



Технический

Международная сеть инженеров и ученых
против распространения (INESAP)

отчет

ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Физические принципы
термоядерных зарядов,
инерционного термоядерного синтеза
и поиск ядерного оружия
четвертого поколения*

Андре Гспонер Жан Пьер Юрни

Независимый Научно-Исследовательский Институт (ISRI)

п/я 30 1211, Женева 12, Швейцария

Official Russian translation of INESAP Technical Report No. 1 on *fourth generation nuclear weapons*

This document is a copy of the *official* Russian translation of the first edition of INESAP Technical Report No. 1 on *fourth generation nuclear weapons* that was distributed at the 1997 INESAP Conference, Shanghai, China, September 8–10, 1997.

This translation was made in 1998 by the Russian Foreign ministry, and was approved for public release in March 1999.

This translation is not just a recognition of the value of the efforts made at ISRI and INESAP in order to raise the technical understanding on the very serious concern represented by the development of new types of nuclear weapons, but also a signal that the Russian Foreign ministry wants its own concern on the subject to be known.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Данный отчет является оценкой перспектив разработки нового ядерного оружия (то есть *четвертого поколения*) в контексте недавно обговоренного Договора о всестороннем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) и текущего моратория на ядерные испытания, действующего во всех странах-обладательницах ядерного оружия.

Первая глава содержит “букварь” по термоядерному оружию, основанный на научном понимании физических принципов существующего ядерного оружия, и на результатах ISRINEX - простой программы моделирования термоядерного взрыва, специально разработанной для независимых экспертов по разоружению. Используя это понимание, показано, что создание водородных бомб на деле является гораздо более простым делом, чем это обычно считается. Используя современные ядерные и компьютерные технологии, почти любая современная промышленная страна могла бы, в принципе, построить подобное оружие. Аналогичным образом, показано, что “усиление”, т.е. метод использования малых количеств трития для повышения показателей ядерной бомбы, также гораздо проще, чем это обычно считалось. В частности, используя этот метод, становится очевидным как сделать высокоэффективное и надежное ядерное оружие используя реакторный плутоний.

Во второй главе, посвященной военным применениям лазерного термоядерного синтеза (ЛТС-ICF) и других технологий на импульсной энергии, демонстрируется, что возможности современных методик лабораторного моделирования во многом совпадают с возможностями, достигаемыми при подземных ядерных взрывах. Более того, показано, что эти технологии позволяют изучать физические процессы, особенно методы кумуляции электромагнитной энергии и передовые ядерные процессы, не попадающие под ограничения существующих договоров по контролю вооружений, полезные для усовершенствования существующих ядерных боеприпасов и разработке ядерного оружия четвертого поколения.

Третья глава начинается с технического анализа ядерных испытаний, разрешенных в ДВЗЯИ: микровзрывы и подкритические эксперименты. Показано, что этот договор запрещает только ядерные взрывы, в которых происходит расходящаяся цепная реакция делений. Следовательно, возможно разработать новые типы взрывных устройств на делении, в которых подкритическое деление-горение является механизмом генерирования выхода-мощности. Аналогичным образом, новые типы взрывных устройств на принципе синтеза, в которых инициирующая часть (триггер) не основан на механизме деления, по ДВЗЯИ не запрещены. Эти новые взрывные устройства на делении или синтезе могут иметь мощность в диапазоне от 1 до 100 тонн тротилового эквивалента, то есть, попасть в промежуток, который сегодня отделяет обычные боеприпасы от ядерных. Эти относительно маломощные ядерные взрывные устройства по квалификации не попадают в категорию оружия *массового* поражения. Детально исследуются шесть физических процессов, пригодных для создания таких маломощных ядерных боеприпасов или для создания компактных “неделящихся” триггеров для больших термоядерных взрывов: подкритическое деление-горение, магнитное сжатие, сверхтяжелые элементы, ядерные изомеры и металлический водород.

Заключение подчеркивает, что во всех пяти странах-обладательницах ядерного оружия (а также и в нескольких других промышленно-развитых странах вроде Германии и Японии) идут в значительном объеме исследования ЛТС и многих физических процессов, которые создают научную базу, необходимую для разработки ядерного оружия четвертого поколения.

За прошедшие несколько лет был сделан значительный прогресс во всех этих процессах, а создание больших установок для ЛТС-микровзрывов в странах, имеющих ядерное оружие и нет, дает новое дыхание гонке вооружений. Мир рискует тем, что определенные страны оснастят себя сразу ядерным оружием четвертого поколения, минуя приобретение ядерного оружия предыдущих поколений.

Основная проблема контроля вооружений в случае ядерного оружия четвертого поколения заключается в том, что их разработка очень тесно связана с чисто научными исследованиями. Главная цель ДВЗЯИ - заморозить технология ядерного оружия в качестве первого шага к общему и полному ядерному разоружению. Для того, чтобы достигнуть это, необходимо ввести в действие превентивные меры контроля вооружений, такие как международно-обязующие ограничения во всех относящихся областях исследований и разработок, будь их проведение заявлено в военных или гражданских целях.

Благодарности

Работа, представленная здесь, была бы невозможной без финансовой и моральной поддержки Fondation Charles Leopold Mayer pour le progres de l'Homme (FPH). Особенно мы хотим поблагодарить Пьера Кэламэ и Мориса Косанди, а также других членов Совета и руководство FPH, за их непрекращавшуюся поддержку и ободрение.

За те два года, в ходе которых был собран и изучен материал, составляющий основу этого отчета, мы получили помощь от разговоров и переписки с множеством людей. В частности, нам хотелось бы поблагодарить следующих людей за их вклад, значимый для нас в каждом случае:

Фрэнк Барнаби, Томас Кохран, Том Замора Коллина, Фримэн Дайсон, Сюрэн Эркман, Ричард Гарвин, Фрэнк фон Хиппель, П.К. Йенгар, Мартин Калиновски, Стефан Клемент, Кристофер Пэйн, Наим Тахир, Тед Тэйлор, Уанг Ксиан Пенг, и Билл Вестермейер.

Введение

Есть много хороших причин для обладания независимыми знаниями по ядерному оружию. Основная причина, однако, лежит в том, что его физические принципы не составляют никакой научной тайны: государство или организация, желающие сделать ядерное оружие, могут с легкостью найти необходимую базовую информацию в открытой литературе. Таким образом, для проектирования ядерного оружия становится достаточным доступ к современным компьютерам умеренной производительности. Аналогичным образом, та же информация доступна для людей, выступающих против ядерного оружия и желающих повысить качество своих доводов.

С другой стороны, производство термоядерного оружия вместе со специальными материалами из которых изготавливаются боеприпасы, всегда было (и остается) огромной инженерной проблемой, особенно для стран, менее развитых технологически. По этой причине, до тех пор пока независимые знания концентрируются на научных принципах, а не на инженерных деталях, риск содействия горизонтальному распространению¹ остается мал. Мы считаем, что нет убедительных причин, почему такое знание должно оставаться привилегией правительственных экспертов, работающих под завесой секретности.

Основное противораспространительное влияние независимого знания о ядерном оружии в потенциале относится к вертикальному распространению. Хорошее понимание физики ядерного оружия является важным для оценки будущей эволюции ядерно-оружейной технологии, особенно в контексте международных соглашений вроде Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний ДВЗЯИ (Comprehensive Test Ban Treaty - СТБТ) и Договора о нераспространении ядерного оружия ДНЯО (Nuclear Non-proliferation Treaty-NPT), которые, как предполагается, должны остановить разработку нового ядерного оружия.

В частности, такое понимание является ключевым для оценки связи между современными методами моделирования² и ядерным оружием, и для анализа концепций *ядерного оружия четвертого поколения*. Эти темы рассматриваются во второй и третьей главах.

За заключительной главой данного труда идет библиография, содержащая около 350 ссылок. Эта библиография не является всеобъемлющей. Она содержит только те ссылки, которые изучили мы и которые цитировали в этом отчете. Они (в них входит несколько обзорных статей) были выбраны в свете научной, технической, стратегической и исторической важности, а также из-за их применимости как учебного пособия для получения более глубокого понимания вопросов темы. Чтобы помочь тем, кто интересуется отдельной предметной областью, ссылки были собраны тематически и приведены в хронологическом порядке.

Наконец, вопрос “а почему же ядерное оружие четвертого поколения?”, напрямую не рассматривается в этом отчете. По сути, попытка ответить на этот самый важный вопрос потребовала бы принятия во внимание многих стратегических, экономических и политических ас-

¹ Термин “распространение ядерного оружия” включает (i) рост количества и качества такого оружия в пяти странах-обладателях ядерного оружия (а именно, Китае, Франции, Великобритании, США и России); и (ii) распространение ядерного оружия в другие страны. В то время как первое известно как *вертикальное* распространение, последнее называется *горизонтальным* распространением.

² Таких как ЛТС эксперименты с энергией на уровне мегаджоулей, технологией импульсной энергии, подкритическими испытаниями, суперкомпьютерами, и т.д.

пектов, выходящих за рамки этого технического отчета. Тем не менее, мы надеемся, что данный труд внесет положительный вклад в скурпулезное обсуждение ядерного оружия четвертого поколения, и что он создаст крепкую научную основу этих продолжающихся дебатов.

Единицы размерности и множители

Всюду в отчете используется международная система единиц (МКСА).

Однако, в случае плазм, используются удобные в практике единицы измерения - для температуры (электрон-Вольты вместо Кельвинов) и давления (Мегабары вместо Паскалей).

В случае энергий, электрон-Вольты иногда используются вместо Джоулей. И в случае взрывов, мощности выражаются в килограммах или килотоннах тротилового эквивалента (чтобы избежать путаницы, в то время как вес записывается как *kg* или *kt*, мощности взрыва пишутся как *kg* или *kt*). Иногда мы используем калории, например, когда они появляются в названии ссылки или в цитате.

Применяются следующие определения и переводные множители:

$$1 \text{ eV} = 11604 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Mbar} = 100 \text{ GPa}$$

$$1 \text{ kg} \equiv 10^6 \text{ cal}$$

$$1 \text{ kg} = 4.184 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kg} = 2.61 \times 10^{19} \text{ MeV}$$

$$1 \text{ kt} \equiv 10^{12} \text{ cal}$$

$$1 \text{ kt} = 4.184 \times 10^6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kt} = 2.61 \times 10^{25} \text{ MeV}$$

Глава 1

Физические принципы термоядерных взрывных устройств

1.1 Вступление

Данная глава является независимым введением в физические принципы современного термоядерного оружия: водородных бомб и зарядов на делении с усилением¹. Это введение подразумевает некое базовое понимание ядерной физики и основывается на результатах ISRINEX², программы моделирования термоядерного взрыва, исполняемой на персональном компьютере IBM PC [27].

В своей сегодняшней форме ISRINEX не моделирует сложные гидродинамические явления, происходящие в фазах сжатия и расширения, идущих до и после воспламенения и горения термоядерного топлива. Поэтому, мощности ISRINEX ограничены изучением инициирования и горения однородных термоядерных плазм в условиях идеального удержания. Тем не менее, эти мощности достаточны чтобы определить приблизительные значения температур, плотностей, длительности и т.д., которые типичны для рабочих условий оружия на делении с усилением и двухступенчатых зарядов на синтезе. Используя эти результаты, будут сделаны выводы о (i) разработке новых типов боеприпасов в официально признанных странах-обладательницах ядерного оружия, и (ii) о последствиях передовых ядерных работ в странах, не объявленных обладательницами оружия, для развития современных термоядерных зарядов.

1.2 Физика ISRINEX 2.6

Версия 2.6 программы ISRINEX была создана для изучения фаз инициирования и горения термоядерных плазм, в том виде как они присутствуют в центре ядерных боезарядов на делении с усилением синтезом. В этой связи, первое упрощение предполагает, что термоядерная плазма является равномерной и почти покоится. Это подразумевает, что все гидродинамические явления не учитываются: предполагается, что удержание плазмы идеально внутри фиксированных границ и ISRINEX рассчитывает развитие во времени многочисленных ядерных и электродинамических реакций, происходящих во время инициирования и горения. Такой подход возможен, потому что в ядерных боезарядах термоядерные реакции происходят при условиях инерциального удержания, то есть, способом при котором длительность термоядерного горения коротка по сравнению со временем, требуемым, чтобы привести в движение материалы за счет давления, генерируемого во время взрыва.

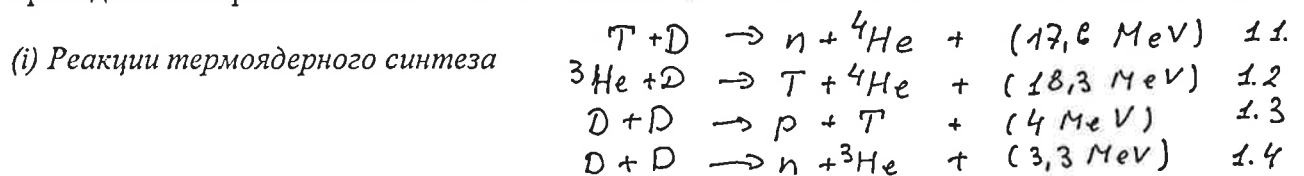
Используя ISRINEX, возможно определить начальное и конечное состояние термоядерной плазмы, то есть, ее плотность, температуру, давление и состав при начале инициирования и в конце горения. Эти данные затем могут использоваться как входные параметры других расчетов, проведенных аналитически или численно. В частности, они позволяют конкретизиро-

¹ За введением в оружие на делении, то есть "атомные бомбы", обращайтесь к [31, 32, 34].

