

ВОПРОС О ЧИСТОМ ТЕРМОЯДЕРНОМ ВЗРЫВЕ В РАМКАХ ДВЗЯИ

Сьюзен Л. Джоунс и Фрэнк фон Хиппель

Как представляется, широко распространено мнение, что Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) не запрещает термоядерные исследования, включая сжатие дейтериево-тритиевой смеси под действием лазерных пучков или пучков частиц. Изучения термоядерных процессов при обжатии иными методами идут сейчас в гражданских и военных лабораториях США и других стран - они могут привести к небольшому (возможно, до нескольких тонн тротилового эквивалента) взрывному выделению термоядерной энергии. Однако статус таких экспериментов в рамках ДВЗЯИ четко не определен. Пока не будет открыто обсужден потенциал подобных исследований, которые могут привести к разработке чистого термоядерного оружия, и пока не будет установлена соответствующая политика в рамках ДВЗЯИ, определяющая проведение таких работ, подобные эксперименты следовало бы временно ограничить двумя требованиями: (1) максимальная интенсивность полученных нейтронов не должна превышать 10 ; (2) использование трития следует запретить.

Сьюзен Л. Джоунс работает в Центре по изучению энергетики и окружающей среды при Принстонском университете (США). Фрэнк фон Хиппель - профессор Принстонского университета по общественным и международным проблемам.

ВВЕДЕНИЕ

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) запрещает "любой испытательный взрыв ядерного оружия или любой иной ядерный взрыв". Впрочем, ни текст самого Договора, ни доступные общественности переговорные материалы не дают точного технического понимания границы между запрещенными ядерными взрывами и незапрещенной деятельностью. Существуют "серые" области, на которые государствам придется обратить внимание в контексте обсуждения ратификации и для внутреннего планирования.

Для взрывов на основе деления Соединенные Штаты предложили критичность в качестве своей разделительной линии между "ядерным взрывом" и чем-то, меньшим этого¹. Требуется также политика, связанная с разрешенными термоядерными экспериментами. Если окажется возможным создать компактную чисто термоядерную взрывчатку, ее подрыв явно был бы запрещен Договором. Основанная только на термоядерном топливе взрывчатка может иметь столь же высокий оружейный потенциал, как и взрывчатка, использующая деление или деление-синтез и существующая сегодня в ядерных арсеналах. Более того, если разработать компактную термоядерную взрывчатку, то будут обойдены меры предосторожности МАГАТЭ против использования делящихся материалов, а это пока основной метод для проверки нераспространения ядерного оружия².

Некоторые виды НИР, которые могут привести к небольшому (может быть, до нескольких тонн тротилового эквивалента) взрывному выделению энергии от синтеза дейтерия и трития, ведутся в рамках как гражданских, так и военных исследований в ряде стран. На конференции 1975 г. по проверке соблюдения ДНЯО - Договора о нераспространении ядерного оружия, США отстаивали точку зрения, что изучение некоторых методов поджига небольших термоядерных взрывов не следует запрещать в рамках ДНЯО. Конкретными методами назывались имплозия и нагрев термоядерных веществ сходящимися лазерными пучками или пучками заряженных частиц от ускорителей³. При этом подразумевалось, что ни лазеры большой мощности, ни ускорители с системами транспортировки пучков нельзя будет сделать столь миниатюрными, чтобы установить их на ракете или в бомбовом отсеке самолета. Похоже, что по этому вопросу со стороны других правительств было мало возражений. Сегодня работы по методикам инерциального лазерного или пучкового термояда открыто ведутся в ряде неядерных держав, например, в Германии, которая при подписании ДВЗЯИ заявила о своем понимании, что такие исследования не запрещены в рамках ДВЗЯИ⁴.

"ПОДОБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ"

В официальной "интерпретации" ДВЗЯИ админист-

рацией Клинтона при передаче Договора в Сенат для начала процесса ратификации отмечалось понимание ею, что в "деятельность, на которую не влияет Договор," входят "инерциальный термояд и подобные эксперименты"⁵. Вопрос о дальнейших правилах по поводу ограничений на "подобные эксперименты" обсуждался администрацией в период разработки этой интерпретации, но не было дано никаких конкретных несекретных инструкций. Такие эксперименты, где для осуществления имплозии вместо лазеров или пучков частиц применяются химическая взрывчатка или магнитные поля, сегодня вызывают значительный интерес в американских военных лабораториях отчасти потому, что они предоставляют альтернативную арену, где физики-оружейники могут углубить свое понимание плотной высокотемпературной плазмы без испытаний ядерного оружия. Кое-кто рассматривает эти эксперименты как потенциально гораздо более дешевые пути к инерциальному термояду по сравнению с лазерными и пучковыми подходами. Поскольку эти эксперименты являются также потенциальными путями к разработке чистого термоядерного оружия, необходимо установить политику проведения таких исследований.

Один из таких подходов - "синтез в замагниченной мишени" (СЗМ, см. Приложение А), является в настоящее время предметом открытых совместных исследований в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) и Всероссийском институте экспериментальной физики в Сарове (бывшем Арзамасе-16). СЗМ включает в себя создание "теплой" (с температурой около 100 эВ) замагниченной плазмы, которая затем сжимается лайнером под давлением магнитного поля. Пока что полный эксперимент с обжатием плазмы лайнером еще не проведен, но получена дейтериево-тритиевая (DT) плазма, создающая без обжатия 10^{13} нейтронов^{6,7}. При другом подходе, который исследуется сейчас в Сандийской национальной лаборатории, генерируется мягкий рентген при прохождении большого токового импульса через тонкие проволоочки, расположенные вдоль цилиндрической поверхности. При этом образуется плазма, которая затем обжимается внешним магнитным полем до плотностей, при которых наступает захват рентгеновских лучей (см. Приложение Г). Эти рентгеновские лучи в дальнейшем будут использованы для сжатия небольшой DT-мишени⁸.

Оба этих подхода избавляются от посредничества лазеров и ускорителей заряженных частиц, а вместо них используются очень большие импульсы электрического тока, генерируемые импульсными источниками энергии, для обжатия DT-мишени. Токовые импульсы можно получить от больших конденсаторных банок или путем обжатия магнитного поля химической взрывчаткой (Приложение А). Основателем последней методики был Андрей Сахаров в Арзамасе-16⁹.

Вступление в силу ДВЗЯИ также, вероятно, возродило интерес военных лабораторий к попыткам непосредственно поджечь DT-смесь при помощи имплозив-

ных систем с химической взрывчаткой хотя бы потому, что это окажется одной из остающихся экспериментальных проблем, которую проектировщики импловивных систем для ядерного оружия могут использовать, чтобы отточить свое умение. Хотя американские успехи в этой области засекречены, российские военные лаборатории сообщали в 1992 г. о выходе нейтронов в диапазоне 10^{13} - 10^{14} , что соответствует синтезу 10^{-10} - 10^{-9} грамм DT-смеси¹⁰. Получение 10^{14} нейтронов будет сопровождаться выделением термоядерной энергии, грубо говоря, эквивалентной 60 мг тротила¹¹. Соответствующая доза излучения на расстоянии один метр составит около 0.2 Гр (20 рад) - это много, но недостаточно много для смертельного исхода при коротком импульсе¹².

