные предприятия с заметным тепловыделением, например, завод для плавки алюминия⁵⁶. Поэтому реактор надо располагать рядом с таким предприятием и тем самым маскировать свое тепловое излучение. Системы с ускорителями (и с преобразователем другого типа) будут выделять тепло в таком количестве, которое примерно равно поглощенной ускорителем электроэнергии. В семи из двенадцати приведенных выше примеров конфигураций эта величина будет меньше, чем у реактора типа БГИР.

Альфа-, бета- и гамма-излучение от деления может быть экранировано почти полностью с помощью радиационной защиты при любой технологии. Нет сведений о существовании практических методик детектирования гамма-лучей высокой энергии и нейтрино на значительных расстояниях от источника.

Продукты деления (химические элементы, образующиеся при развале ядра в результате деления) оказываются внутри топливных элементов. Те из них, которые являются газами, особенно инертными газами, могут выходить на поверхность в небольших количествах. Их скорость утечки при работе реактора обычно меньше одного процента по сравнению с утечкой при переработке. Поэтому способность к обнаружению ограничена не излучением от реактора, а излучением при переработке. Впрочем, для топлива, извлеченного из небольшого реактора мощностью 25 МВт или из возбуждаемого ускорителем преобразователя, уровни

⁵⁵ Смотрите [9].

⁵⁶ Плавка алюминия является одним из самых энергоемких промышленных процессов. Требуется 15-20 кВт.час на кг алюминия. Типичная плавильная установка с 300 тигелями может произвести 125000 тонн алюминия в год, потребляя около 280 МВт электроэнергии. Эти данные заимствованы из Международного алюминиевого института (<http://www.world-aluminium.org/production/smelting/>). Такой уровень производства алюминия кажется разумным для небольших стран. Например, алюминиевый комбинат в Дубае (ОАЭ) произвел 536000 тонн в год в 2002 г. Государственный комбинат IRALCO в центральном Иране производит ежегодно по 120000 тонн ("A glance at the Aluminum Industry," *National Geoscience Database of Iran*, <http://www.ngdir.ir/News/NewsReportDetail.asp?Pid=55>).

утечки окажутся достаточно низкими, так что обнаружение утечки на имеющихся смысл расстояниях кажется маловероятным⁵⁷.

Классические механизмы разведки полезны для обнаружения ядерных установок. Как спутниковые (или воздушные) фотоснимки, так и агентурные источники с большим успехом использовались в прошлом для обнаружения реакторов. В принципе, небольшой размер реактора типа БГИР и отсутствие внешних характерных признаков означают, что такой реактор можно легче спрятать от фотографирования сверху, чем большинство реакторов. По той же причине, возбуждаемые ускорителями системы не обладают характерными признаками за исключением любой инфраструктуры с производством большого количества электроэнергии, которая может быть (или может не быть) расположена поблизости. Впрочем, не следует считать, что начинающий нарушитель сможет успешно помешать хорошо оплачиваемым и опытным службам, использующим агентуру, которые существуют в крупных странах.

Экспортный контроль является последним (по счету) механизмом, с помощью которого международная общественность стремится предотвратить и обнаружить ядерное распространение. Хотя графит ядерного качества для реакторов типа БГИР помещен в перечень материалов, подлежащих экспортному контролю, его производство внутри страны обойдет любое экспортное нарушение. Ускорительные технологии еще даже менее склонны к обнаружению при экспортном контроле, поскольку технологии такого типа в настоящее время не входят ни в какой список для контроля при экспорте. Исправленное Лондонское руководство (список Занггера, он же документ INFCIRC/254 Rev 6, Parts I and II) упоминает об ускорительных технологиях, только когда они относятся к электромагнитному разделению изотопов и к «импульсным электронным источникам», применяемым для рентгеновского просвечивания ядерных имплозивных испытаний. В классификации Вассенаара⁵⁸ ускорители упоминаются только в контексте оружия с направленной передачей энергии (пучки нейтральных частиц). Ни один из ускорителей, обсуждавшихся в этой статье, не подвержен упомянутому экспортному контролю. Если сравнить с графитом ядерного качества, то ускорители значительно труднее изготовить внутри страны нарушителя. Если это так, то экспортный контроль обладает возможностью установить более высокий барьер распространению посредством контроля над ускорителями, чем делается сейчас с помощью контроля только над ядерными реакторами.