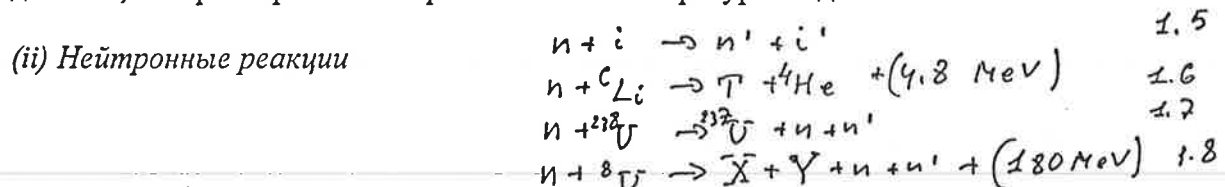
² Краткое описание этой программы и ее основных результатов было представлено на конференции INESAP 1996 года, Гетенбург, Швеция, 30 мая - 2 июня, 1996 [26].

вать требования, которым первичная система³ должна отвечать чтобы привести плазму синтеза в ее первоначальное состояние и определить, как поддерживать как можно дольше условия, подходящие для термоядерного горения.

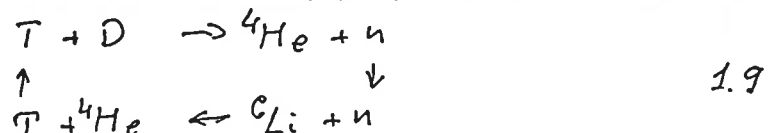
Для достижения надежных результатов были предприняты значительные усилия по разработке всеохватывающей модели, включающей все имеющие отношение физические явления. Упор был сделан на описании различных явлений и их взаимовлияния с равномерной степенью точности чтобы получить целостное моделирование их синергии (взаимозффектов). Поэтому, помимо фундаментальных явлений: термоядерных реакций, нейтронного взаимодействия и обычной физики плазмы (хорошо известных из несекретных исследований по астрофизике, ядерной физики и управляемой термоядерной энергии), были также включены более трудные явления лучистого переноса высоких плотностей энергий. Это было сделано путем изучения научных публикаций по лучистому переносу в контексте астрофизики и синтеза с инерциальным удержанием. Элементарные реакции, включенные в ISRNEX 2.6, принадлежат к трем классам.



Это четыре реакции между тремя основными топливами для синтеза (дейтерием: D , тритием: T , и гелием-3: ${}^3\text{He}$) Они порождают энергию, дополнительное топливо для синтеза (T , ${}^3\text{He}$), нейтроны и инертные продукты (гелий-4: ${}^4\text{He}$, протоны: p) которые далее в реакцию не вступают. Как хорошо известно, достижение условий для термоядерного горения требует создания огромных температур (порядка 1 keV , то есть 10^7 градусов) одновременно с огромными давлениями (порядка 100 TPa , то есть 10^9 атмосфер). Это разительно отличается от реакций деления, которые протекают при обычных температурах и давлении.



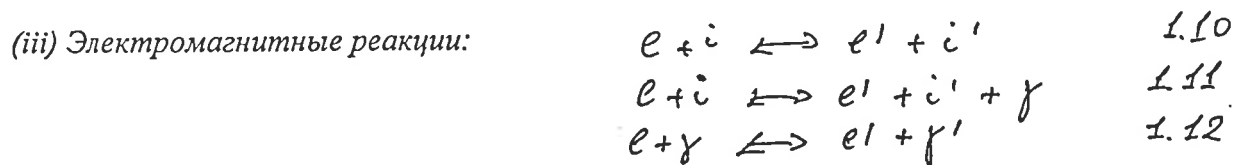
Реакция (1.5) показывает, что в сильносжатых плазмах, встречающихся в в термоядерном оружии, нейтроны, порожденные реакцией синтеза, взаимодействуют с ионами плазмы. В реакции (1.6) из лития-6 производится тритий. Это ключевая реакция, позволяющая водородным бомбам большой мощности производить тритий *in situ* (лат.-на месте) и таким образом "сжигать" встречающиеся в природе элементы D и Li . В подобных зарядах термоядерное топливо первоначально состоит из дейтерида лития LiD - твердого вещества плотностью 0.8 г/см^3 при стандартных температуре и давлении. При условии достаточной температуры и сжатия, реакции (1.5) и (1.6) превращаются в замкнутую реакцию, называемую *циклом Джеттера* [45]:



Относительная важность этой парной реакции растет по экспоненте в ходе термоядерного горения из-за нейтронов, порождаемых в реакции (1.4). Однако, чтобы цикл Джеттера пошел

³ В современных термоядерных зарядах энергия от устройства на делении (триггер - первая ступень или *primary*) используется для сжатия и инициирования физически отделенной детали (основного взрывного заряда - вторая ступень или *secondary*), содержащей термоядерное топливо.

с большой скоростью требуется размножитель нейтронов (вроде уранового blankets-оболочки, окружающего плазму синтеза) в котором производятся дополнительные нейтроны (n , $2n$) реакцией и реакциями быстрого деления (1.7) и (1.8).



Корректное описание взаимодействия между электронами (e) и фотонами (γ) особенно важно для физики ядерного оружия. Это так, потому что во время термоядерного горения большая часть энергии, выделяемой энергией синтеза сперва передается от ионов к электронам через упругое ион-электронное рассеяние, реакция (1.10), и затем от электронов в электромагнитное поле через процесс тормозного излучения - Bremsstrahlung, реакция (1.11). В результате, в ходе термоядерного горения все больше и больше энергии накапливается в форме электромагнитного излучения, то есть фотонов⁴. По мере роста числа фотонов, они начинают взаимодействовать с электронами через процесс обратного тормозного излучения, реакция (1.11), а также через комптоновскую и обратную комптоновскую⁵ реакцию (1.12). Открытие в 1949-1950 годах в Лос Аламосе критического значения электрон-фотонных реакций в термоядерном горении и, в частности, обратных комптоновских процессов почти положило конец исследованиям водородной бомбы. Причина этого в том, что хотя термоядерная плазма по сути прозрачна для электромагнитного излучения при малой плотности, она становится все более и более непрозрачной для фотонов при росте плотности. Вместо выхода из системы, фотоны оказываются заперты и накапливаются внутри поля. В дополнение, в боеприпасе термоядерное топливо окружено тяжелым материалом, действующим одновременно и как размножитель нейтронов и как оболочка для термоядерного взрыва. Так как этот тяжелый материал тоже непрозрачен для электромагнитного излучения, большинство фотонов, вылетающих из горячей плазмы, отражаются назад в нее. При таких условиях термоядерная плазма может быть описана как трех-компонентная жидкость, состоящая из ионов, электронов и фотонов. Плотность энергии тогда равняется сумме трех членов:

$$\underline{E} = \frac{3}{2} N_i k T_i + \frac{3}{2} N_e k T_e + \frac{4\sigma}{c} T_r^4 \quad 1.13$$

N_e и N_i - электронные и ионные численные плотности, k и σ - константы Больцмана и Стефана, T_e , T_i , T_r - электронная, ионная температуры и температура излучения. В этом выражении последний член зависит от четвертой степени температуры. Следовательно, при росте температуры излучения, в плотности энергии все больше начинает доминировать четвертый член. Так как уровни комптоновской и обратной комптоновской реакций тоже возрастают с четвертой степенью T_r , то обмен энергией между фотонами и электронами идет все быстрее и быстрее, а также между электронами и ионами из-за ион-электронных столкновений. Поэтому, когда начинает доминировать член излучения, плазма стремится к *термоядерному равновесию*, в случае которого:

$$T_i \approx T_e \approx T_r = \left(\frac{c}{4\sigma} E \right)^{1/4} \quad 1.14$$

⁴ Это также верно в конечной стадии взрыва, вызванного делением, незадолго перед развалом системы. В этой стадии тоже применяется выражение (1.13).

⁵ В комптоновском процессе фотон отдает часть своей энергии электрону, а в обратном комптоновском процессе уже электрон отдает часть своей энергии фотону. В высокоплотной электрон-фотонной плазме эти процессы являются доминирующими механизмами обмена энергией. Первое несекретное обсуждение роли комптоновских эффектов в установлении теплового равновесия между фотонами и электронами было опубликовано в 1956 году, то есть в [40].

В этом режиме подъем ионной температуры (которая определяет скорость реакции синтеза) сильно ограничен влиянием излучения, которое диктует электронную температуру⁶. Это камень преткновения для проектов задействующих термоядерные реакции - Теллеровский “Супер” и производство энергии через синтез [31, стр.40]. Эти процессы требуют чрезвычайно высокой температуры, но, как показывает уравнение (1.14), удвоение температуры требует шестнадцатикратного повышения плотности энергии.

В ISRINEX реакции (1.1-1.6, 1.10-1.12) и уравнение (1.13) моделируются восемью связанными одновременными дифференциальными уравнениями. Три из них соответствуют плотностям энергии из которых рассчитываются соответствующие ионные, электронные температуры и температура излучения. Другие пять уравнений отслеживают состав плазмы, то есть численные плотности D , T , ${}^3\text{He}$, Li и общую численную плотность заряженных продуктов синтеза. Связь между дифференциальными уравнениями определяется многочисленными факторами, такими как электрон-ионные и электрон-фотонные столкновения при синтезе, выделением продуктов слияния и нейтронной энергии, и т.д.⁷

Влияние электромагнитного излучения (т.е. тормозное излучение и комптоновские процессы, и обратные к ним) описаны согласно модели Гурвица, использовавшейся Фрэли и соавторами [80], включая упрощенную подгонку, предоставленную Киркпатриком [86]. Расчеты, опубликованные в [80], представляют моделирование сильноосжатых мишеней в синтезе с инерциальным удержанием, которые воплощают в себя значимые аспекты физики радиационного переноса. Это моделирование было очень полезным при отладке ISRINEX и проверки, что результаты программы соответствуют результатам, полученным на более изощренных моделях и программах.

Гидродинамические эффекты в общем виде и термодинамические эффекты второго порядка, как электронная теплопроводность, в ISRINEX на этом этапе не включены. Чтобы гарантировать, что код не используется вне рамок применимости, ISRINEX оценивает поправки, компенсирующие влияние этих эффектов. Однако, со времени публикации результатов моделирования, на которых базируется эта глава [27], была проведена проверка результатов ISRINEX на современной версии MEDUSA, одного из самых лучших несекретных кодов моделирования ЛТС, доступных на сегодняшний день. Используя этот код, было найдено, что результаты ISRINEX, например, развитие во времени температуры плазмы, при отключении всех гидродинамических эффектов были в разумном согласии с результатами MEDUSA.

Наконец, важной информацией на входе для ISRINEX являются граничные условия, определяющие взаимодействие термоядерной плазмы с окружающей средой. Наиболее важные из них - “размер плазмы”, который используется для расчета скоростей потерь нейтронов и из-

⁶ В обычном “тепловом равновесии” где плотность лучистой энергии мала, возникает противоположная ситуация: уже температура материи диктует температуру излучения.

⁷ Интересующиеся читатели могут найти имеющие отношение к делу подробности и ссылки на источники алгоритмов в листинге ISRINEX. Смотри страницу в Интернет: <http://www.isri.ch>

За введением в соответствующие физические основы смотри, например [88]. О двух недавних обзорах прогресса в ЛТС, смотри [101, 105].

Возможно, наиболее всесторонний обзор (теория, эксперименты, диагностика, моделирование, и т.п.) ЛТС находится в книге из трех частей, пяти томов (всего 3096 страниц), опубликованной Комиссариатом по атомной энергии Франции (CEA) в 1993 году [94].

лучения, и “фактор снижения потерь”, который позволяет принять во внимание влияние окружающего материала на потери электромагнитного излучения. Другие граничные условия имитируют изменяющиеся во времени потоки фотонов и нейтронов от взрыва на делении. Это позволяет изучать нагрев плазмы и генерирование трития внешним источником, как это происходит при “усилении” в бомбе на делении, или в “воспламенении свечи” во второй ступени бомбы на синтезе.

1.3 Заряды на делении и усиление

Усиленная бомба на делении - это устройство в котором малое количество термоядерного топлива воспламеняется от реакции деления ядер, порождает нейтроны, которые, в свою очередь, повышают скорость реакции расщепления. Усиление (*boosting*) было успешно разработано в начале 50-х годов. Оно показало себя настолько выгодным, что все современные заряды на расщеплении ядер есть усиленные бомбы на делении. Преимущества проистекают из того факта, что условия воспламенения термоядерного топлива могут быть достигнуты значительно ранее конца ядерной цепной реакции. Окончательная мощность взрыва тогда определяется главным образом числом нейтронов, порожденных реакцией синтеза, а не деталями цепной реакции. Это позволяет избежать использования толстого отражателя нейтронов и тяжелой оболочки, и строить нетяжелые заряды на делении, которые имеют очень хорошую эффективность расщепления. Вдобавок, благодаря некоторым способствующим плазмо-физическим обстоятельствам, условия для инициирования реакции синтеза достаточно нечувствительны к нескольким критическим параметрам (коэффициент сжатия, количество трития, нейтронный фон). В результате усиленная бомба на делении изначально гораздо надежней, устойчивей и безопасней чем неусиленная бомба на делении.

Перед тем как перейти к изучению усиления, стоит вспомнить основные характеристики неусиленных боеприпасов, построенных на принципе обжатия - имплозии. Скорей всего, именно такими устройствами будут пользоваться новые страны-распространители, не имеющие технологической базы для строительства усиленных боезарядов. Такие заряды также предоставляют отправную точку, по которой можно сравнивать преимущества боезарядов с усилением. Методика обжатия необходима если в качестве делящегося материала используется плутоний, и предпочтительна по сравнению с пушечной схемой, если необходимо экономно использовать обогащенный уран.