Ганс Бете, руководивший теоретическим отделом в Лос Аламосе во время второй мировой войны, выражал скептицизм по поводу того, что деятельность такого рода могла бы привести к чистому термоядерному оружию. Однако в апреле 1997 г. он написал письмо президенту Клинтону, где утверждал, что "пришло время для нашей страны заявить, что она не работает никоим образом над разработкой новых видов оружия массового поражения любого типа. В частности, это означает прекращение финансирования работ, которые направлены на возможности создания новых конструкций ядерного оружия, например, чистого термоядерного оружия"¹³. Если заявить о такой политике, то потребуются более четкие правила по отношению к разрешенной деятельности. Цель данной статьи состоит в том, чтобы начать создавать техническую основу для подобных правил.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОРУЖЕЙНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Двумя потенциальными оружейными приложениями термоядерной взрывчатки станут: (1) боеголовки с более высоким соотношением мощность/вес, чем можно получить при использовании обычной химической взрывчатки (ВВ); и (2) нейтронные мини-бомбы. На рис. 1 приведены радиусы смертельного поражения от нейтронного излучения в зависимости от выхода нейтронов. Например, как показывают графики, термоядерное оружие с тротильным эквивалентом в одну тонну создаст смертельную нейтронную дозу на расстояниях до 200-400 метров.

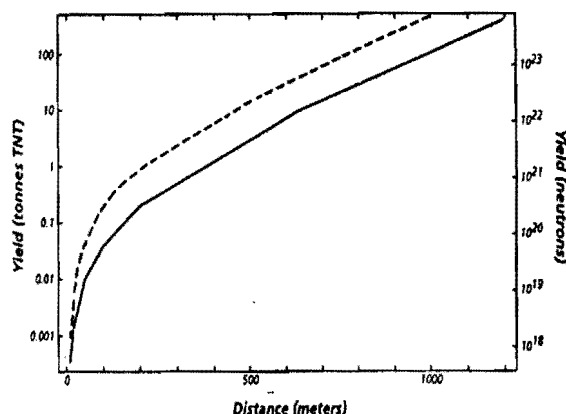


Рисунок 1: Сплошная линия соответствует расстоянию, ниже которого человек получит смертельную дозу излучения (4.5 Гр или более) от нейтронов высокой энергии, образующихся при термоядерном взрыве на открытом воздухе. Штрихованная кривая показывает аналогичное расстояние с учетом оцениваемой экранировки бетонными зданиями в городе (см. сноску¹⁴). Слева на оси ординат приведены мощности взрыва в единицах тротильного эквивалента, справа - полный выход нейтронов.

Мы исследовали потенциал термоядерного оружия в предварительном виде для СЗМ-случая (Приложение Б). Мы выбрали СЗМ не потому, что он представляет из себя конкретную опасность, а по той причине, что это наиболее разработанная чистая термоядерная система, за-

пытываемая ВВ и являющаяся несекретной. Мы приходим к выводу, что хотя у нее мало преимуществ перед обычными ВВ с точки зрения эффектов взрывной волны, она может иметь некий потенциал как нейтронная мини-бомба.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВЫГОДЫ

Неоружейные выгоды, на которые претендуют при разработке УТС (управляемого термоядерного синтеза) с импульсными источниками энергии пересекаются с некоторыми из выгод, ожидаемыми от лазерного инерциального термояда: i) обнаружение потенциального пути к экономичному выделению термоядерной энергии в малых масштабах; ii) интенсивный импульсный нейтронный источник для использования в научных исследованиях, чтобы моделировать эффекты воздействия ядерного оружия; iii) изучение до сих пор не исследованных режимов плотностей плазмы и повышение знаний о физике плазмы вообще; и iv) способы, с помощью которых "проводится тренировка практически всех видов теоретического и экспериментального мастерства, необходимого для поддержания способностей конструирования ядерного оружия и проведения испытаний"¹⁴. Эти оправдания должны стать предметом открытого рассмотрения и внешнего обсуждения.

Попытки оправдать такие эксперименты как энергетические исследования встречаются с особо высоким барьером непонимания, поскольку энергосистемы, основанные на импульсной технике, не будут экономичными до тех пор, пока затраты на импульс нельзя будет сделать очень низкими¹⁵. Похоже, что этому критерию трудно удовлетворить. Например, если даже импульсный DT-синтез будет доведен до такого состояния, когда при одном выстреле выделяется один гигаджоуль энергии, полные затраты на выстрел придется сделать ниже 15 долларов, чтобы конкурировать с современными ценами на энергию от деления (Приложение Б).

А что касается последнего оправдания, предполагающего продление умения в области ядерного оружия путем разработки и испытаний устройств, которые сами по себе оказываются потенциальным ядерным оружием, его можно рассматривать как обход ДВЗЯИ. Рэй Киддер - ушедший в отставку старший эксперт по ядерному оружию Ливерморской национальной лаборатории, сказал о термоядерных исследованиях с ВВ-источником энергии: "Это на самом деле хороший способ сохранить темпы ваших войск и поддерживать в них интерес...но если вы собираетесь быть честными к целям ДВЗЯИ, вы не станете этим заниматься"¹⁶.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Тем, кто будет подписывать ДВЗЯИ, придется иметь дело с фактом, что некоторые лаборатории ядерного оружия уже проводят открыто термоядерные эксперименты с импульсными источниками питания и повидимому заинтересованы в проведении секретных опытов по синтезу с ВВ-имплозией. Тем, кто проводит такие опыты, придется иметь дело с фактом, что их могут спросить о том, разрешена ли подобная деятельность в условиях ДВЗЯИ.

С учетом возникшей ситуации можно потребовать некоторых промежуточных ограничений. Ричард Гарвин, выступая перед китайскими экспертами по ядерному оружию в феврале 1996 г., предложил одно возможное промежуточное ограничение на прямой термояд под воздействием ВВ:

"Хотя перспективы термоядерных взрывов с опасной мощностью не выглядят обобщающими в конструкциях с ВВ, я полагаю, что такие возможности надо рассматривать в качестве запрещенных Договором. Тем не менее, как научное любопытство, так и отдельные практические цели могут быть удовлетворены ВВ-системами, вызывающими небольшое количество реакций синтеза. Чтобы установить необходимую шкалу, вспомним, что один грамм ВВ экви-

валентен энерговыделению от $1.6 \cdot 10^{15}$ реакций синтеза. Поэтому можно установить предел (только для синтеза, вызываемого ВВ-имплозией) на уровне 0.1 г ВВ, что будет соответствовать $1.6 \cdot 10^{14}$ термоядерным реакциям¹⁷.

Как отмечалось ранее, этот предел примерно равен тому числу реакций, о котором сообщали российские экспериментаторы, использовавшие сборку с прямой ВВ-имплозией. Импульсный термояд с ВВ-источником энергии должен стать предметом такого же ограничения до тех пор, пока не будет проведен анализ его потенциальных опасностей и выгод. В случае СЗМ, где уже получено 10^{13} DT-нейтронов в проведенных до сих пор исследованиях (получение DT-плазмы, но без обжатия), такое ограничение отложит полное испытание системы плазмалайнер до тех пор, пока не будет проведен анализ.