ВЫВОДЫ

Ускорители являются заметным путем к приобретению делящихся материалов, хотя их преимущества очень зависят от ситуации. Рассмотренные в статье более продвинутые ускорители – протонные линейные ускорители или изохронные циклотроны, находятся среди

⁵⁷ Изучение криптона-85 (обычно рассматриваемого инертного газа, вытекающего из отработанного топлива) привело бы к обнаружению индийского завода по переработке в Тромбее, если он будет перерабатывать топливо такого типа, какой образуется в реакторах Хэнфорда. Завод в Тромбее обладает возможностью перерабатывать в год до 50 тонн тяжелого металла. Подобный завод можно было бы использовать для переработки 75 тонн топлива от реактора типа БГИР. Топливо из Хэнфорда содержит около 260 Ки/кг криптона-85, что превышает уровень 53 Ки/кг для реактора типа БГИР через год работы. Поэтому наши оценки возможности обнаружить реактор типа БГИР преувеличены. Даже для более радиоактивного топлива типа Хэнфорда предсказывается, что уровни криптона-85 упадут ниже естественного фона на расстояниях свыше 100 км. Смотрите статью Миана и Найяра «Предварительный анализ производства и распространения криптона-85 от индийских и пакистанских предприятий по переработке ядерного топлива», *Наука и всеобщая безопасность*, т.10, вып.3 (2003 г.). Экспериментальные результаты, подкрепляющие это утверждение, приведены в докладе Martin V. Kalinowsky, *Measurements and Modelling of Atmospheric Krypton-85 as Indicator for Plutonium Separation*, IANUS, TH Darmstadt. [<http://www.ianus.tu-darmstadt.de/Publikationen/Kalinowsky/Kr-geel/kr-geel.html>].

⁵⁸ Классификация Вассенаара – это глобальное многоуровневое соглашение по экспортному контролю для обычных вооружений, а также чувствительных товаров и технологий двойного использования. Она была окончательно одобрена тридцатью тремя странами-создателями в июле 1996 г. и начала действовать в сентябре 1996 г. [<http://www.wassenaar.org>].

наиболее экономически привлекательных и представляют собой проект выполняемого масштаба, пока требуется только немного машин. Впрочем, приводится аргумент, что ускорители гораздо труднее изготовить, чем ядерные реакторы. Упомянувшиеся коммерческие системы (сделанные «под ключ») и различные формы международного сотрудничества могут быть приобретены без труда и без извещения какой-либо проверяющей организации. Рассматривая затем легкость, с которой можно приобрести эти продвинутые ускорители из-за границы, уменьшенную сложность переработки благодаря преобразователям без умножения числа нейтронов и простоту создания оружия ствольного типа из урана-233, можно прийти к выводу, что многие из естественных барьеров распространению можно приподнять, если использовать ускорители, даже для самых примитивных нарушителей.

Если ввести экспортный контроль, привлекательность ускорителей сильно уменьшится. Только при таких обстоятельствах, когда нарушитель не уверен, что сможет построить ядерный реактор или безопасно работать с ним, но может изготовить ускоритель в домашних условиях, ускорители можно рассматривать как очевидный путь. Более легко изготавливаемые ускорители (например, обычные циклотроны и ускорители с электростатическими квадрупольями - УЭК) обладают тенденцией потреблять большие количества электроэнергии и требуют крупномасштабные проекты, где участвуют десятки или сотни машин. Использование УЭК для производства плутония предоставляет следующий типичный сценарий: для получения одной бомбы за два года потребуется 50 УЭК с током 100 мА в каждом, если использовать подкритичный реактор в качестве преобразователя, или 750 ускорителей при преобразователе без размножения нейтронов. Всего стоимость электроэнергии на создание одной бомбы составит 5 или 650 миллионов долларов, соответственно.

В заключение отметим, что технологию ускорителей следует рассматривать для включения в международные списки экспортного контроля. Может оказаться полезным и национальное законодательство, требующее от частных компаний извещать регулирующие организации о любых международных контрактах, которые связаны с ускорителями, или об экспорте технических сведений по ускорительной тематике. Начальные формы такого законодательства уже появились в США – они связаны с ограничением передачи ускорителей и подкритичных сборок с конкретными целями переработки специальных ядерных материалов. МАГАТЭ, как ожидается, тоже выпустит технический документ, рекомендующий Агентству «регулировать вопрос». Хотя такие и будущие меры не устранят угрозу распространения от ускорителей, они способны сделать угрозу более близкой к той, которая исходит от небольших ядерных реакторов.