Детальное количественное описание динамики уранового имплозивного устройства было опубликовано в Швейцарии как продолжение их атомно-оружейной программы [33]⁸. Устройство состояло из сплошной сферы из ^{235}U массой 25 килограмм, окруженной отражателем/оболочкой из обедненного урана массой 200 килограмм. Используя сферическую имплозию за счет детонации бризантных ВВ, достигается максимальный коэффициент сжатия $\chi=1.6$. Расчетный выход энергии составляет 22 килотонны⁹. Это соответствует эффективности деления $\eta=0.05$ (то есть, около 5% урана, который дает 17 kt на кг при полном расщепле-

⁸ Швейцарская атомная программа была тайно иницирована в 1946 году Военным департаментом Швейцарии и необратимо прекращена в 1988 году, через одиннадцать лет после того, как Швейцария присоединилась к Договору о нераспространении. Хотя соглашения о гарантиях МАГАТЭ вступили в силу 6 сентября 1978 года, незаконные работы по ядерному оружию продолжались до 1 ноября 1988 года, когда программа была окончательно прекращена Федеральным Советом. Официальный исторический рассказ о Швейцарской атомной программе был рассекречен и опубликован 25 апреля 1996 года [38].

⁹ Общая энергия, выделяющаяся в ядерном взрыве, измеряется в килотоннах тротилового эквивалента. По определению, $1 \text{ kt} \equiv 10^{12} \text{ cal} = 4.18 \times 10^6 \text{ MJ} = 2.61 \times 10^{25} \text{ MeV}$.

нии). Поскольку для сжатия 225 кг урана необходимо около 300 кг взрывчатки,¹⁰ общий вес бомбы на базе такой конструкции находится на уровне 500-1000 кг.

Расчеты, представленные в [33], включают эволюцию во времени многих важных физических параметров в ходе ядерного взрыва. Эти результаты могут быть использованы для предварительного анализа возможности инициирования термоядерных топлив от зарядов на расщеплении. С этой точки зрения, ключевым параметром является температура в финальной фазе цепной реакции. Найдено, например, что температура в центре ядра составляет около 1 кэВ, когда ядро начинает расширяться. В это время выход энергии составляет около $0.2 kt$ (то есть $\eta=0.05\%$). Затем температура продолжает подниматься так как выделяется все больше энергии и достигает максимума в приблизительно 5 кэВ, когда энерговыделение составляет около $2 kt$ (то есть, $\eta=0.5\%$). Далее температура начинает понижаться, так как все больше тепловой энергии конвертируется в кинетическую энергию или передается от центральной части в отражатель и затем из отражателя наружу.

В первом приближении, пока энергия остается в пределах делящегося материала, температура расщепляемого заряда задается очень простой моделью. Так происходит потому, что тяжелые материалы по сути непрозрачны для электромагнитного излучения. Для урановой или плутониевой плазмы, уравнение (1.13) поэтому может применяться с $T_e=T_i=T_r$. Записывая плотность энергии в терминах коэффициента сжатия χ и эффективности расщепления η , два предельных случая ведут к простым выражениям для температуры.

Во-первых, в низкотемпературном пределе (ниже 4 кэВ в делящихся материалах), можно пренебречь членом излучения. Тогда температура приблизительно равна:

$$kT = \frac{2}{3} \frac{\eta}{Z_{eff}} E_f \quad 1.15$$

Здесь Z_{eff} - эффективный электрический заряд ионов (для тяжелых материалов как уран или плутоний $Z_{eff} \approx 60 \sqrt{kT}$ для $kT < 2$ кэВ) и E_f - энергия деления, около 180 МэВ на ядро. Таким образом, температура в 1 кэВ достигается при эффективности деления в всего лишь 0.05%, что хорошо согласуется с моделированием [33].

Во-вторых, в высокотемпературном пределе (выше 4 кэВ), что соответствует концу цепной реакции, доминирует член излучения. Температура тогда приблизительно равна:

$$kT \approx 18 [keV]^4 \sqrt{\eta \chi} \quad 1.16$$

Принимая $\chi=1.6$ и $\eta=0.5\%$, находим $kT=5.4$ кэВ, в хорошем соответствии с расчетом [33] для максимальной температуры в центре ядра.

Выражение (1.16) показывает, что максимальная температура бомбы на расщеплении есть очень медленно растущая функция сжатия и эффективности. На практике, используя химические ВВ, трудно получить коэффициенты сжатия значительно выше чем 2-3 в делящихся материалах. С другой стороны, значительные потери на излучение и превращение тепловой энергии в механическую начинаются, когда эффективность находится на уровне 1%. Таким

¹⁰ Эта оценка предполагает, что лишь 30% удельной энергии химической взрывчатки преобразуется в энергию сжатия. По этому вопросу и за дополнительной информацией о ядерно-оружейной технологии, смотри [34].

образом, в любом взрыве на основе расщепления, существует максимальная температура, равная приблизительно 5-10 кэВ, которая не может быть превышена.

Рассматривая термоядерное инициирование, хорошо известный факт из исследований управляемого термоядерного синтеза гласит, что в отсутствие внешнего нагрева термоядерное горение возможно только если температура топлива выше некоторой критической температуры, при которой выделение термоядерной энергии равняется энергии, излучаемой нагретым топливом в форме фотонов тормозного излучения. Для реакций DT , D^3He , DD (1.1, 1.2, 1.3-1.4) эта критическая температура, соответственно, равна 4.2, 18 и 25 кэВ¹¹. Следовательно, хотя максимальная температура бомбы на расщеплении определенно достаточна чтобы инициировать DT реакцию, ее может быть недостаточно чтобы начать D^3He и DD реакции.

Чтобы выяснить, можно ли зажечь зарядом на расщеплении другие термоядерные топлива, помимо DT , необходимо исследовать процессы, которые вносят вклад в нагрев образца топлива, расположенного в центре или, возможно, на поверхности взрывающегося устройства на делении. По мере нагрева делящегося материала, образец вначале нагревается через механизм теплопроводности, а затем, по мере роста температуры, все больше излучением. Когда температура поднимается выше 0.1 кэВ, излучение превращается в рентген и основным механизмом нагрева становится обратный bremsstrahlung. (Присутствует также нагрев от нейтронного взаимодействия, но он мал). При таких температурах, термоядерные топлива (являющиеся материалами с низким атомным числом Z) по сути прозрачны для рентгена. Нагрев довольно слаб, но достаточно равномерен по всему образцу. Поэтому, температура топлива для синтеза вплотную следует за температурой бомбы на расщеплении. Инициирование тогда определяется простым энергетическим равновесием, где с одной стороны находятся нагрев от термоядерного генерирования энергии и обратного тормозного излучения, и потери на тормозное излучение с другой. Расчет приводит к замечательному результату: критическая температура воспламенения определяется поперечным сечением реакций синтеза и является слабо выраженной функцией внешних параметров, как плотность или размер образца.

Для DT , D^3He и DD критические температуры инициирования от внешнего нагрева рентгеновским излучением составляют 2.4, 9, и 10 кэВ, соответственно¹². Следовательно, воспламенение D^3He или DD рентгеном от заряда на делении возможно только в высокотемпературном пределе, где цепная реакция близка к своему концу. С другой стороны, DT может быть инициирован в низкотемпературном пределе, где эффективность расщепления все еще достаточно низка, чтобы нейтроны из реакций синтеза имели сильное влияние на окончательный исход цепной реакции. Другими словами, мы делаем вывод, что DT - единственное термоядерное топливо, которое может использоваться для усиления. Это делает третий абсолютно необходимой составляющей современных зарядов на делении.

Вдобавок, как показано моделированием [33], максимальные температуры, получаемые в заряде на расщеплении составляют приблизительно 5 кэВ в центре заряда и около 2 кэВ на внешней границе отражателя. Хотя эти температуры достаточны чтобы инициировать реак-

¹¹ Первая открытая публикация с этим доводом принадлежит Дж.Д. Лоусону [46]. Критические температуры, приведенные здесь, были рассчитаны, используя недавно изданные термоядерные поперечные сечения.

¹² Обоснование, ведущее к этим числам, аналогично выводу "критерия Лоусона" [46]. Как объяснялось в предыдущем абзаце, это равносильно добавлению члена обратного тормозного излучения в нагревающую часть энергетического баланса Лоусона. Очевидно, последствия для усиления, проистекающие из этого тривиального обоснования никогда не публиковались.

цию синтеза в DT (1.1), они недостаточно высоки чтобы инициировать DD реакции (1.3, 1.4) или инициировать цикл Джеттера (1.9) в LiD .¹³ На деле, по этой и нескольким другим причинам невозможно построить водородную бомбу просто разместив немного топлива для синтеза по соседству с бомбой на делении. Требуется более умная конструкция, чтобы сжигать большие количества недорогого термоядерного топлива вроде DD или LiD !

1.4 Современные усиленные заряды на расщеплении

Рисунок 1 демонстрирует упрощенную диаграмму устройства на расщеплении с усилением. Его центральная часть содержит оболочку из плутония и/или обогащенного урана (так называемый *pit* - "*nut*"), окруженный корпусом из нержавеющей стали и, возможно, бериллиевым отражателем нейтронов, и линзами из химического ВВ. Это соответствует современной концепции запечатанных питов, когда делящийся материал постоянно запечатан внутри взрывчатых веществ. Незадолго до подрыва устройства, пит заполняется газообразной смесью DT под давлением несколько десятков атмосфер.¹⁴ По сравнению с бомбами на расщеплении первого поколения, подобных рассматриваемым в [33], большое отличие заключается в отсутствии толстого отражателя/оболочки, виновного за большую часть веса. В качестве типичных цифр, мы считаем, что корпус состоит из 4 кг стали, пит - из 4 кг делящегося материала, и что количество DT составляет 2.2 г. (Это соответствует 1.3 г трития, относительно малое количество, принимая во внимание, что находящиеся в арсенале ядерные боеприпасы содержат в среднем около 4 г трития на боеголовку.¹⁵) Для обжатия такого устройства достаточно около 10 кг ВВ.

При подрыве боеприпаса пит и оболочка схлапываются вовнутрь (происходит имплозия) под действием ВВ одновременно с DT газом. При схлапывании пита в сплошной шар, DT сжимается в сферу с радиусом в несколько мм и плотностью, в десятки раз больше, чем плотность его твердой фазы. Если мы предположим, что давление над DT почти равно давлению в центре в центре делящегося материала, и что в этой области степень сжатия урана доходит до 2.5 от обычной плотности,¹⁶ мы найдем из соответствующих уравнений состояния [136], что плотность DT составляет около 7 г/см^3 , более чем в 30 раз выше плотности в твердом состоянии. На деле, максимальное возможное сжатие от единичной сходящейся ударной волны в сферической геометрии равно 33, смотри [88, стр. 80], также смотри [130]. Таким образом, используя достаточно развитую технологию имплозии, в малой сфере из DT , помещенной в центр схлапывающейся оболочки из тяжелого материала, можно достичь сжатие от 20 до 50

¹³ Однако, малое количество $6LiD$ в центре бомбы на расщеплении мощностью 10-30 kt может увеличить ее мощность до 100-300 kt. Это было сделано, например, в третьем китайском ядерном взрыве [63].

¹⁴ До снаряжения устройства, смесь DT , или только тритий, хранится в отдельной емкости. Это облегчает техобслуживание и гарантирует, что усиление не произойдет при аварийной детонации ВВ.

¹⁵ В мае 1995 года Конгресс США рассекретил утверждение, что "количество трития в резервуаре типично составляет менее 20 г" (RDD-3, 1 января 1996 г., обновленная редакция [11]). Однако, один из наиболее авторитетных несекретных источников дает оценку в 4 г трития на боеголовку в США. Смотри примечание 3 в [56]. Неопределенность в количестве трития, реально используемого в заряде, проистекает из нескольких фактов: (i) количество может значительно различаться между разными типами боеприпасов, (ii) тритий может использоваться в первых и во вторых ступенях термоядерного заряда (например, чтобы усилить "свечу зажигания" и возможно облегчить инициирование "по объему" или в "горячей точке"), и (iii) общие запасы трития, необходимые для поддержания арсенала, возможно, в несколько раз выше чем общее количество трития, используемое в боеголовках. Наш выбор соответствует 1 литру DT газа при давлении в 10 атмосфер.

¹⁶ На практике, используя относительно изощренные методы имплозии, средняя степень сжатия делящегося материала может легко быть порядка 4÷5.

(а возможно даже и 100). Высокая степень сжатия DT смеси важна для скорейшего термоядерного горения.

Рисунок 2 представляет результаты ISRINEX для нагрева, инициирования и горения 2.2 г сферы DT диаметром 9 мм (сжатие $\chi=30$) в центре бомбы на расщеплении. Цель этого расчета - подтвердить, что (i) подъем температуры термоядерного топлива достаточно быстр, чтобы следовать за температурой бомбы на расщеплении, (ii) температура бомбы в 2 кэВ действительно достаточна, чтобы большая часть DT сгорела за время того же порядка что и время генерирования деления, то есть около 5 наносекунд. Для достижения этого температура бомбы на расщеплении устанавливается в фиксированное значение (например, $T_b=1.5, 2.0$ или 2.5 кэВ) и отслеживается временная эволюция выгорания (то есть, количество сгоревшего топлива по отношению к первоначальному количеству топлива). При начальной температуре DT в 0.2 кэВ, и температуре ядерной бомбы между 1.5 и 2.0 кэВ, найдено, что инициирование происходит через 1.5-2 нс, и что сгорание примерно 50% DT занимает около 2 нс. Следовательно, для температуры заряда на расщеплении в 2 кэВ, как предсказывалось аналитическими расчетами, усиление действительно возможно. Однако, если температура ниже 1.5 кэВ (для которой инициирование все еще допустимо после периода нагрева рентгеном в 7 нс), усиление неосуществимо.