Рэй Киддер предложил альтернативный (или, возможно, дополнительный) подход: запрет на использование трития в термоядерных имплозивных системах, не использующих лазеры или пучки частиц¹⁸. Он отметил, что в отсутствие трития дейтериевая плазма будет создавать нейтроны в количествах, достаточных для диагностических целей, но она вряд ли подожжется или сгорит. Поскольку применение трития требует достаточно обременительного оборудования для сведения к минимуму риска облучения радиоактивным газом, исследователи-термоядерщики обычно поначалу работают с дейтерием, откладывая использование трития насколько это возможно. Поэтому промежуточный запрет на тритий может быть принят.

ПРОЦЕСС ОТКРЫТОГО РАССМОТРЕНИЯ

Ядерным державам не следует пытаться интерпретировать (в одностороннем порядке или даже секретно), как ДВЗЯИ ограничивает деятельность такого рода. В конечном итоге это отдало бы интерпретацию ДВЗЯИ в руки военных лабораторий каждой державы, а с учетом их сорокалетней оппозиции ДВЗЯИ такой шаг не вызовет ни национального, ни международного доверия. Любой национальный анализ должен быть открытым настолько, насколько это возможно, но по мере необходимости дополнен анализом независимых экспертов по возможным закрытым приложениям. Есть несколько прецедентов для подобной организации процесса¹⁹.

Надлежащий международный форум, куда вносятся любые предложения по дополнительной разрешенной деятельности, также должен носить открытый характер. Им могла бы стать конференция по проверке соблюдения ДНЯО, как это было сделано для лазерного и пучкового термояда. Если же страна считает, что она нуждается в проведении термоядерных работ с импульсными источниками энергии или с ВВ-имплозией в рамках своей программы сопровождения арсенала, она может сообщить об этом на конференции по проверке соблюдения ДВЗЯИ, как это сделали США, приложившие все усилия во время переговоров по ДВЗЯИ, чтобы прояснить свою позицию в вопросе о разрешении проводить подкритичные эксперименты. Пока спорный вопрос рассматривается на международном форуме и достигается консенсус о статусе таких экспериментов в рамках режима ДВЗЯИ, мы настаиваем, чтобы вовлеченные в подобные исследования страны публично дали согласие на временные ограничения, подобные тем, какие предлагается в данной статье.

ПРИЛОЖЕНИЕ А СИНТЕЗ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ МИШЕНИ

Для выделения термоядерной энергии два легких ядра должны подойти достаточно близко друг к другу, так чтобы появилась разумная вероятность прохождения через взаимный кулоновский барьер. В прошлом экспериментальное изучение управляемого ядерного синтеза было сосредоточено в основном на двух методиках, позволявших добиться такого положения: i) магнитный термояд, где нагревалась DT-плазма, удерживаемая в

сильном магнитном поле; и ii) инерциальный термояд (ИТ), где капсула с DT-смесью сжималась лазерными пучками большой энергии или пучками заряженных частиц. В Ливерморской национальной лаборатории создается т.н. NIF (National Ignition Facility, или национальная установка для зажигания), на которой будут проводиться эксперименты по лазерному ИТ. СЗМ - это третий подход, где в магнитном поле создается удерживаемая стенками DT-плазма, а затем она сжимается.

Пороговые условия для "зажигания" DT-смеси заключаются в том, чтобы температура плазмы достигла, по крайней мере, 4 кэВ и чтобы соблюдался критерий Лаусона: произведение плотности плазмы и времени ее удержания должно быть не менее 10^{14} см³·с.

При стандартном подходе к магнитному термояду на основе "Токомака" плазма находится в тороидальной камере с магнитным полем. Критерий Лаусона будет достигнут при удержании относительно редкой DT-плазмы (10^{14} см³) в течение относительно длительного времени (по крайней мере, одной секунды). Плазма нагревается при помощи таких средств, как микроволновый нагрев или бомбардировка пучком нейтральных атомов.

В лазерном ИТ плазма с гораздо большей конечной плотностью (10^{24} см³), создаваемая путем обжатия капсулы миллиметрового размера, должна реагировать за характерное время расширения (порядка 10^{-10} с), обусловленное инерцией сжатой капсулы и топлива. Считается, что для поджига ИТ необходимо сжать топливо по радиусу в 30 раз. Скорость сжатия также должна быть очень высокой (более 30 см/мкс) для достижения требуемых температур²⁰.

СЗМ часто описывают как нечто среднее между магнитным термоядом (МТ) и ИТ, когда часть их трудностей устраняется, но достижимый энергетический выигрыш ограничивается. СЗМ уступает МТ и ИТ по времени удержания (около одной мкс) и по характерной плотности (10^{20} см⁻³) (Табл.1). В СЗМ-подходе сжимается "теплая" (около 100 эВ) замагниченная плазма. Начальное магнитное поле (порядка 10-100 килотесла) удерживает заряженные частицы в плазме на спиральных орбитах и тем самым подавляет теплоперенос к стенкам камеры. Такое уменьшение тепловых потерь понижает требования на скорость имплозии для адиабатического нагрева примерно до 1 см/мкс. Более высокая стартовая температура в СЗМ также уменьшает требуемую для завершения процесса нагрева степень радиальной сжатия (до 10 раз)²¹. В рамках сотрудничества Лос Аламоса и Арзамаса-16 планируется использовать в качестве механизма обжатия для СЗМ лайнеры, сжимаемые внешним магнитным полем.

На рис.2 показана схема российской конструкции "МАГО"^{22,23} для формирования теплой замагниченной плазменной мишени. Если схема СЗМ осуществится, эта предварительно нагретая плазма будет обжата лайнером, который еще предстоит разработать (этот лайнер заменит толстые внешние стенки камеры).

Плазменная мишень уже создана в камере МАГО и показано, что ее температура достаточна для создания вспышки с 10^{15} нейтронами²⁴. Лайнер еще не сопряжен с плазменной мишенью, но испытания лайнера на обжатие проводились отдельно. Первое испытание на обжатие DT-плазмы намечено на 2000 г., если появятся средства. Ожидается, что магнитно-взрывные генераторы тока обеспечат требуемые импульсы энергии для МАГО-камеры и для обжимающего лайнера^{25,26}.

Магнитно-взрывные генераторы тока

Большая часть американских исследований с использованием импульсных источников энергии основана на конденсаторных батареях с большой накопленной энергией. Недоступные цены больших конденсаторных батарей вынудили советских ученых разработать более совершенные магнитно-взрывные генераторы тока в качестве альтернативного средства для создания импульсных источников с большим энерговыделением. В этих генераторах использован тот факт, что магнитный поток, захваченный проводящей петлей или катушкой, остается

постоянным даже при изменении площади, охватываемой петлей, или числа витков в катушке. Чтобы при таких условиях поддерживать неизменной величину потока, ток в петле или в катушке согласно закону Ампера должен вырасти. Для обжатия токовой петли или удаления витков из катушки, содержащей магнитное поле, используются ВВ, которые индуцируют возрастание тока и магнитного поля.

Таблица 1: Плотности DT-плазмы и времена удержания для магнитного термояда (МТ) на основе "Токомака", синтеза в замагниченной мишени (СЗМ) и инерциального термояда (ИТ). Для того, чтобы выделявшаяся в термоядерном "взрыве" энергия скомпенсировала затраты на начальный нагрев плазмы, произведение конечной плотности плазмы и времени ее удержания должно быть больше величины порядка 10^{14} см³·с или равно ей (критерий Лаусона).

	МТ	СЗМ	ИТ
Начальная плотность, см ⁻³	10^{18}	10^{17}	10^{21}
Плотность после сжатия, см ⁻³	10^{19}	10^{20}	10^{24}
Время удержания, с	1	10^{-6}	10^{-10}

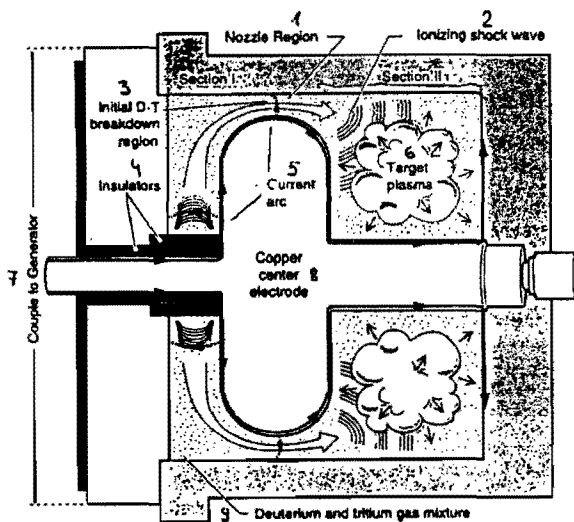


Рисунок 2: Разрез камеры МАГО, служащей для получения плазменной мишени. Токовый импульс величиной около 2 МА проходит через электроды, образуя магнитное поле в камере, заполненной газовой DT-смесью. Затем через электроды посылается еще более сильный импульс тока (6-8 МА), который вызывает электрический пробой в газе, расположенном в первой секции и в районе сопла. Сила Лоренца выталкивает плазму во вторую секцию, где она сталкивается с газом, образуя ударную волну ионизации, которая преобразует газ в плазму. Предложение заключается в том, чтобы обжать плазму лайнером, который будет окружать вторую секцию, в надежде поджечь термоядерную реакцию. Расшифровка подписей: 1) район сопла; 2) ионизационная ударная волна; 3) область начального пробоя в DT-смеси; 4) изоляторы; 5) токовая дуга; 6) плазменная мишень; 7) соединение с генератором; 8) центральный медный электрод; 9) газовая DT-смесь.

На рис.3 показан магнитно-взрывной генератор спирального типа (СМВГ), конструкция которого позволяет получать большие токи. Такие устройства усиливают ток от конденсаторной батареи в несколько сот раз и получают на выходе около 10 МА. Спиральные генераторы, связанные с более сложными "дисковыми магнитно-взрывными генераторами" (ДМВГ), которые были разработаны в России, смогли получать токи в сотни МА.

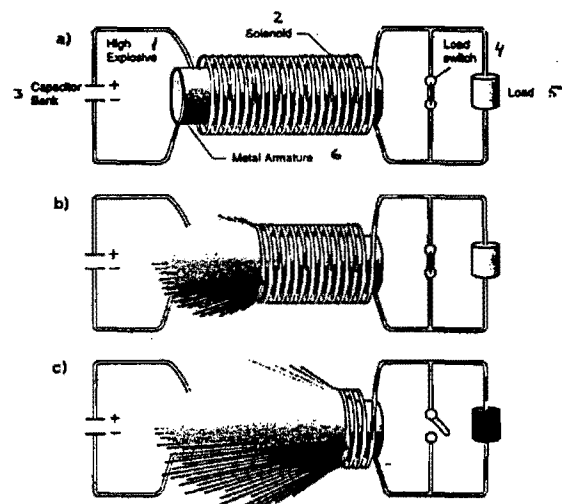


Рисунок 3: Спиральный генератор. (а) Цилиндрическая проводящая арматура, заполненная ВВ, помещается внутри соленоида, образуя вместе с ним замкнутый электрический контур. Через контур пропускается ток, образующий магнитное поле в пространстве между арматурой и соленоидом. Нагрузка вначале зашунтирована. (б) При подрыве ВВ с одного конца арматура расширяется. По мере того, как витки отрываются от катушки из-за короткого замыкания, в оставшихся витках должен индуцироваться все больший ток для сохранения величины потока. (в) Когда достигается пиковое значение тока, открывается ключ, шунтировавший нагрузку. Расшифровка подписей: 1) ВВ; 2) соленоид; 3) конденсаторная батарея; 4) переключатель на нагрузке; 5) нагрузка; 6) металлическая арматура.

Магнитное поле, которое может быть получено большими токами от магнитно-взрывных генераторов, может в свою очередь обжимать металлический цилиндр, или "лайнер", как показано на рис.4. Когда ток от генератора протекает по стенкам лайнера, вне проводящего цилиндра возникает сильное магнитное поле, а поле внутри цилиндра остается равным нулю, что приводит к появлению магнитного давления на стенки цилиндра, направленное по радиусу внутрь к оси цилиндра.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б СЗМ КАК ОРУЖИЕ

Как сейчас планируется, первое совместное испытание плазмы с лайнером в СЗМ будет основываться не на больших конденсаторных батареях, а на магнитно-взрывных генераторах тока. В принципе, такое СЗМ-устройство можно по этой причине сделать портативным, или (на военном языке) "доставляемым". Впрочем, военный потенциал СЗМ зависит от площади, на которой он может вызвать смертельный исход при заданном весе. Мы оценили вес такого устройства с использованием опубликованных описаний магнитных генераторов и камеры "МАГО", а также на основе личных контактов с экспериментаторами в области СЗМ. Эти массы могут, вероятно, быть уменьшены при попытках создания систем оружейного типа.

Основными блоками импульсной системы питания для такого оружия станут спиральные и дисковые магнитно-взрывные генераторы (см. Приложение А). Было показано, что СМВГ-системы, где начальный ток берется от конденсаторных батарей, способны давать токи с пиковым значением порядка 1 МА и с периодом свыше 10 мкс⁷. Это предполагает, что в пределах досягаемости находится система, достаточная для получения тока порядка 2 МА, который необходим для установления начального опорного поля в камере "МАГО". Такой СМВГ мог бы стать источником начального тока для более

крупного СМВГ, способного затем генерировать второй токовый импульс с амплитудой около 6 МА, что требуется для формирования плазмы²⁸. Группа из Лос Аламоса и Арзамаса-16 планирует использовать СМВГ, соединенный с ДМВГ, чтобы получить требуемые 50-100 МДж для СЗМ-лайнера²⁹. СМВГ-система может быть также использована для обеспечения исходного тока при подобном сочетании генераторов. Схематически система показана на рис.5. В табл.3 приведены оценки полной массы и массы ВВ для каждого компонента. Полная масса системы оценивается в три тонны, причем около 10% пойдет на ВВ.

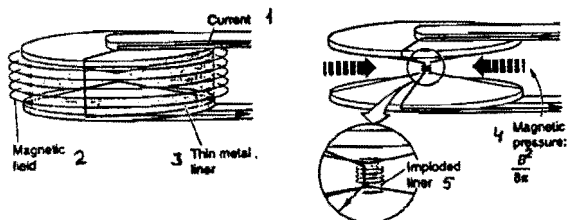


Рисунок 4: Обжатие лайнера. Когда через стенки полого проводящего цилиндра, или "лайнера", пропускается сильный токовый импульс, вне его поверхности возникает большое магнитное поле, а поле внутри цилиндра остается равным нулю. Несбалансированное давление магнитного поля с внешней стороны стенок лайнера вызывает затем направленную к оси цилиндра радиальную силу. Расшифровка подписей: 1) ток; 2) магнитное поле; 3) тонкий металлический лайнер; 4) магнитное давление: $B^2/8\pi$; 5) обжатый лайнер.