Подтвердив, что температура в 2 кэВ адекватна для инициирования DT в центре заряда на расщеплении, можно оценить влияние нейтронов от синтеза на энерговыделение устройства. Во-первых, представляет интерес подсчитать выход мощности при инициировании, но игнорируя нейтроны синтеза. Поскольку 2 кэВ находится в низкотемпературном пределе, применяется выражение (1.15), и эффективность оказывается равной 0.15%. Так как имеется 4 кг делящегося материала, инициирование соответствует мощности при отсутствии усиления в $4 \times 0.0015 \times 17 \approx 0.1$ kt. Это очень низкий выход, почти что уровень "пшика деления". Это демонстрирует, что достижение условий для усиления не представляет сложности с точки зрения нейтронистики: вот почему нет необходимости в толстом отражателе нейтронов. Вдобавок, даже если цепная реакция начнется в наихудшее время,¹⁷ такой выход мощности всегда можно достичь перед полным развалом бомбы.

Минимальное значение усиленной мощности дается очень простой моделью. Для этой модели достаточно знать среднее число распадов, вызванных в делящемся веществе каждым из 14 МэВ нейтронов, порожденных в DT синтезе. В наихудшем случае, предполагая, что времени достаточно только для одного поколения в цепи распада, это число находится на уровне коэффициента размножения нейтронов в некритическом бланкете из делящегося материала, то есть $\nu \approx 5$. Минимальная эффективность усиленного деления тогда равняется соотношению числа распадов, вызванных синтезом, к общему числу делящихся ядер, то есть

$$\eta \approx \nu \frac{N_i}{N_f} = \nu \frac{m}{M} \frac{A}{a} \quad 1.17$$

где $m=2.2$ г и $M=4000$ г есть масса материала синтеза и деления, и $a=5$ и $A=239$ - их атомные веса. Для $\nu \approx 5$ получаем $\eta=0.13$, что соответствует минимальному выходу энергии в 9 kt. Следовательно, сравнивая с минимальной неусиленной мощностью в 0.1 kt, усиление имеет эффект умножения мощности устройства на делении приблизительно на 100 за время порядка 2 нейтронных поколений, то есть 10 наносекунд. Поскольку это значительно меньше чем

¹⁷ Например, в случае преждевременного инициирования нейтронами от спонтанного деления, или нейтронами от взрыва ядерного боезаряда неподалеку.

20-30 нс, за которые происходит развал бомбы на делении без оболочки, то усиление может произойти достаточно поздно в цепной реакции и все равно произвести значительный выход ядерной мощности.

Конечно, расчет точной мощности устройства с усилением требует значительно более сложных моделирующих программ, чем ISRINEX. Однако, достигнутого нами достаточно для определения основных характеристик усиленных зарядов на делении. Из них мы можем, кратко, вывести два нижеследующих важных заключения:

1) Усиление является самой важной чертой второго поколения зарядов на делении. *Единственное* топливо синтеза, которое можно эффективно использовать для этой цели - это *DT*. Это составляет основу концепции прекращения-отсечки производства трития как эффективной меры разоружения термоядерных боеприпасов [56, 8, 17]. Однако, усиление также возможно используя антипротоны, которые порождают около двадцати нейтронов на остановившуюся аннигиляцию в уране. Из этого следует, что очень малого количества антипротонов достаточно, чтобы инициировать цепную реакцию в сильносжатой таблетке плутония или урана. Данная возможность и последствия из нее будут обсуждены в разделе 3.4.

2) Показатели усиленного устройства на делении гораздо больше зависят от качества имплозии пита посредством химических ВВ, чем от нейтронистики или других ядерных особенностей. Это так потому, что временные рамки инициирования *DT* составляют только несколько наносекунд, а скорость роста неустойчивости Релей-Тейлора на границе делящийся материал/*DT* во время имплозии - порядка 100 нс. В дополнение, длительность горения *DT* также составляет несколько наносекунд, значительно меньше чем время перемешивания делящегося материала с *DT*, которое составляет около 5 нс в момент инициирования. Следовательно, самые важные аспекты усиления (т.е., что топливо синтеза становится достаточно сжатым без перемешивания с делящимся материалом) могут быть испытаны без реального запуска реакций деления или синтеза. Очевидно, это может быть сделано вне рамок ДВЗЯИ, при наличии мощных установок гидродинамических испытаний с радиографией. На деле, с помощью передовых установок гидроиспытаний вроде DARHT в США и AIRIX во Франции [327, 328] нет сомнений, что будет поддерживаться текущий уровень практически полной предсказуемости в физике зарядов с усилением. Однако, подобно тому как широко признается, что система сдерживания Израиля основывается на А-бомбах с усилением, можно без опаски предположить, что любая страна с доступом к тритию и технологии отображения на базе высокомоощного рентгена могла бы с легкостью разработать и перевести в форму оружия простые заряды на делении с усилением не прибегая к ядерным испытаниям.

Эти два вывода идут в ногу с высокой оценкой усиления, данной Лоуэллом Вудом и Джоном Наколсом в коротком, но очень информативном, рассмотрении [55] истории¹⁸ разработки ядерных взрывных устройств:

“Таким образом, усиление оказалось знаменательным усовершенствованием в боеприпасах на делении: их мощность могла быть сделана относительно большой и стабильной от боеприпаса к боеприпасу заданного типа, а отсутствие усиления могло

¹⁸ Большинство исторических экскурсов в разработку ядерного оружия США базируются на интервью и биографиях, и на малом числе письменных документов. Поскольку большая часть этих документов была написана учеными из Лос Аламоской Национальной Лаборатории (LANL), например [48, 51, 52], то статья Вуда и Наколса особенно интересна, потому что она рассказывает ту же историю, но с позиции Национальной Лаборатории Лоуренс Ливермор (LLNL). Также смотри [64].

бы использоваться для снижения мощности боеприпасов до военно-пренебрежимых значений (таким образом значительно повышая надежность и управляемость арсенала). Относительно высокие мощности улучшают военную применимость по сравнению с имплозией высоких степеней сжатия, а воспроизводимые (и потенциально более гибко контролируемые) мощности еще дальше продвинули военную применимость.” [55, стр. 312-313]

Другими словами, с усилением мощность управляется очень быстрым импульсом нейтронов от термоядерной реакции, и делящийся материал (помимо нагрева топлива синтеза до инициирования) является по сути пассивным усилителем нейтронов и энергии в финальной стадии ядерного взрыва. Это приводит нас к третьему заключению:

3) Усиление также может применяться для создания высокоэффективных и надежных боеприпасов на делении, в которых вместо *оружейного* плутония используется *реакторный*. Причина в том, что при наличии усиления проблема преждевременного инициирования цепной реакции, которая создает трудности в создании бомбы на делении без усиления [36, 37], серьезной проблемой более не является. Как было объяснено выше, даже если цепная реакция начнется в наихудшее возможное время, температура, достигаемая в делящемся материале, полностью достаточна, чтобы воспламенить смесь *DT*. Предпочтение оружейному плутонию поэтому в основном является вопросом удобства (например, упростить конструкцию, потому что реакторный плутоний может потребовать какое-то охлаждение, чтобы отвести тепло распада ^{240}Pu) и как способ изготовления боеголовок, которые могут храниться на складе или стоять на дежурстве относительно длительное время перед переработкой.

1.5 Принцип водородной бомбы

Одна из первоначальных мотивировок создания водородной бомбы состоит в том, что в отличие от делящихся материалов, которые редки и дороги, дейтерий имеется в изобилии и недорого. Если дейтерий сжигать при температуре 20 кэВ, его максимальное энерговыделение (полагая, что T и ^3He сжигаются сразу же как они появляются) составляет около $Q=7$ МэВ на слияние дейтронов, то есть 80 *kt* на килограмм. Следовательно, если мы предположим эффективность синтеза в 25%, гипотетическая бомба на чистом синтезе мощностью в одну мегатонну требует около 50 кг дейтерия в виде топлива.

Сегодня, благодаря недавним публикациям [67, 68] двух детальных обзоров¹⁹, написанных учеными Арзамаса-16²⁰, принимавшими участие в создании советской Н-бомбы²¹, мы знаем, что и американская, и российская программы начались с изучения возможности нагрева дейтерия в ударной волне, инициированной атомным взрывом. Так как устройство по сути представляло из себя цилиндр с жидким дейтерием, нагреваемый с одного конца взрывающейся

¹⁹ В оригинале пропущена ссылка под этим номером, поэтому для совпадения нумерации приходится делать “пустышку”. *Прим. переводчика.*

²⁰ Арзамас-16, основан в 1946 году, является главной ядерно-оружейной исследовательской лабораторией Советского Союза.

²¹ В реферате [67], редакторы упоминают, что эта статья была вызвана полемикой, начатой публикацией статьи за авторством Д.Хирша и У.Мэтьюс, сперва опубликованной в Бюллетене ученых атомщиков (январь/февраль 1990) [57], переведенной и аннотированной в советских Успехах физических наук (1991) [58]. Ранние комментарии по этой статье Хирша и Мэтьюса были включены в тот же самый выпуск Успехов, см. [60, 61]. Также смотри статью Ларса-Эрика Дэ Гира [59] и ряд статей в Бюллетене ученых-атомщиков (май 1993) стр. 18-19, 20-31, 32-36, 37-39.

бомбой на делении, из которой термоядерное горение распространяется в другой конец, эта концепция несла перспективу взрыва неограниченной мощности. Хотя данная идея была на уме у Эдварда Теллера начиная с 1942 года - так называемый "Супер"- она была независимо переоткрыта в Советском Союзе. В частности, она была явно предложена в замечательном несекретном отчете [39], написанном в 1946 году, практически в то же самое время, когда в Лос Аламосе в апреле 46 года проводилась секретная конференция по рассмотрению результатов американских работ по H-бомбе, проводимых с 1942 года.

Однако, после значительной теоретической проработки, в 1950 году в Соединенных Штатах (и в 1954 в Советском Союзе) было осознано, что инициирование и продольное распространение термоядерной детонации в цилиндре с жидким дейтерием очень трудно осуществимо, если не невозможно.²² Как следствие этого, заново взглянули на другие возможности. Они включали в себя идеи, выведенные из концепций, успешно испытанных к тому времени: "усиление", или "слойка" Андрея Сахарова. Мы не будем пытаться описывать эти попытки или погружаться в подробности их истории.²³ Вместо этого, мы изучим условия, при которых возможно равномерное воспламенение и горение устройства, содержащего порядка 10-100 кг термоядерного топлива.

Для оценки реализуемости такой бомбы первым важным шагом должна быть гарантия, что топливо синтеза достаточно долго удерживается, чтобы значительная его доля сгорела до того как оно будет диспергировано давлением взрыва (т.е. давлением, которое накапливается внутри горящего топлива как результат энерговыделения). Из термодинамики известно, что это давление составляет от 2/3 до 1/3 от плотности энергии (1.13), в зависимости доминирует ли член кинетики или излучения. В низкотемпературном пределе поэтому давление выражается просто как $p \approx N/V \cdot kT$. Температуры, характерные для химического взрыва, находятся на уровне диапазона в 0.5 эВ, а для термоядерного взрыва - в 10 кэВ. Следовательно, типичные давления термоядерных взрывов в 20000 раз больше, чем химических! Так как ничто не может противостоять таким давлениям, время удержания (также называемое временем развала) целиком определяется инерцией. Для увеличения инерции и замедления расширения топлива синтеза массы m , стандартным методом является окружить топливо тяжелой оболочкой массой $M > m$. Полагая, что внутреннее давление будет действовать, толкая оболочку как поршень, для вывода оценки времени развала можно использовать закон Ньютона. В первом приближении

$$\tau_d \approx \frac{R}{c_s} \sqrt{\frac{M}{m}} \quad 1.18$$

где R - радиус топлива, и $c_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$ - скорость звука²⁴. При $kT = 10-30$ кэВ, что типично для термоядерного горения, давление p управляется членом излучения, функцией только от kT . В

²² В 70-х годах, однако, реализуемость этой концепции была продемонстрирована в детальном компьютерном моделировании; только экспериментальная сложность не дала провести полномасштабную демонстрацию [55]/

²³ С момента написания отчета [27], на котором основывается эта глава, в журнале Physics Today [69] была опубликована расширенная версия статьи Гончарова [68]. Было бы очень интересно, если бы профессиональные историки изучили весь материал, опубликованный на сегодняшний день, и написали целостную историю термоядерного оружия в России и Соединенных Штатах.

²⁴ Это общее определение скорости звука, то есть скорости распространения небольшого возмущения. γ - это соотношение удельного тепла, т.е. так называемый "адиабатический показатель". В плазме, где доминирует материя, $\gamma = 5/3$ и $c_s \approx 3 \times 10^5 \sqrt{kT}$ м/с для DD , DT и LiD , и $c_s \approx 2.5 \times 10^5 \sqrt{kT}$ м/с для делящихся материалов, где kT в обоих случаях выражено в кэВ. В плазме, где доминирует излучение $\gamma = 4/3$ и $c_s \approx 2.5 \times 10^6 (kT)^2 / \rho^{1/2}$, где kT выражается в кэВ, а ρ - в кг/м³.

цилиндрической геометрии, R/c_s тогда не зависит от плотности топлива ρ . Для $m=10-100$ кг, и $M/m=10-100$, выражение (1.18) дает времена инерциального удержания на уровне 5-20 нс. Это является базовой шкалой времени, с которой и надо сравнивать время горения.

Время термоядерного горения оценить трудно, потому что оно сильно зависит от температуры, которую можно достичь в топливе, принимая во внимание все ядерные и электромагнитные взаимодействия. Для этой цели жизненно необходима программа как ISRNEX. Упреждая результаты моделирования, представленные в разделе 1.7, можно положить, что температура горения дейтерия составляет 20 кэВ. Время горения находится на уровне времени, необходимом чтобы сжечь 50% топлива при постоянной температуре. Для дейтерия, полагая что T и ${}^3\text{He}$ сгорают сразу, как только они генерируются, время горения тогда есть

$$\tau_b \approx \tau_{DD} = \frac{1}{2N_i \langle \sigma_{DD} v \rangle} \quad 1.19$$

где $N_i = \chi N_0$ - есть начальная численная ионная плотность, и $\langle \sigma_{DD} v \rangle$ - максвелловская усредненная скорость реакции, 5×10^{-24} м³/с при $kT = 20$ кэВ. При плотности твердого состояния ($\chi=1$, $\rho=180$ кг/м³), время горения дейтерия составляет 2 мс. Следовательно, чтобы попасть во время развала, т.е. иметь $\tau_d = \tau_b$, мы находим, что сжатие дейтерия должно быть на уровне 100÷400 раз по отношению к плотности твердого состояния.