Выделение 1-10 ГДж термоядерной энергии будет сопровождаться также образованием примерно $3.5 \cdot 10^{20-21}$ быстрых нейтронов. Это большое число нейтронов создаст смертельную дозу в 4.5 Гр (450 рад) в открытом пространстве на расстояниях порядка 200-500 м³³. Этот радиус уменьшится до 100-300 м при наличии бетонных стен (Рис.1)³⁴. Радиус смертельного поражения ударной волной от такого оружия (определяемый мощностью термоядерного взрыва и мощностью ВВ - всего около тонны тротилового эквивалента) составит 10-20 м в застроенной местности³⁵. Смертельный радиус от 300 кг нервного газа зарина, размещенного в ракете "Скад" весом в тонну, при облачной погоде с умеренным ветром независимо от времени суток составит около 250 м против незащищенного населения³⁶. Эти поражающие способности, выраженные в единицах площади, приведены в Табл.3. Чистое термоядерное оружие в предполагаемом диапазоне мощностей будет поэтому обладать более высокой поражающей способностью в населенных районах по сравнению с обычным оружием и, возможно, обеспечит такое же поражение, что и химическая боеголовка аналогичного веса.

В литературе по СЗМ указывается, что СЗМ может оказаться способным добиться синтеза 3-30 мг DT-топлива в одном выстреле с энерговыделением в диапазоне 1-10 ГДж, что грубо эквивалентно взрыву 0.2-2 тонн ВВ^{30,31}. Полная мощность взрыва, включая 320 кг реальных ВВ, составила бы 0.5-2.5 тонны тротилового эквивалента. трехтонное устройство такой мощности не имело бы преимуществ над обычными ВВ с точки зрения эффекта от ударной волны. В действительности, только 20% энергии пойдет на ударную волну, поскольку 80% будут унесены нейтронами³².

Один из путей для увеличения мощности заключается в том, чтобы окружить устройство естественным ураном. Изотоп уран-238 не принимает участие в цепной реакции и доля его в природном уране составляет 99.3%, но он может делиться быстрыми нейтронами от DT-синтеза. Слой естественного урана толщиной в несколько см мог бы удвоить или утроить мощность взрыва (Рис.6). Даже в этом случае преимущество подобного

устройства с точки зрения критерия "мощность/вес" и эффектов от ударной волны перед обычными ВВ кажется незначительным (см. Табл.3).

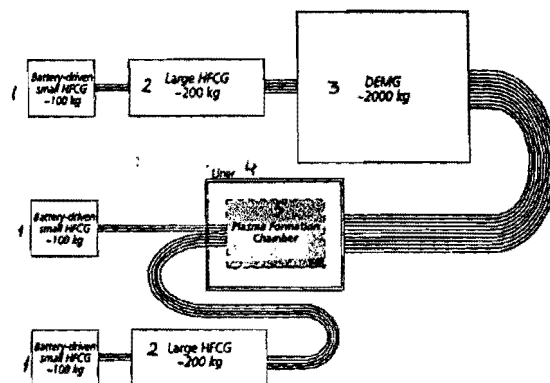


Рисунок 5: Схема (не в масштабе), показывающая компоненты гипотетического СЗМ-устройства, использующего ВВ. Расшифровка подписей: 1) небольшой СМВГ с подпиткой от конденсаторной батареи (вес около 100 кг); 2) крупный СМВГ (вес около 200 кг); 3) МВГД (вес около 2 тонн); 4) лайнер; 5) камера для формирования плазмы.

Военный потенциал окажется выше, если вместо того, чтобы непосредственно нагревать всю плазму, добиться синтеза путем создания локальных "искр", способных нагреть окружающий холодный объем до термоядерных условий - такой подход используется в ИТ-исследованиях. Явно существует некоторая надежда на достижение высокого выигрыша путем использования СЗМ в качестве искры для поджига большей массы топлива³⁷, что сделает возможным получить значительно более высокие мощности взрыва.

ПРИЛОЖЕНИЕ В СЗМ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Сторонники СЗМ убеждают, что если на этом устройстве удастся добиться получения термоядерной энергии в диапазоне 1-10 ГДж, то на основе разработанной технологии можно будет спроектировать реактор, способный производить экономически конкурентноспособную электроэнергию. Эта надежда, как кажется, частично основана, на высокой эффективности и низких капитальных затратах магнетогидродинамических (МГД) генераторов, которые могут эффективно осуществить прямое преобразование кинетической энергии, накопленной в горячей (20 000 К) плазме, в электрическую. Но некоторые остающиеся экономические проблемы ставят под вопрос надежды СЗМ стать коммерческим источником энергии. Первым цитируемым источником в поддержку энергетического потенциала СЗМ является статья Гранта Логана из Ливерморской национальной лаборатории (1993 г.), который предположил, чтобы импульс термоядерной энергии был использован для испарения слоя рабочего вещества до температур, при которых эффективно проходит МГД-конверсия³⁸. Для термоядерных взрывов в диапазоне энергий 1-10 ГДж в качестве рабочего вещества был предложен гидрид лития. Небольшая часть лития конвертируется при захвате нейтронов в тритий, который выделяется и используется в последующих DT-мишенях. Оставшийся литий будет повторно использоваться. Источник электроэнергии для проведения взрывов выбирается в виде установки из конденсаторных батарей без применения взрывных систем.

Если предположить, что чистое энерговыделение за импульс составит 1-10 ГДж, коэффициент преобразования в электроэнергию равен 50%, а стоимость электроэнергии в сети равна 10 центам за кВт-час (это примерно вдвое выше, чем стоимость электроэнергии от современной "качественной" АЭС, и, возможно, равно стоимости

крупномасштабной ядерной энергетики в далеком будущем, когда истощатся запасы дешевого урана), то разрешается потратить на один импульс 14-140 долларов³⁹. Логан подсчитал, что для реактора, производящего импульсы энергии в 1-10 ГДж, затраты на каждую "мишень" не должны превышать 0.5-5 долларов, чтобы реактор оставался экономически выгодным⁴⁰. Трудно поверить, что такие затраты можно сделать столь низкими⁴¹. В них входят переделка камеры, заполняемой DT-плазмой, и окружающего ее лайнера, а также переработка нескольких десятков кг повторно используемого гидрида лития в новое покрытие.

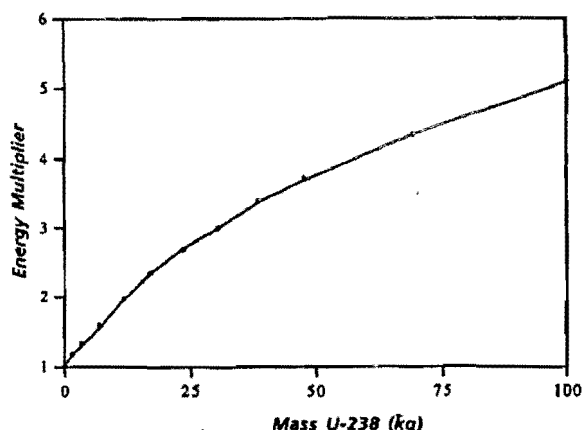


Рисунок 6: Коэффициент усиления мощности термоядерной взрывчатки при окружении ее слоем урана-238. Результаты получены на основе расчетной программы MCNP, Version 4A, Los Alamos National Lab, 1994 (Программа расчета переноса нейтронов и фотонов методом Монте Карло). Термоядерное горючее моделировалось как точечный источник нейтронов с энергией 14 МэВ, находящийся в центростремической оболочке из U-238 с внутренним радиусом 5 см. Плотность урана принята равной 19 г/см³.

Энергетический выигрыш

Как считается, для работы СЗМ достаточно иметь кинетическую энергию лайнера около 65 МДж⁴². Если эффективность преобразования энергии при переходе от конденсаторной батареи к лайнеру равна примерно 25%⁴³, то потребуются конденсаторы с полным запасом энергии 260 МДж (современные батареи могут выдавать десятки МДж). С учетом эффективности преобразования кинетической энергии лайнера в энергию плазмы порядка 40%⁴⁴ полная эффективность использования энергии, запасенной в конденсаторах, снижается до 10%. Поэтому выделение термоядерной энергии в объеме 1-10 ГДж будет соответствовать полному выигрышу в энергии между 4 и 40. Этот выигрыш совместим с верхним пределом, который можно получить в предположении, что плазма должна быть однородно нагрета до температуры 10 кэВ (кинетическая энергия каждого ядра и электрона в плазме составит 15 кэВ) и что все прореагировавшее топливо превратится в гелий и нейтроны, причем для каждой реакции все 18 МэВ будут возвращены в виде электроэнергии. В этом случае максимальный выигрыш энергии определяется соотношением:

$$G = \frac{(\text{термоядерная энергия})}{(\text{энергия плазмы})} \times (\text{эффективность}) = \frac{(18 \text{ МэВ/реакция}) \cdot (0.1)}{(0.015 \text{ МэВ/частица}) \cdot (4 \text{ частица/реакция})} = 30$$

Такой расчет неприменим, если вместо нагрева всей плазмы внешней энергией термояд будет осуществлен путем создания локализованных "искр", способных нагреть окружающую плазму до термоядерных условий. В таком случае можно будет иметь более высокое энерговыделение и, следовательно, более высокий энергетический выигрыш, но одновременно возрастают тревоги по

поводу потенциальных военных приложений.

Таблица 2: Приблизительные массы и потребности в ВВ основных компонентов, требуемых для взрывной СЗМ-системы. Считается, что камера для формирования плазма аналогична камере "МАГО", которая описана в тексте. "Кабели" относятся к электрическим соединениям от одного магнитного генератора к другому, а также к лайнеру и плазменной камере (Рис.5)

Компонент	Масса, кг	Масса ВВ, кг
Образование плазмы		
Малый СМВГ (первый импульс) ^а	110	10
Малый СМВГ (второй импульс)	110	10
Большой СМВГ (второй импульс) ^б	220	20
Плазменная камера	50	-
Кабели ^в	25	-
Имплозия лайнера		
Малый СМВГ	110	10
Большой СМВГ	220	20
ДМВГ	2000	250
Кабели	500	-
Лайнер	5	-
Всего	3400	320

а) см.²⁷

б) Основано на данных, представленных в частном сообщении А.Линдемата из Лос Аламосской национальной лаборатории (15 февраля 1998 г.). Действительная масса требуемого проводника примерно в десять раз превышает минимальное значение, нужное для пропускания токового импульса (см. примечание "в" ниже) из-за необходимости нейтрализовать воздействие магнитных сил на камеру и генераторы. Это требование учитывает, например, более половины всей массы ДМВГ (частное сообщение Б.Рейновски из Лос Аламоса, 15 февраля 1998 г.).

в) Считается, что требуемая длина медных проводов для питания плазменной камеры составит 5 м. Сечение провода определяется из требования, чтобы при среднем токе 10 МА в течение 10 мкс электрический нагрев был в 10 раз меньше порогового значения, когда наступает разрыв провода (см. J.Parker, pp.10-12). Это приводит к сечению 2.5 см и полной массе 12.5 кг. Если удвоить эту величину для учета массы диэлектрика и соединений, то получим 25 кг. Массы лайнера и связанных с ним кабелей определялись таким же образом, но материалом был алюминий. При ожидаемом среднем токе 100 МА в течение 50 мкс те же самые ограничения на электрическую прочность приводят к сечению лайнера 90 см и полному сечению кабелей 55 см. Длина лайнера была принята равной 20 см, а длина кабелей - 5 м. Отсюда следуют приведенные значения для массы лайнера 5 кг и массы кабелей 550 кг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г ТЕРМОЯД В Z-ПИНЧЕ С НАБОРОМ ПРОВОЛОЧЕК

Физики в течение десятилетий пытались использовать z-пинчи для поджига термояда. Линейный z-пинч связан с прохождением большого тока через узкий плазменный столб. Плазма нагревается током и удерживается связанным с током магнитным полем, которые вызывают радиальную силу, направленную вовнутрь и действующую на электроны и ионы плазмы. В принципе, плазма может удерживаться таким образом при высоких значениях плотности и температуры достаточно долго, чтобы вызвать термоядерные реакции, но подобный подход магнитного удержания неизбежно подвержен неустойчивостям, разрушающим пинч, и в результате от него успешно отказываются.

Расширение этой идеи состоит в том, чтобы использовать "быстрый" z-пинч для получения рентгеновских лучей, которые могли бы нагреть "черное тело", содержащее мишень с DD- или DT-смесью, или же непосредственно сжать нить с DD- или DT-смесью. Рентген от z-

пинча генерируется при пропускании большого (около 10 МА) тока через цилиндрическую сетку, составленную из тонких проволочек. Проволочки испаряются и сжимаются к оси, образуя оптически толстую плазму, которая захватывает излучение, возникшее при термализации и торможении⁴⁵. Плазма, излучавшая около 2 МДж рентгеновской энергии с мощностью около 200 тераватт (ТВт), была получена в экспериментах на импульсной установке PBFA-Z в Сандийской национальной лаборатории⁴⁶.

Таблица 3: Сравнение поражающего действия СЗМ-устройств с обычными ВВ и химическим оружием при сравнимых массах. Поражающее действие обусловлено эффектами ударной волны, если нет других указаний.

Оружие	Мощность (в тоннах ВВ)	Площадь поражения (км ²)
ВВ массой 1 т	1	10 ⁻³
СЗМ-устройство (1,5 - 2,5 т) ^а	1	10 ⁻³ (ударная волна) 0,03-0,8 (нейтроны) ^б
Боеголовка с зарином весом 300 кг на "Скаде"	-	0,22
Бомба типа Хиросимы	17000	7 ^в
а) термоядерная мощность (0.2-2.2 т) плюс мощность ВВ (0.3 т). б) доза в 4,5 Гр в) Это площадь круга с центром в проекции точки взрыва, где при однородной плотности населения число выживших внутри равно числу погибших снаружи.		