Если у нас есть средства сжатия топлива до очень высоких плотностей, то остается проблема инициирования (воспламенения). Как это видно в разделе об усилении, потери излучения таковы, что температура инициирования в дейтерии низкой плотности (т.е. $\chi < 30$) равна 25 кэВ. Эта температура слишком высока для инициирования посредством атомной бомбы. Однако, при увеличении плотности топлива воспламенение облегчается. Например, если плотность достаточно велика, так что большая часть энергии нейтронов, произведенных в реакции синтеза, выделяется в топливе, температура инициирования снижается до 10 кэВ. Еще большее снижение получается, сжимая топливо до точки, когда оно становится непрозрачным к своему собственному излучению. Потери излучения тогда минимальны и большей частью равняются энергетическим потерям черного тела. В цилиндрической геометрии, уравнение равновесия энергии тогда запишется как

$$\frac{1}{2N_i^2 \langle \sigma_{DD} v \rangle} Q > \frac{1}{\chi^2} \frac{2}{R} 3T^4 \quad 1.20$$

Это выражение показывает, что для достаточных количеств топлива (R велико) и достаточно высоких степеней сжатия ($\chi \gg 1$) существует предел, в котором температура воспламенения в принципе может быть сделана как угодно низкой. Этот предел соответствует максимальному сжатию, требуемому для осуществления низкотемпературного инициирования. В случае 50 кг дейтерия, этот максимум составляет около $\chi=500$, т.е. того же порядка что и коэффициент сжатия, требуемый для совпадения времени горения со временем инерциального удержания.

Однако, эти рассуждения все еще не принимают во внимание влияние тяжелой металлической оболочки, окружающей топливо. В водородной бомбе такая оболочка делается из урана, материала с большим Z , непрозрачного для излучения, который не дает излучению уйти из пространства, занимаемого топливом. В результате, потери в оболочку значительно меньше чем те, что задаются законами тормозного излучения черного тела. Эти уменьшенные потери описываются тепловой волной от излучения (волна Маршака [121]) входящая в оболочку [123]. Для материалов с большим Z и температур излучения выше 100 кэВ, коэффициент по-

вторного излучения (реэмиссии) (соотношение повторно излученного потока и истинно поглощенного потока, который питает тепловую волну) находится на уровне 10 [92]. Таким образом, при температурах и давлениях, соответствующих термоядерному инициированию и горению, оказывается, что эти потери составляют порядка 10% и поэтому в первом приближении могут игнорироваться [95]. Значит, сжатие, требуемое для инициирования, будет значительно меньше чем максимум, предполагаемый в (1.20).

Следовательно, принимая во внимание снижение потерь из-за сжатия топлива и повторного излучения радиации оболочкой, возможно гарантировать, что выход энергии синтеза в больших образцах топлива может превзойти потери на излучение в широком диапазоне параметров. Поэтому, возможен “нагрев с самораскруткой” (bootstrap heating), начинающийся при низкой температуре. Если топливо доведено до начальной температуры, скажем, в 2 кэВ, его температура будет расти из-за самонагрева, и после некоторого периода времени достигнет самоподдерживаемой температуры в 15-25 кэВ. Конечно, чтобы это случилось, период самонагрева должен быть короче чем время развала сжатого топлива [96, 97]. Этот режим инициирования, при котором топливо сильно сжато и первоначально находится при низкой температуре, называется режимом “Уилера” или режимом “равновесного” инициирования [96, 97]²⁵. В контексте синтеза на инерциальном удержании, этот метод инициирования также называется “объемным” инициированием, чтобы отличать его от более трудно-реализуемой концепции “искрового” (“в горячей точке”) инициирования. В последнем режиме, сперва воспламеняется маленький центральный объем таблетки с топливом синтеза, который в свою очередь зажигает внешний материал через распространение горения [95, 91].

Подытоживая, очень высокое сжатие является основным условием успешного инициирования и горения инерциально удерживаемых термоядерных топлив: коэффициент сжатия должен быть достаточно велик, чтобы и время саморазогрева (в фазе инициирования), и время горения (в фазе горения), были достаточно коротки по сравнению со временем удержания. Выполнение этих условий может быть проверено на программе моделирования, подобной ISRINEX. На практике, проблема в том, что высокое сжатие очень трудно реализуемо. На деле, как это видно при изучении усиления, сжатие малых количеств изотопов водорода до плотностей, больших в 30 раз плотности в твердом состоянии уже находится на пределе достижимого с помощью химической взрывчатки. Поэтому, при применении данного метода невозможно получение сжатия на уровне 100-300 в больших количествах дейтерия. Необходимо было изобрести метод, использующий заряды на делении.

1.6 Метод Улама-Теллера

После многих безуспешных попыток спроектировать водородную бомбу, в 1951 году Теллер и Улам открыли метод достижения очень высоких степеней сжатия. Роберт Оппенгеймер позже сказал (1954 год) об этом методе: “Программа, что шла у нас в 1949 году, была вымученной и можно было легко доказывать ее бессмысленность. Программа в 1951 году была технически настолько приятной, что оспорить ее невозможно.” [52, стр. 162]. Действительно, как будет подчеркнута гораздо позже Карсоном Марком, физиком из Лос Аламоса, возглавлявшим теоретическую работу по первой водородной бомбе: “Почти сразу (метод Теллера и

²⁵ Джон Арчибальд Уилер, занимался термоядерными исследованиями в Принстоне и Лос Аламосе в 1950-51 годах. Он предложил с Теллером новую модель “Будильника” в 1950 году и помог рассчитать гидродинамику “термоядерного эквilibriumума”, т.е. Майк, в 1951 году. В 1981 году он применил схожие идеи к ЛТС мишеням [87].

Улама) дал перспективу осуществимого подхода к термоядерному оружию, *при условии правильного выполнения проектной работы.*" [52, стр. 162]

Таким образом, основной чертой проекта Теллера-Улама является то, что он дает прямой и изначально безотказный метод создания термоядерной бомбы. На самом деле, этот метод настолько хорош, что *все* первые водородные бомбы срабатывали *с первого раза*. Более того, китайцы смогли взорвать свою первую полномасштабную водородную бомбу всего лишь после трех испытаний бомб на расщеплении, одного испытания деления с усилением и одного предварительного испытания принципов двухступенчатой водородной бомбы [63]. Это демонстрирует, что для строительства водородной бомбы мегатонной мощности методом Теллера-Улама достаточно довольно примитивной технологии.

Основа метода состоит в использовании рентгеновских лучей, порожденных ядерным зарядом первой ступени, для сжатия и инициирования физически *отдельной* вторичной ядерной сборки, содержащей термоядерное топливо.²⁶ Первое, более менее корректное и полное описание метода Теллера-Улама принадлежит Ховарду Морленду и содержится в статье, написанной в черновике в конце 1978 года и опубликованной в ноябре 1979 года после того как Правительство США пыталось запретить ее [49]. Возможно, в ответ на статью Морленда, в феврале 1979 года было рассекречено следующее заявление: "В термоядерном оружии излучение от заряда на расщеплении может удерживаться и использоваться в передаче энергии для сжатия и инициирования физически отдельного компонента, содержащего термоядерное топливо" [11].

Продемонстрированный на рис. 3, метод Теллера-Улама заключается в следующем: бомба на расщеплении и контейнер, заполненный топливом синтеза (вторая ступень), размещаются внутри общей оболочки (радиационный корпус); радиационный корпус и кожух второй ступени (толкатель/оболочка) сделаны из тяжелого материала, непрозрачного для рентгена, остающееся пространство в радиационном корпусе (так наз. цилиндрическая камера - *hohlraum*) заполнено легкими материалами, прозрачными для рентгена; при запуске цепной реакции в первой ступени польшие количества рентгена излучаются до взрыва и мгновенно заполняют хольраум; рентген, запертый в хольрауме быстро достигает своего равновесного спектра черного тела и превращает начинку хольраума в горячую плазму; термализация, приводимая в действие излучением гарантирует, что эта плазма имеет очень равномерное давление и температуру, так что ее воздействие на вторую ступень одинаково со всех сторон; плазма переизлучает рентген на более длинных волнах, который поглощается поверхностью второй ступени; поверхность второй ступени (толкатель/оболочка) нагревается до точки где она испаряется и из нее выбрасывается материал; по закону противодействия материал, унесенный из толкателя/оболочки, вызывает давление, которое толкает оболочку вовнутрь, схлопывая топливо синтеза через имплозию до очень высоких плотностей.

Основная идея метода Теллера-Улама заключается в использовании нагреваемой излучением низкоплотной плазмы как буфера, чтобы создать равномерные условия вклада энергии для обжаривания второй ступени в равной мере и одновременно со всех сторон. Отсутствие равномерности привело бы к неустойчивостям при сжатии, или вторую ступень просто бы снесло прочь. Метод также применим если хольраум не заполнен низкоплотным материалом: роль буфера тогда исполняет термализованное излучение черного тела. Преимущество низкоплот-

²⁶ Это отличается с точностью до наоборот от ранних устройств, где топливо синтеза было упаковано вокруг делящегося материала, и которые были, на деле, неуклюжими версиями боезарядов на делении с усилением.

ного наполнителя в том, что оно позволяет хранить энергию первой ступени в виде тепловой энергии плазмы, и эта энергия затем может быть передана во вторую ступень для запитки энергией процесса абляции [53]. Это важно, так как первая ступень является времяпеременным источником излучения со временной зависимостью, не совсем оптимальной для адиабатического сжатия.²⁷ В дополнение, поскольку рентгеновский импульс от первой ступени имеет относительно короткую длительность, хранение энергии позволяет дольше поддерживать сжатие топлива синтеза и доводить коэффициент сжатия до больших значений. В любом случае, в ядерном боеприпасе хольраум должен быть заполнен очень прочным материалом чтобы держать и первую, и вторую ступени. В свободно падающих бомбах, наполнитель может состоять из полиуретанового пенопласта [47], а в артиллерийских снарядах или боеголовках, проникающих в грунт, из прочного низкоплотного материала вроде бериллия.

Замечательная вещь в методе Теллера-Улама - это простота и эффективность получающегося механизма сжатия, хотя он и основывается на очень сложном процессе переноса излучения. Чтобы проверить, может ли компрессия от лучистой абляции применяться для сжатия большого количества топлива синтеза одновременно с обжатием и тяжелой оболочки вокруг него, требуется оценка абляционного давления. Такую оценку дает наблюдение, что, в первом приближении, взрывающийся слой, граничащий с поверхностью толкателя, представляет из себя плазму, температура которой определяется температурой хольраума T_h , и чья плотность равна плотности толкателя N_p . Следовательно, в первом приближении,

$$\rho_{abl} \approx Z_{eff} N_p \kappa T_h \quad 1.21$$

Чтобы сжать дейтерий до 300 плотностей его твердой фазы, требуется давление в 150 ТПа (1500 мегабар) [136]. Если толкатель сделан из урана (у которого эффективный заряд равен $Z_{eff} \approx 60 \sqrt{kT}$), то из (1.21) мы находим, что соответствующая температура хольраума должна быть 0.4 кэВ.²⁸ Температура хольраума, необходимая для приведения в действие абляционной компрессии поэтому будет в диапазоне 0.2-2 кэВ. Это ниже чем максимальная температура заряда на расщеплении, который, следовательно, может использоваться в качестве источника энергии для этой цели. Вдобавок, этот диапазон температур совместим с наполнителем хольраума, сделанном из низкоплотного материала с малым Z .

На рис. 5 присутствует необязательный элемент, не обсуждавшийся ранее: *свеча зажигания* (sparkplug) в центре второй ступени. Свеча состоит из подкритического количества делящегося материала, сжимаемого одновременно со второй ступенью. Из-за интенсивного нейтронного фона, возникающего от взрыва первой ступени, в свече по достижении критического состояния начинается цепная реакция (чтобы избежать "пшика", свеча усиливается небольшим количеством DT). Следовательно, при тщательном проектировании, свеча взорвется как раз тогда, когда имплозия доводит топливо до максимальной плотности. Затем она даст, в форме рентгеновских лучей, нейтроны и дополнительное сжатие изнутри, большое количество энергии, достаточное чтобы гарантировать, что инициирование начнется даже в наихудшем случае. Как следствие, когда Теллер изобрел концепцию свечи зажигания, вскоре после совместного с Уламом открытия средств достижения очень высоких степеней сжатия, вся схема стала убедительной на уровне деталей.

²⁷ Адиабатическое сжатие, то есть без оттока или притока тепла, минимизирует количество энергии, необходимое для достижения заданного сжатия.

²⁸ Эта оценка хорошо согласуется с детальными расчетами [129] поскольку увеличение плотности сжатого толкателя компенсируется его более низкой температурой.

Режим иницирования, в котором свеча на расщепляемых материалах используется для поддержки зажигания и повышения эффективности термоядерного горения, называется "режимом Теллера." В этом режиме проектные ограничения менее строги, чем в других режимах. Так происходит, потому что в последних нагрев топлива до термоядерного зажигания достигается во время сжатия через гидродинамическое преобразование кинетической энергии в тепловую. Например, концепция, концепция иницирования центральной искрой полагается на формирование горячей точки в центре схлапываемого топлива, где замедляющееся движение материала преобразуется в тепло. Если температура достаточно высока, то горячая точка воспламеняется и инициирует волну термоядерного горения, которое распространяется к наружным, холодным слоям топлива. В случае DT , температура зажигания горячей точки составляет 10 кэВ, а в случае DD - 40 кэВ [91]. Чтобы получить такие высокие температуры в центре, имплозия должна быть очень симметричной, а временная зависимость абляционного давления должна иметь очень четко определенный профиль, чтобы сжатие было адиабатическим. В этой связи, другой гидродинамический режим - объемное воспламенение, - предъявляет гораздо меньше требований [95]. По сути, при условии, что оно достаточно сильно и быстро, объемное сжатие может быть менее симметричным и необязательно адиабатическим. Как показано в подробном моделировании [96, 97] и подтверждено ISRINEX, температура режима зажигания Уилера составляет около 1 кэВ в DT и 2 кэВ в DD , но для этого требуется достичь коэффициента сжатия, большего как минимум в 10 раз. Следовательно, в то время как иницирование по режиму Теллера использовалось в первых термоядерных зарядах, режим Уилера определенно применяется в более современных боеприпасах. С другой стороны, нет однозначной информации о том, применяется или нет в самом современном оружии метод иницирования искрой. Это еще одна причина, по которой освоение этой методики в контексте исследований синтеза с инерциальным удержанием (ЛТС-ICF) на мегаджоулевых лазерных установках может привести к дальнейшему усовершенствованию технологии термоядерного оружия.

Продемонстрировав, что идеи Теллера дали решение проблем сжатия и иницирования второй ступени, остается подтвердить, что они совместимы с общими временными рамками всего устройства. В частности, сжатие и горение второй ступени должно завершиться до того, как ударная волна от первой ступени достигнет вторую. Радиус ударной волны от центра первой ступени можно оценить, положив что, вся мощность Y запала сконцентрирована в точке. Это приводит к выражению

$$r(t) = (Y/\rho)^{1/5} t^{2/5} \quad 1.2.2$$

где ρ - средняя плотность материала, окружающего делящийся центр, и t - время [120]. Для мощностей в kt диапазоне и плотностей в несколько кг/м³, уравнение (1.22) показывает, что ударная волна находится на расстоянии 30 см от центра первой ступени через приблизительно одну микросекунду. С другой стороны, больше всего времени в работе второй ступени уходит на обжатие. Это время находится из рассуждений, аналогичных тем, что привели нас к выражению (1.18). В первом приближении время обжатия задается как

$$\tau_e \approx R/c_s \quad 1.2.3$$

где теперь R - радиус второй ступени до обжатия, и $c_s \approx c_s(kT_h)$ - скорость звука в слое абляции. Для $R=0.1$ м и $kT_h=0.5$ кэВ, это дает около 0.5 микросекунды. Таким образом, остается достаточно времени для обжатия и сгорания второй ступени, прежде чем первая ступень ее окончательно не уничтожит.

В Советском Союзе работа над “атомным обжатием” второй ступени началась в январе 1955 года. С интервалом в несколько недель концепции удержания излучения внутри радиационного корпуса и имлозии второй ступени излучением были открыты Я.Б. Зельдовичем и А.Д. Сахаровым [67].

Чтобы завершить этот раздел, мы подытоживаем в таблице 1.1 последовательность событий в термоядерном взрыве и даем для каждого события соответствующую временную шкалу.

Времена событий в термоядерном взрыве [нс]	
<i>Первая ступень:</i>	
Обжатие химическими ВВ (HE)	10000-50000
Неустойчивость Релей-Тейлора (HE/Ru граница)	5000-10000
Неустойчивость Релей-Тейлора (Ru/DT граница)	100-400
Цепная реакция	150-300
Неустойчивость Релей-Тейлора (перемешивание Ru/DT)	2-8
Усиление (горение DT)	1-4
Импульс рентгена	10-50
Развал делящегося сердечника	10-50
Полный развал	500-2000
<i>Первая/вторая ступень</i>	
Время прибытия рентгена	1
Время прибытия нейтронов	20
Время прибытия ударной волны	1000
Термализация рентгена внутри хольраума	10
<i>Вторая ступень</i>	
Абляционное обжатие	100-500
Цепная реакция (свеча зажигания)	10-30
Термоядерное горение	3-20
Развал топлива синтеза	3-20

Таблица 1.1: Последовательность событий и их времена в термоядерном взрыве

1.7 “Майк,” первая водородная бомба

Первый водородный взрыв, “Майк”, состоявшийся 1 ноября 1952 года, уникален, потому что он единственный, в котором в качестве топлива использовался жидкий дейтерий: все последующие устройства использовали в качестве термоядерного топлива *LiD*. Он также уникален, потому что по этому термоядерному устройству на сегодняшний день доступно больше всего несекретной информации. Это облегчает процесс реконструирования и предоставляет данные, требуемые для проверки корректности концепций, развитых в предыдущих разделах.

Первый класс информации, доступной по Майку, имеет историческую или описательную природу. Этот тип данных собран в книге Ричарда Роудса о создании водородной бомбы [65] и на компакт-диске Чака Хэнсэна [66]. Она подтверждает, что Майк был двух-ступенчатым термоядерным устройством того же вида, что ранее описал Морлэнд [49]. Книга Роудса дает детальное качественное описание основных компонент и функционирования Майка, а также несколько базовых чисел (т.е., выход мощности, вес, габариты, и т.д.) отвечающие общим характеристикам устройства, рассекреченным на сегодняшний день. В ней говорится, например, что общий энерговыход Майка равнялся 10.4 мегатонн, и из них около 23% (т.е. 2.4 Mt) были даны синтезом, в то время как 77% (т.е. 8 Mt) пришли от деления тяжелой урановой оболочки, что объясняет обильные осадки, порожденные взрывом.

Второй класс информации, доступной по Майку, является следствием открытия новых элементов с атомными номерами 99 и 100, эйнштейния и фермия, в радиоактивных осадках от устройства [151, 152]. Поскольку эти открытия подразумевали, что “взрыв Майк был уникальным и важным научным экспериментом” [154, стр. 324], то какая-то часть качественной и количественной информации была рассекречена после 1955 года. Так, было подтверждено, что синтез новых элементов был результатом множественного захвата нейтронов в ^{238}U , и что нуклеосинтез произошел в массе ^{238}U , облученной большим нейтронным потоком, выпущенным при взрыве горячей сжатой дейтериевой плазмы. В дополнение, было ясно указано, что горение дейтерия шло таким образом, что при взрыве осуществлялось генерирование 14 МэВ нейтронов посредством DT синтеза и также нейтронов от быстрого деления урана. Среди количественной информации было указано, что концентрация нейтронов в бланкете из ^{238}U превысила 6×10^{23} нейтронов на см^3 за 10 нс [155] (что подразумевает время термоядерного горения на уровне 10 нс, также смотри [154]) и что поток тепловых нейтронов, интегрированный по времени, составил 1.2×10^{24} н/см³ и их усредненная термическая температура была 5 кэВ [156]. Смотри также [153].

Несмотря на наличие всей этой информации, невозможно полностью реконструировать Майк, потому что многие детали любого сложного устройства зависят от разумных, но иногда несколько произвольных решений, которые затем становятся входными данными при расчете других особенностей. Это означает, что при реконструировании такого устройства, единственной возможностью является найти основные характеристики одной (из нескольких) правдоподобных конструкций. Такая конструкция представлена на рис. 4, и к ней привели следующие шаги:

- Общая форма Майка - цилиндр радиусом 1 м и длиной 6 м. Один конец скруглен и в центре его находится первая ступень. Общий вес устройства 82 тонны. При площади внешней поверхности в 41 м^2 , этот вес будет соответствовать средней толщине стали в 25 см, предполагая, что вся масса сконцентрирована в оболочке. Учитывая, что внутреннюю поверхность оболочки устилал свинец, чтобы сделать ее непрозрачной для излучения, разумно считать, что корпус был сделан из стали толщиной 10-15 см.²⁹

- Энергия синтеза в 2.4 Mt соответствует сгоранию около 30 кг дейтерия. Полагая эффективность синтеза-горения в 25%, этот соответствует 840 литрам жидкого дейтерия при плотнос-

²⁹ Как все облучаемый материалы с большим Z, свинцовая облицовка покрывается слоем полиэтилена, чтобы избежать “сдувания” атомов свинца рентгеновским излучением в канал излучения. Вскоре после взрыва первой ступени эти слои пластика быстро испарятся и заполнят канал излучения плазмой с низким Z, по сути прозрачной для рентгена.

ти 0.14 г/см^3 . Из фотографий Майка, и особенно из положения диагностических световодов [65, фото 70], похоже, что длина второй ступени равнялась 3 м. Следовательно, объем несжатого жидкого дейтерия эквивалентен цилиндру длиной 3 м длиной и радиусом в 30 см.

- Энергия деления в 8 Mt соответствует расщеплению около 400 кг урана. Большая часть расщеплений определяется быстрым делением ядер ^{238}U в толкателе/оболочке из обедненного урана, окружающей бак с дейтерием. Вес уранового blankets может быть выведен из максимальной мощности, ожидавшейся от Майка, оценочные значения которой были порядка 50-95 Mt [65, стр. 493]. При выходе энергии 17 kt/kg , 90 Mt соответствует полному расщеплению 5300 кг ^{238}U . Полагая массу толкателя/оболочки равной 5000 кг и внутренний радиус в 50 см (т.е. оставляя место для 20 см стенки сосуда Дьюара с жидким дейтерием), получается толщина несжатого уранового blankets 2.8 см. Это оставляет место для канала излучения шириной в 20 см.

- Минимальное сжатие второй ступени можно оценить, положив, что интегрированный по времени нейтронный поток равен потоку нейтронов синтеза, пересекающему границу обжатого дейтерия, плюс нейтронные потоки от (n, 2n) реакции и быстрого деления, вызванные нейтронами синтеза в blankets, предполагая, что все нейтроны не от синтеза порождаются в узком слое на удалении от центра, равном радиусу сжатого дейтерия.³⁰ Так как число нейтронов задается энерговыделением, а поток из справочника [156], то получаемое значение радиуса сжатого дейтерия равно 2.7 см. В цилиндрической геометрии это соответствует коэффициенту геометрического сжатия $(30/2.7)^2 \approx 120$, то есть дейтерий сжимается до плотности, в 100 раз выше плотности его твердого состояния.

- В прогонах ISRINEX сжатие дейтерия варьировалось от 100 до 500. Так как компоненты второй ступени (т.е. blankets из обедненного урана, дейтериевое топливо, и плутониевая свеча зажигания) сжимаются одновременно, то сжатие ее различных частей можно найти из таблиц с уравнениями состояний [136], предполагая равномерное давление над второй ступенью. Это дает упрощающее предположение, что вся вторая ступень покоится при развороте (ударной волны?) [95]. Например, сжатие дейтерия в 300 раз соответствует сжатию blankets в 8 раз, и свечи зажигания в 16 раз.³¹

- Радиус плутониевой свечи определяется из требования, чтобы свеча перешла в критсостояние во время, близкое к моменту, когда во второй ступени достигается максимальное сжатие. Для сжатия в 16 раз, радиус необжатой плутониевой свечи зажигания составляет около 1 см. Это соответствует 18 кг плутония, который из-за интенсивной бомбардировки нейтронами синтеза полностью расщепляется при взрыве и дает вклад в 300 kt в общий энерговыход.

- Минимальная мощность первой ступени определяется энергией, требуемой, чтобы обжать вторую ступень (т.е. 120 кг дейтерия и 5000 кг урана) до заданного значения, предполагая что на нагрев топлива энергии не требуется. Для коэффициентов сжатия в 300 и 16, т.е. $\rho_D=53$ и $\rho_U = 300 \text{ г/см}^3$, энергии адиабатического сжатия [136] равны приблизительно 3000 и 500 МДж/кг, то есть $0.4+2.5 \approx 3$ ТДж в общем. Типичное энергосодержание химического ВВ равно 5 МДж/кг. Следовательно, минимальная энергия, требуемая на обжатие второй ступени Майка, эквивалентна энергии приблизительно от 0.6 kt ВВ. Полагая, что конверсия

³⁰ По сути, это метод, предложенный Ларс-Эриком де Гиром на стр. 356 в [59].

³¹ Для приблизительного учета действия сходящейся ударной волны, мы полагаем, что сжатие в свече в среднем в два раза выше чем в blankets.

энергии от первой ступени в энергию плазмы хольраума составляет 10%, и что эффективность абляционной компрессии составляет около 25%, требуемая минимальная мощность первой ступени составляет 25 *кт*.³²

Вторая ступень, с дейтерием, сжатым в 300 раз от плотности его твердого состояния, показана на рисунке 5. Дейтерий сжимается до слоя 1.5 см толщиной, окружающего свечу зажигания (радиусом 0.25 см). В этой фазе высокого сжатия, объем термоядерного топлива очень мал по сравнению с объемом цилиндра из обедненного урана 12 см в диаметре, окружающего его. Ситуация достаточно схожа с обжатой первой ступенью на усилении (рис. 1), за исключением того, что геометрия здесь цилиндрическая, а не сферическая, и степени обжатия значительно выше. Как и для усиления, делается вывод, что время инерциального удержания сильно зависит от эффекта торможения, оказываемого тяжелым материалом, окружающим топливо. При температуре горения в 20 кэВ, $R/c_s = 3.5$ нс. Таким образом, при $M/m = 5000/120$, время удержания, рассчитанное по (1.18) составляет 22 нс. Так как выражение (1.18) есть аппроксимация, полученная за счет игнорирования действия ударного сжатия и предположения, что оболочка движется воедино согласно закону Ньютона, то оно имеет тенденцию преувеличивать время удержания. Однако, без опаски можно сделать оценку, что время удержания будет на уровне 10 нс, согласно [155].