Хотя считается, что следует иметь температуру излучения черного тела порядка 250 эВ, чтобы подвести содержащуюся в нем замагниченную мишень к состоянию поджига, для начала опытов по диагностике с DD-смесью годятся, как полагают, уже полученные температуры излучения (около 140 эВ). Вычислительные модели предсказывают, что в такой смеси выход нейтронов составит 10¹² при использовании мишени типа "взрывного толкача" - первого типа мишени, запланированного для испытания на установке PBFA-Z позднее в этом году⁴⁷. Ожидается, что в случае использования DT-смеси количество образовавшихся нейтронов возрастет примерно в сто раз.

Очень высокой мощности рентгена можно добиться только тогда, когда ток поступает в нагрузку с большой скоростью (отсюда и название - "быстрый" z-пинч). В эксперименте, где было получено 200 ТВт рентгеновского излучения, конденсаторная батарея с запасенной энергией 11.7 МДж выделяла 3 МДж на нагрузку с мощностью 50 ТВт⁴⁸, что соответствует четырехкратному возрастанию мощности при эффективности конверсии электрической энергии в рентген не выше 15%⁴⁹. Характерное время нарастания тока составляло около ста наносекунд. Напротив, современные наиболее совершенные магнитно-взрывные генераторы выделяют на нагрузку сотни МДж примерно за 100 мкс (около 1 ТВт) и поэтому они кажутся слишком медленными для работы с быстрыми z-пинчами.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Реакторы деления могут быстро стать надкритичными на короткий период. Импульсные реакторы деления как раз спроектированы таким образом. Длительность импульса ограничена отрицательной обратной связью, возникающей при нагревании топлива. Проводились также эксперименты по безопасности, где реактор на тепловых нейтронах с жидким замедлителем переводился в надкритичный режим путем быстрого удаления контрольных стержней, а затем он самовывключался при нагревании или выбросе замедлителя. Как кажется, ни один из этих типов экспериментов не приближается близко к взрыву ядерного оружия и не причинит беспокойства тем, кто

опасается возможной эрозии ДВЗЯИ.

2. Если для такого оружия окажутся существенными значительные количества трития, тогда усилия по контролю могут перейти на тритий, который подобно плутонию изготавливается в реакторах. Обсуждение других причин для установления режима контроля над тритием и некоторых технических проблем приведено в статье М.Калиновского "Международный контроль за тритием для предотвращения горизонтального распространения и благоприятствования ядерному разоружению". Наука и всеобщая безопасность т.5, выпуск 2, ноябрь 1995 г., стр.3-36.
3. Соединенные Штаты выпустили следующее заявление: "Делегацией Швейцарии были подняты некоторые вопросы, связанные с разработкой потенциального источника энергии и его связи с Договором о нераспространении. Как мы понимаем, вопрос относится к исследованию, о котором уже сообщалось, включая ядерные реакции, инициированные в таблечках делящегося и/или термоядерного вещества миллиметрового размера под действием лазеров или быстрых пучков частиц, где планировалось получить очень кратковременное энерговыделение внутри соответствующей камеры, несущее неразрушительный характер. На основе нашего современного понимания этого типа источника энергии, который еще находится на ранней стадии исследования, мы пришли к заключению, что он не представляет собой ядерного взрывного устройства в понимании Договора по нераспространению или субъекта соглашений по гарантиям МАГАТЭ против использования в интересах любого ядерного взрывного устройства." Взято из The National Ignition Facility (NIF) and the Issue of Nonproliferation: Final Study, (United States Department of Energy, Office of Arms Control and Nonproliferation, December 19, 1995), p.35.
4. Германия сделала заявление: "Правительство Германии понимает, что ничто в этом Договоре никогда не должно интерпретироваться или использоваться таким образом, чтобы создать предвзятое мнение или препятствия в связи с исследованиями и разработками управляемого термоядерного синтеза и его экономическим использованием". [UN Official Records, XXV.4: 1996 CTBT, p.911.]
5. "Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty", Senate Treaty Doc.105-28, (U.S. Government Printing Office, Washington, 1997), p.4.
6. Younger, S. et al., "Lab-to-Lab: Scientific Collaborations Between Los Alamos and Arzamas-16 Using Explosive-Driven Flux Compression Generators", Los Alamos Science: Russian-American Collaboration to Reduce the Nuclear Danger, (Los Alamos National Laboratory, 1996), pp.49-71.
7. Энергия и нейтроны возникают в реакции синтеза: $D+T \rightarrow He-4 + \text{нейтроны} + 17.6 \text{ МэВ}$.
8. Смотрите, например, Nash, T.J. et al., "Dynamic Hohraum Experiments on SATURN", Dense Z-Pinches: Fourth International Conference, N.R.Pereira, et al., eds., (American Institute of Physics, 1997), pp.175-182.
9. Sakharov, A., Memoirs (New York: Alfred A.Knopf, 1990), pp.149-155; "Magnetic Cumulation" by A.I.Pavlovski in Sakharov Remembered, Sidney Drell and Sergei Kapitsa, eds., (New York: American Institute of Physics, 1991), pp.185-202.
10. А.Н.Анисимов и др., "О современном состоянии и будущем газодинамического инерциального термояда", Третьи научные чтения памяти Забабахина, Институт технической физики, Челябинск-70, 14-17 января 1992 г.
11. $(10)(18 \text{ МэВ})(1.6 \times 10^{10} \text{ Дж/МэВ}) / (4.6 \times 10^{10} \text{ Дж/г}) = 0.06 \text{ г трития}$.
12. $(10)(14 \text{ МэВ})(1.6 \times 10^{10} \text{ Дж/МэВ}) / [4\pi(1 \text{ м})^2(90 \text{ кг/м}^3)] = 0.2 \text{ Гр}$. Длина свободного пробега нейтронов в воде равна 90 кг/м³.
13. Broad, W.J., "Fusion research prompts fears of future bombs", New York Times, (May 27, 1997); and Colin Macilwain, "Research 'could still result in nuclear arms', warn experts," Nature, Vol.387, (May 29, 1997).
14. "Magnetized Target Fusion Experiments at LANL", <http://wsx.lanl.gov/mtf.html>, (January 8, 1998).
15. В начале 70-х гг. Лос Аламос предложил разработку энергоустановок (проект "Иноходец"), в которых в