Последовательность и непротиворечивость такой модели Майка проверяется изучением результатов расчетов ISRINEX. Эти расчеты крайне необходимы, чтобы иметь реалистичную картину временной эволюции инициирования и горения. На рис. 6 показано инициирование в режиме Уилера и горение для степеней сжатия дейтерия в диапазоне от 100 до 500. Для всех случаев и всех трех температур, начальная температура равняется 2 кэВ. Верхняя часть рис. 6 показывает горение, а нижняя часть - ионную температуру. В одном случае, т.е. когда сжатие равно 200, показана временная эволюция ионной, электронной и фотонной температур. В отличие от случая с дейтерием-тритием (рис. 2), здесь нет значительного "убегания" ионной температуры после инициирования: свыше 20 кэВ, T_i лишь на 2-3 кэВ выше чем T_e , а T_e выше T_r совсем на немного. Так происходит потому, что по сравнению со скоростью DT реакции, скорость DD реакции мала, если сравнивать ее со скоростью обратной комптоновской реакции. Когда DD начинает гореть, большая часть энергии передается электронам и фотонам, так что ионная температура поднимается медленно. Для иллюстрации ключевого значения обратных комптоновских эффектов показана температура T_i^* , которая была бы у ионов при отсутствии этих эффектов: как только T_i^* достигнет 10 кэВ, она скачком поднимется до уровня в сотни кэВ - нефизический эффект, который позволил бы дейтерию гореть после простого соприкосновения с атомной бомбой...

Рисунок 7 показывает теллеровский режим инициирования и горение Майка, предполагая наличие 6кэВ свечи зажигания. По сравнению с рис. 6, у разных кривых приблизительно тот же самый наклон, но инициирование, т.е. $T_i = 10$ кэВ, достигается менее чем за 10 нс во всех случаях, когда сжатие выше 200. Следовательно, в режиме Теллера, 25% топлива может сгореть быстрее чем за 10 нс, когда сжатие равно 200, и свыше 50% дейтерия может сгореть за менее чем 10 нс, когда сжатие равно или больше 300. С другой стороны, в режиме Уилера, самоиницирование и горение за время, меньшее времени удержания в 10 нс, требует $\chi=500$, значительно больший коэффициент сжатия.

³² Это 1% от 2.4 *Мт*, полученных в Майке от синтеза. Скорей всего, мощность первой ступени Майка была в диапазоне от 50 до 200 *кт*.

Даже хотя модель на рис. 4 и компьютерные выдачи на рис. 6 и 7 достаточны для понимания как и почему работает Майк, их не следует принимать за рабочие чертежи или измеренные результаты Майка. Это еще более относится к рис. 5, так как на нем не принимается во внимание тот факт, что во время максимального обжатия внешняя поверхность оболочки может претерпеть значительную абляцию и унос материала - если только она не покрыта специальным материалом-толкателем, который сдувается при достижении максимального сжатия. Вдобавок, не приняты во внимание несколько особенностей процесса абляционного сжатия. Например, излучение не только уносит материал толкателя/оболочки, но также уносит материал и с корпуса. Движущийся вовнутрь материал расширяется в канал излучения и в конечном счете сталкивается с унесенным материалом, движущимся наружу с поверхности толкателя. Также, у корпуса должна быть достаточная инерция чтобы излучение достаточно долго оставалось "запертым" в канале излучения. Другими словами, в дополнение к трудностям, возникающим из многочисленных инженерных ограничений, сложные процессы вроде абляции, неустойчивостей, перемешивания, ударных волн и радиационной гидродинамики, тоже должны учитываться в по-настоящему реалистичном моделировании.

Несмотря на все эти сложности, мультимегатонная термоядерная бомба вроде Майка является относительно простым устройством. Это особенно верно на фоне более ранних термоядерных концепций - Теллеровского "Будильника"³³ или даже классического "Супера." Как вспоминал Карсон Марк в 1974 году: "Фантастические требования к вычислениям, накладывавшиеся попытками изучить вопрос классического Супера, каким он виделся в 1946 году, не относились, конечно же, в той же самой мере к термоядерным устройствам в форме, рассматривавшейся с начала 1951 года." [48, стр. 10]. Далее: "Расчеты, сделанные в связи с испытанием Майк, целиком были проведены за год от середины 1951 до середины 1952 года" [48, стр. 12].

Аналогичные заключения можно сделать по поводу советских конструкций. В сахаровской "слолке", как и в теллеровском "Будильнике", термоядерное топливо не сжигается почти в статических условиях, как в центре второй ступени Теллера-Улама, а сжимается между расширяющейся атомной бомбой и движущейся наружной оболочкой. Следовательно, топливо находится в очень неустойчивом состоянии, "скользя" на вершине развальнющей ударной волны атомной бомбы. Сжатие, поэтому, никогда не может стать очень высоким, и не может поддерживаться длительное время. Вдобавок, сооружение "слолки" было также очень трудным. С другой стороны, после открытия обжатия излучением в начале 1955 года, расчеты и теоретическая работа были завершены к началу лета,³⁴ и экспериментальный термоядерный заряд был успешно испытан 22 ноября того же года [67].

Относительную простоту, приведшую к успеху Майка и всех последующих термоядерных устройств теперь можно объяснить в достаточно общих словах. Она проистекает из того факта, что концепция Телера-Улама и идея свечи зажигания основаны на процесса, устойчивых по своей природе: при условии, что пройдены какие-то пороговые значения, процессы обяза-

³³ Как и в сахаровской "Слойке", в теллеровском "Будильнике" чередующиеся слои *LiD* и урана окружают центр бомбы на расщеплении.

³⁴ Это примечательно, так как в 1955 году советские компьютеры значительно уступали в производительности американским компьютерам от 1952 года. Это означает, что хотя большую часть численных расчетов надо было выполнять на простых вычислительных машинах, советские ученые разработали особенно хорошее понимание теории задействованных физических процессов. Это было продемонстрировано очень высоким качеством советских учебников по физике плазмы, опубликованных позднее, например [123], и которые стали мировым стандартом справочных пособий по этой теме.

тельно развиваются успешно. Именно так дело обстоит с атомной бомбой: при условии сборки массы делящегося материала, превышающую критическую, расходящаяся цепная реакция неизбежна. Для водородной бомбы, ключевым порогом является достаточное сжатие второй ступени. Этого достаточно, чтобы запустить реакцию в свече зажигания и воспламенить топливо. Следующий за тем порог - это инерция, достаточная для осуществления значительного термоядерного горения. Следовательно, простым увеличением мощности первой ступени и окружением топлива достаточно тяжелой оболочкой, можно получить высокомогущный термоядерный заряд, работающий без сбоев.

1.8 В-28: первая “миниатюрная” многоцелевая водородная бомба

Количество технической информации, доступной для общественности, по любому из термоядерных боеприпасов, поставленных на вооружение, весьма ограничено. И хотя такая засекреченность может на первый взгляд показаться разумной, если мы вообразим, что подобные данные могут быть полезны для потенциального врага или распространителя, разумность эта уменьшается после осмысления, что термоядерные заряды основываются на небольшом числе простых физических идей. В дополнение, эти идеи были открыты и применены на практике в период с 1940 по 1960 год. С того времени ничего фундаментального не изменилось: улучшение термоядерных зарядов было медленным процессом последовательных усовершенствований, и по-настоящему революционные концепции в них не вносились с середины 1950-х годов. Это позволяет нам обсуждать в общих чертах то, что скорей всего произошло с тех пор, даже хотя у нас и нет доступа к засекреченной информации.

Первые водородные бомбы, поставленные на вооружение, были мультимегатонными устройствами, которые можно было доставлять только на бомбардировщиках. В дальнейшем упор сместился на устройства с меньшей мощностью. Американская бомба В-28 (1200 экземпляров которой было развернуто на вооружение начиная с 1958 года) является примером одномегатонной стратегической и тактической термоядерной бомбы, построенной в многочисленных версиях и носимой на многих типах самолетов.

Количественно, все что известно о В-28, это то что ее боеголовка имела мощность между 70 kt и 1.45 Mt, вес в диапазоне от 975 до 1150 кг, максимальный диаметр 50 см, и длину около 90 см [54]. Тем не менее, этой информации достаточно, чтобы набросать правдоподобную конструкцию для В-28.

Можно предположить, что В-28, подобно Майке, базируется на очень консервативной конструкции. Время удержания, поэтому, определяется инерцией от достаточно тяжелой оболочки, а термоядерное инициирование обеспечивается ^{235}U свечой зажигания.³⁵ Основные качественные отличия от Майка в том, что вместо жидкого дейтерия в качестве термоядерного топлива используется дейтерид лития-6, и что урановый бланкет, окружающий вторую ступень является более чем всего лишь оболочкой и размножителем энергии, т.е. он также служит в роли отражателя/размножителя нейтронов и позволяет идти циклу Джеттера (9).

³⁵ Хотя в качестве делящегося материала для свечи зажигания в Майке использовался плутоний, похоже, что большинство американских термоядерных боеприпасов используют во второй ступени ^{235}U , несмотря на его более высокую критическую массу по сравнению с плутонием. Так происходит из-за относительно меньшей стоимости обогащенного урана и меньшего числа проблем с техобслуживанием, создаваемых им.

Также можно предположить, что большая часть мощности происходит из деления, а не из синтеза и (в качестве нашей первой численной гипотезы) выход мощности от синтеза равен 200 kt при эффективности синтеза (сгорания) в 50%. Для LiD , когда он горит при температурах, достаточных для поддержания цикла Джеттера, максимальный выход мощности составляет 50 kt/kg . Это предполагает наличие 8 kg LiD , что соответствует объему около 10 dm^3 . Считая длину второй ступени равной 50 см , для LiD это дает радиус 8 см .

Так как общий вес боеголовки составляет около 1000 кг , а разумный максимальный вес оболочки немного меньше половины от этого числа, можно положить, что оболочка весит 400 кг . Это соответствует слою урана толщиной 6 см , обернутому вокруг LiD . Для температуры горения в 20 кэВ , время развала LiD равно $R/c_s = 2.2 \text{ нс}$ при $R = 8 \text{ см}$. Учитывая 400 кг оболочку, формула (1.18) дает время удержания около 15 нс .

Выход мощности от синтеза в 200 kt соответствует $3 \times 10^{26} \text{ DT}$ реакций синтеза. Предполагая, что для каждой из этих реакций примерно один из трех нейтронов уходит в бланкет и вызывает быстрое деление, то общая энергия деления составляет 800 kt . Это означает, что при таких условиях общая мощность В-28 примерно равна 1.2 Mt - включая 200 kt от реакций деления в свече зажигания.

Интересней всего рассмотреть результаты ISRINEX для инициирования и горения LiD (показаны на рис. 9 и 10) и сравнить их с результатами для Майка. Так как эффективный объем молекулы LiD примерно в 2.2 раза меньше чем эффективный объем молекулы D_2 (или молекул DT или H_2) при плотности твердого состояния, численная плотность дейтерия в LiD примерно та же, что и в твердом D_2 (на деле, на 10% больше). Следовательно, кривые, соответствующие тем же самым коэффициентам сжатия, то есть, кривые на рис. 6 и 9 с тем же самым χ , можно сравнивать напрямую так как они нормализованы тем, что у них почти одинаковая объемная концентрация изотопов водорода.

Сравнивая инициирование и горение D_2 и LiD (рис. 6 и 9), легко видеть, что как только достигается инициирование (т.е. $T_e = 10 \text{ кэВ}$), скорость горения LiD значительно выше чем скорость горения DD . Так происходит потому, что в LiD нейтроны, порожденные в реакции (1.4)³⁶ создают тритий *in situ*, взаимодействуя с литием в экзотермической реакции (1.6). Далее, так как топливо из LiD окружено толстым урановым бланкетом, нейтроны, ушедшие из зоны горения, размножаются в реакции быстрого деления урана или ($n, 2n$) реакцией (1.7), и поэтому отражаются назад в зону горения, поскольку нейтронное альbedo бланкета больше единицы. Следовательно, концентрация трития в LiD возрастает экспоненциально, до тех пор пока не выйдет на "полку" когда цикл Джеттера (1.9) становится доминирующим процессом на пике реакции. Таким образом, время горения LiD имеет значение между DD и DT . Чтобы выразить это суждение количественно, вводится DT эквивалент выражения (1.19), т.е. время реакции горения DT равно:

$$\tau_{DT} = \frac{2}{N_c \langle \sigma_{DT} v \rangle} \quad 1.24$$

³⁶ Или в дочерней реакции (1.1), где сжигается тритий, произведенный в (1.3)

где N_i - снова общая численная плотность изотопа водорода.³⁷ При $kT = 20$ кэВ, $\langle\sigma_{DT}\nu\rangle=4\times 10^{22}$ м³/с, так что $\tau_{DT}=100/\chi$ нс. Следовательно, при 20 кэВ время горения DT в 20 раз меньше, чем время горения DD . Обращаясь к результатам ISRINEX, эффективные времена горения могут быть определены из наклона кривых на рис. 6 и 9. Для DD , результаты ISRINEX следуют выражению (1.19), т.е. $\tau_{DD}=2000/\chi$ нс. Для LiD , в среднем $\tau_{LiD}=300/\chi$ нс. Таким образом, в хорошем приближении, LiD примерно в 8-10 раз лучше чем DD и только в 2-3 раза хуже чем DT - наилучшее возможное термоядерное топливо. В заключение, LiD является хорошей заменой D_2 , особенно поскольку LiD при обычных температурах находится в твердом состоянии, а D_2 - в жидком.

Однако, по сравнению с D_2 , у LiD есть два недостатка. Во-первых, он тяжелее D_2 и требует больше энергии для сжатия до заданной степени. Во-вторых, как найдено методом проб и ошибок в ISRINEX, температура начала Уилеровского режима для LiD должна быть 4 кэВ, вместо 2 кэВ для D_2 . В противном случае, самоиницирование не идет, так как в LiD низко-температурный саморазогрев менее эффективен, чем в DD . Это происходит потому что в LiD на дейтерон приходится больше электронов, что подразумевает что у LiD большая теплоемкость, а также уровень энергопередачи между заряженными частицами и фотонами, так что ионная температура со временем поднимается медленнее, чем в D_2 .