- среднем каждый день взрывался термоядерный заряд мощностью 50 кт, помещенный в подземную полость. При этом генерировался пар со средней мощностью, приблизительно равной мощности стандартного энергетического ядерного реактора на 1 ГВт $[(50 \text{ кт/день}) \times (4.2 \times 10^6 \text{ Дж/кт})] / (8.6 \times 10^4 \text{ с/день}) = 2 \times 10^6 \text{ Вт}$. Анализ Агентства по разоружению и контролю над вооружениями показал, что даже если сэкономить на размерах, присущих использованию такой мощной взрывчатки, то проект все же останется невыгодным. См. F.A.Long, L.E.Elkins, R.L.Garwin, T.Greenwood, C.Hocott, H.Jacoby, C.W.Johnson and R.Morse, *An Analysis of the Economic Possibility, Technical Significance, and Time Scale for Application of Peaceful Nuclear Explosions in the U.S., with Special Reference to the GURC Report Thereon* (April, 1975)].
16. Цитировано в статье W.J.Broad [13].
 17. Garwin, R.L., "Monitoring and Verification of a CTBT", Talking paper for a meeting between members of the Committee on International Security and Arms Control of the National Academy of Sciences and Chinese counterparts, Beijing (February 7-8, 1996).
 18. Kidder, R., частное сообщение (февраль 1998 г.).
 19. Например, доклады Джейсоновской группы о необходимости гидроядерных испытаний (Nuclear Testing, JSR-95-320, Mitre Corp., August 3, 1995) и организации подкритических опытов (Sub-critical Experiments, JSR-97-300, March 1997); а также анализ проработок министерства энергетики, The National Ignition facility and the Issue of Nonproliferation, (December 1995).
 20. Hanprim, J.D.Lindl et al., "Progress Toward Ignition and Burn Propagation in Inertial Confinement Fusion", *Physics Today*, (September, 1992), and T.H.Johnson, "Inertial Confinement Fusion: Review and Perspective", *Proceedings of the IEEE*, Vol.72, no.5, (May, 1984).
 21. Lindemuth, I.R., "The Role of Z-pinch and Related Configurations in Magnetized Target Fusion", Los Alamos National Laboratory, LA-UR-97-2723, pp.2-3.
 22. Butko, A.M. et al., "Possibility of low-dense magnetized DT plasma ignition threshold achievement in a MAGO system", *Laser and Particle Beams*, Vol.15, no.1, pp.127-132, (1997). "MAGO" - это сокращение русского термина МАГнитное Обжатие.
 23. Lindemuth, I.R. et al., "Target Plasma Formation for Magnetic Compression/ Magnetized Target Fusion", *Physical Review Letters*, Vol.75, no.10, (September, 1995).
 24. См. [6], p.63.
 25. См. [21], pp.4-5.
 26. Lindemuth, I.R., et al., "MAGO/MTF: A Marriage of Inertial and Magnetic Confinement", Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-3939, (November 4, 1996), p.6.
 27. Vorthman, J.E. et al., "Battery-Powered Flux Compression Generator System", *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems*, V.M.Titov and G.A.Shvetsov, eds., (New York: Nova Science Publishing, 1990). Устройство весило 50 кг и имело 2 кг ВВ.
 28. См. [6], p.63.
 29. Ibid., pp.56-57,64.
 30. $(18 \text{ МэВ/реакция}) \times (1.6 \times 10^6 \text{ Дж/МэВ}) \times (6 \times 10^4 \text{ ядер/моль}) / [(2 \text{ ядро/реакция}) (2.5 \text{ г/моль})] = 3 \times 10^6 \text{ Дж/г}$.
 31. Schoenberg, K.F., et al., "Magnetized Target Fusion: A Low-Cost Development Path to Fusion Energy", *Field Work Proposal for DOE Programs* (prepared May9, 1997), p.27.
 32. Реакция синтеза имеет вид: $D + T = n + He-4$; масса ядра гелия примерно равна массе четырех нейтронов.
 33. Мы предположили, что доза в 4.5 Гр является смертельной, имея в виду, что она убьет примерно половину населения за 60 дней (LD₅₀). Оружие, которое создает дозу 4.5 Гр для большого числа людей, может представлять интерес для террористов, но эта доза слишком мала, чтобы оказаться полезной на поле боя, так как требуется более 50 Гр для того, чтобы вызвать смерть в течение нескольких часов или дней. Samuel Glasstone and Philip J.Dolan, eds., *The Effect of Nuclear Weapons*, 3rd edition (U.S. Departments of Defense and Energy, 1977), p.585.
 34. Нейтронные дозы рассчитаны при помощи программы MCNP, "A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", Version 4A, Los Alamos National Laboratory, (1994). Для расчета в свободной среде земля моделируется слоем бетона толщиной 10 см. В случае наличия бетонных зданий моделирование происходит путем помещения источника нейтронов с энергией 14 МэВ на 2 м над бетонной "землей" и в 3 м от последовательности бетонных стен (на расстоянии 6 м одна от другой) толщиной 7 см, расположенных перпендикулярно полу. Для удобства расчета "стены" выбраны в виде полудисков десятиметрового радиуса. Далее доза вычислялась в пространстве между стенами на разных расстояниях от источника.
 35. Более высокие значения радиусов основаны на повреждениях от нападения Фау-2 (0.9 т ВВ на боеголовку) на Лондон во время второй мировой войны (средний радиус смертельного поражения равен 21 м). Меньшие значения радиусов основаны на поражениях при нападении ракет "Скад" на Тель Авив в январе 1991 г., где современные жилые здания сделаны из армированных бетонных деталей. [Steve Fetter, George N.Lewis and Lisbeth Gronlund, "Why were Scad casualties so low?", *Nature*, Vol.361, (January 21, 1993), p.293.]
 36. *Proliferation of Weapons of Mass Destruction*, (U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1993), p.53.
 37. Siemon, R., Los Alamos National Laboratory, "Magnetized Target Fusion", <http://aries.ucsd.edu/SCICOM/AC-PANEL/REC-DOCS/W-PAPERS/mag-target.html> (June 3, 1996).
 38. Logan, B.G., "Inertial fusion reactors using Compact Fusion Advanced Rankine (CFARII) MHD conversion", *Fusion Engineering and Design*, Vol.22, (1993), pp.151-192.
 39. $(10-10 \text{ Дж}) (0.5) (0.1 \text{ долл./кВтч}) / (3.6 \times 10^6 \text{ Дж/кВтч}) = 14-140 \text{ долларов}$.
 40. См. [38], p.169.
 41. Сторонники СЗМ знают эту проблему и называют ее "копеечной": "Достаточно большие импульсы энергии после преобразования в электричество и продаже по цене 5 центов за кВтч дают небольшой доход. Его можно удобнее измерять в копейках, а чтобы получить доллар требуется очень много копеек." См. [31], стр.27.
 42. См. [6], p.64.
 43. Такие эффективности были получены небольшими лайнерами, запитываемыми от конденсаторов. Такие же эффективности должны оказаться возможными и для лайнеров большего размера. См. J.Parker, "A Primer on Liner Implosions with Particular Application to the Pegasus II Capacitor Bank", Los Alamos National Laboratory, ATHENA Technical Report no.1, (November, 1993), Ch.9; and [26], p.9, Table 1. (Замечание: энергия конденсаторной батареи Atlas составит 36 МДж).
 44. Эта эффективность была получена при проектных значениях энергии плазмы и кинетической энергии лайнера, см. [31], Table 1, p.7.
 45. Deeney, C. et al., "Power enhancement by increasing the initial array radius and wire number of tungsten Z pinches", *Physical Review E*, Vol.56, no.5, (1997).
 46. Spielman, R.B. et al., "PFBA Z: A 60 TW/MJ Z-Pinch Driver", *Dense Z-Pinches: Fourth International Conference*, N.R.Pereira et al., eds., American Institute of Physics, (1997), pp. 101-118. Установка PFBA Z недавно переименована в "Z Accelerator".
 47. Эти вычисления были выполнены Джорджем Алшумом из Сандии (частное сообщение Дж.Квинтенца из Сандийской национальной лаборатории, 30 января 1998 г.).
 48. См. [46].
 49. Частное сообщение Дж. Квинтенца, 27 февраля 1998 г.