Первый недостаток LiD компенсируется его более высокой скоростью реакции и возможностью поднятия мощности первой ступени. Второй недостаток исчезает если применяется свеча зажигания на расщеплении. Следовательно, LiD остается хорошей заменой D_2 . Это подтверждает и ISRINEX. Рисунок 10, т.е. горение В-28 в Теллеровском режиме, показывает, что 50% топлива сгорает менее, чем за 10 нс, когда коэффициент сжатия составляет 150, и что свыше 75% топлива сгорает за то же самое время, если сжатие больше или равно 200. Это сопоставимо со временем удержания, задаваемым в (1.8). Таким образом, предположения, сделанные при рисовании конструкции, представленной на рис. 8, соответствуют физике инициирования и горения LiD .

В конце полезно сделать замечание о генерировании трития на месте, *in situ*, так как иногда полагают, что либо первая ступень, либо свеча в этом играют ключевую роль. Однако, это не так: число высвобождаемых нейтронов, будь то при делении первой ступени или свечи, на порядки меньше значений, требуемых для существенного вклада в генерирование трития во время горения LiD . С другой стороны, так же как нейтроны из первой ступени нужны для запуска цепной реакции деления в свече, так и любое количество трития, порожденного нейтронами из первой ступени или свечи "обогатит" LiD и облегчит инициирование.

1.9 ТЕРМОЯДЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ 1970-1980 ГОДОВ

Возможности для усовершенствования конструкции термоядерных боеприпасов ограничиваются в итоге факторами вроде максимального выхода мощности при делении (т.е. около 17 *kt*/кг для любого делящегося материала, будь то ²³⁵U или *Pu*, или материалы быстрорасщепляемого blankets - природный или обедненный уран и максимальным выходом энергии при синтезе (т.е. около 50 *kt*/кг для LiD). Это приводит к выводу определения *соотношения мощ-*

³⁷ Отличие на множитель 4 между выражением (1.19) и (1.24) возникает из факта, что у DT реакции во входном канале есть две различные частицы, в то время как у DD реакции - две идентичных, и каждая из DT реакций создаст либо T , либо ³He - предполагается, что они сразу же после генерации вступают в реакцию с другим D .

ности к весу как основной меры продвинутой термоядерного боеприпаса. Для В-28 оно составляет 1000 kt/1000 кг, то есть одна kt на кг, коэффициент в пятьдесят раз меньше теоретического максимума.

Вторым важным численным показателем заслуг является просто вес: поскольку типичный вес, забрасываемый МБР (межконтинентальная баллистическая ракета-ICBM), находится на уровне нескольких тонн, то чем легче боеголовки, тем большее их число может быть запущено в конфигурации РГЧИИ (разделяющиеся головные части индивидуального наведения - MIRV). Эволюция ядерного арсенала США [54], которая является демонстрацией того, что можно достичь в терминах модернизации, открывает поразительный факт - соотношение мощности к весу оставалось довольно постоянным начиная с 1960 года на уровне около 1 kt/кг. Это отражает, что технология термоядерных боеприпасов с тех пор фундаментально не менялась. Следовательно, хотя вес стратегических боеголовок непрерывно снижался с 1960 года, мощность боеголовок снижалась приблизительно в той же самой пропорции, так что главной общей тенденцией стала миниатюризация, т.е. уменьшение в размерах хорошо известной конструкции.

Однако, известно, что было значительное число усовершенствований в терминах безопасности, надежности, пригодности к обслуживанию, защищенности и т.д. [9]. Так как все эти свойства требуют дополнительного пространства и веса, также должны были быть и улучшения в самих конструкциях.

Во-первых, все больший упор делался на производство энергии через синтез (который дает 50 kt/кг) по сравнению с производством энергии через расщепление (которое дает 17 kt/кг). Однако, это становится существенным если при этом значительно снижается общий вес. Это иллюстрируется самым большим из испытанных термоядерных устройств - советским взрывом в 60 Mt в октябре 1962 года. Чтобы уменьшить осадки, тяжелая урановая оболочка вокруг топлива синтеза была заменена свинцовой [11, стр.97]. Этот материал хорошо обеспечивает размножение нейтронов и отражение, позволяя циклу Джеттера пройти эффективно, но имеет маленькое сечение быстрого деления по сравнению с обедненным ураном. В результате, взрыв был почти "чистым синтезом", лишь несколько мегатон из общих шестидесяти было порождено делением [11, стр.97].³⁸ Однако, устройство без сомнения было тяжелым и громоздким. Значит, рост соотношения мощности к весу через увеличение мощности синтеза требует значительного снижения в весе и, что более конкретно, в весе оболочки (так как ее вклад в общий выход мощности меньше).

Во-вторых, достаточное продвижение в понимании физики второй ступени ведет к возможности отказа от свечи зажигания для инициирования термоядерного топлива. В результате, хотя свеча дает простое решение проблемы инициирования, она в то же самое время является радиоактивным компонентом, который, подобно делящемуся материалу в первой ступени ведет к трудностям с техобслуживанием и надежностью. Более того, так как свеча усиливается некоторым количеством DT газа, то вся вторая ступень станет гораздо проще и, по сути, пассивным устройством, если можно убрать свечу.

³⁸ По словам Харитона и Смирнова, двух ключевых участников советской ядерно-оружейной программы, этот взрыв был "97% чистым" синтезом [62, стр. 30]. Но устройство ни в коем случае не было "нейтронной бомбой": большая часть нейтронов синтеза осталась в свинце вместо того, чтобы уйти наружу.

На деле, обширные наземные и подземные испытания и значительный прогресс в теоретическом моделировании привели к более эффективной имплозии второй ступени. Это позволяет достичь не только большего сжатия (что дает возможность топливу гореть быстрее и поэтому снижает количество материала в оболочке), но также и нагреть топливо до большей начальной температуры, так что для инициирования топлива становится достаточным только режим Уилера и свеча становится ненужной.

На рис. 11 показана правдоподобная, но гипотетически, конструкция головной части W78/Mk-12A для МБР Minuteman-III. Базовыми положениями были что свеча отсутствует и что общая мощность на 50% приходит от деления и на 50% - от синтеза. Эти характеристики можно выполнить, имея 6 кг *LiD* и урановую оболочку весом в 100 кг. Мощность боеголовки W78 - 330 kt, а общий вес головной части Mk-12A - менее 360 кг [54]. С массой, равной массе головной части, это дает соотношение мощности к весу примерно равным 1. С другой стороны, с боеголовкой массой 200 кг, как подразумевает рис. 11, соотношение мощность-вес становится 1.65.

1.10 ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ИСКРОЙ

Когда мы обращаемся к более свежим (или более совершенным) конструкциям, наши рассуждения становятся все более спекулятивными. Одна из причин этого в том, что упор на высокомошные термоядерные боеприпасы неуклонно уменьшался с 1950 года и по сегодняшний день. Современное стратегическое оружие имеет мощность в диапазоне 0.1 Mt, в то время как схожие боеприпасы 60-х имели мощность в диапазоне 1 Mt. Так получалось частично потому, что большее количество боеприпасов меньшей мощности стратегически более эффективно, чем малое количество высокомошных боеприпасов.³⁹

Следовательно, по мере того как стратегия сместилась в направлении требования большого количества относительно маломощных легковесных термоядерных боеприпасов, технологические разработки подошли ближе к инженерным пределам, потому что при изменении размера одни физические явления масштабируются иначе чем другие и в случае термоядерных боеприпасов делать низкомошные заряды становится сложнее, чем делать высокомошные. Как следствие этого, без доступа к секретной информации также становится сложнее угадать, на какой компромис пришлось пойти, чтобы построить современный термоядерный боеприпас.

Однако, начиная с консервативных конструкций, в которых инициирование и удержание достигаются внешними средствами вроде свечи зажигания или тяжелой оболочки, очевидным путем к усовершенствованию является освоение метода термоядерных детонационных волн. В реальности, эта идея была частью исследований термоядерных боеприпасов с самого начала [39]. Возможно, она пришла из наблюдения того, что происходит в химическом взрыве. В нем детонационная волна состоит из ударной волны, за которой идет зона реакции (модель Зельдовича - фон Неймана - Доринга). Энергия, порожденная в химической реакции, такова, что детонационный фронт движется со сверхзвуковой скоростью. По этой причине поглощается вся масса ВВ еще до того, как оно начинает распадаться на части. Аналогичным образом, если центральное горячее пятно ("искра") формируется в термоядерном топливе, кото-

³⁹ Это особенно верно для случая, когда низкомошные боеприпасы независимо забрасываются как MIRV так, чтобы на заданную цель выходили несколько боеголовок, выводимых разными ракетами.

рое затем инициируется и начинает волну горения, распространяющуюся наружу⁴⁰ быстрее чем это может сделать “инерциально удерживаемое” топливо, то возможно достичь высокой эффективности горения без применения оболочки. Вдобавок, поскольку инициирование центральной искры требует меньше энергии, чем нагрев всего объема топлива, термоядерные детонационные волны в принципе предоставляют самый эффективный метод сжигания термоядерного топлива. Аналогично, поскольку не надо одновременно с топливом обжимать тяжелую оболочку, и так как сжатие топлива может быть адиабатическим, за исключением небольшой энергии, необходимой для нагрева искры, то происходит минимизация энергии, необходимой для имплозии и разогрева топлива.⁴¹

На практике формирование термоядерных детонационных волн очень трудно. Причина в том, что очень велика толщина таких волн: их размер того же порядка, что и размер типичного ядерного боеприпаса.⁴² Толщина возникает от способа, которым распространяется фронт термоядерной детонационной волны (т.е. от природы процессов, нагревающих холодное топливо во фронте волны) и от способа, как термоядерная энергия выделяется в зону реакции позади фронта детонации.

По крайней мере три механизма могут в принципе повлиять на распространение волны термоядерного горения и сделать ее сложнее и толще, нежели обычная ударная волна: фотоны [121, 123], заряженные продукты синтеза [126, 127] и, возможно, нейтроны, если сжатие достаточно велико [126, 127]. Тогда минимальная толщина детонационной волны устанавливается на уровне длин соответствующих излучений, которые измеряются (при твердых плотностях и термоядерных температурах) в сантиметрах или более.

Максимальная толщина детонационной волны находится на уровне результата произведения среднего времени термоядерной реакции τ_b на скорость ударной волны $M_S c_S$ [39, 124]. Следовательно, в первом приближении,

$$\lambda = \tau_b c_S M_S \quad 1.25$$

где c_S есть скорость звука, а M_S - число Маха. В пределе сильной ударной волны⁴³,

$M_S \approx \sqrt{2/\gamma \cdot (\gamma - 1)}$, то есть $M_S = 1.3 \div 2.1$ в зависимости, доминирует ли в плотности энергии плазмы вещество или излучение ($\gamma = 5/3$ или $4/3$). Трудность генерирования термоядерных детонационных волн в термоядерном заряде может теперь быть измерена через отношение Ω радиуса R к толщине λ термоядерной волны (1.25):

$$\Omega = \frac{R}{\lambda} \chi_S \quad 1.26$$

⁴⁰ Через более холодные наружные области топлива.

⁴¹ Это подтверждается детальным моделированием ЛТС, которое, однако, показывает, что показатели искрового инициирования на деле лишь немногим более чем в два раза превосходят показатели оптимального объемного инициирования [91].

⁴² Для сравнения, толщина обычной ударной волны находится на уровне длины свободного пробега молекулы, т.е. полностью пренебрежима на макроскопическом уровне.

⁴³ Точные уравнения ударно-волнового скачка, дающие после-ударное состояние в терминах предударного состояния и числа Маха, можно найти в разделе 85 [122]. Особый случай, применимый здесь, при котором ударная волна распространяется в стационарную среду, можно найти в [125].

Здесь R и λ рассчитываются при начальном сжатии топлива, и χ_s принимает во внимание факт сжатия топлива идущей наружу детонационной волной на дополнительный коэффициент⁴⁴ $\chi_s \approx (\gamma+1)/(\gamma-1)$, то есть $\chi_s = 4 \div 7$. Если Ω значительно больше единицы, такие волны находятся на грани осуществимости или неосуществимости. Консервативная оценка возможности термоядерных детонационных волн дается оптимистичным предположением, что в первом приближении эффектами излучения можно пренебречь (то есть, $M_s=1.3$, $\chi_s=4$ и c_s задается скоростью звука в веществе). Применяя $\tau_{DD}=2000/\chi$ для DD и $\tau_{LiD}=300/\chi$ для LiD , как определено ISRINEX, и рассчитывая c_s при средней температуре горения в 20 кэВ, обнаруживается, что термоядерные детонационные волны лишь маргинально (на грани) возможны в Майке, в ранней В-28, или в более продвинутой водородной бомбе типа W78. Другими словами, вероятно, что ни одна из этих бомб не была достаточно большой, и обжатие не было достаточно высоким, чтобы термоядерные детонационные волны стали играть важную роль.

Для получения большого отношения радиуса к толщине волны, наилучшей конфигурацией для второй ступени является сферическая геометрия. Это предполагается на рис. 12, где LiD находится в форме толстой полый оболочки, с возможным присутствием в ее центре некоторого количества DT газа. Для 10 кг LiD , что соответствует максимальной мощности в 250 kt при эффективности горения 50%, радиус несжатого топлива равен 15 см, и $\Omega \gg 20$ для $\chi=100$. Тогда инициирование искрой и термоядерные детонационные волны становятся возможными, и вероятно, что самые современные термоядерные боеприпасы основываются на такой конструкции. В этой конфигурации, из-за сферической геометрии, радиус второй ступени больше радиуса первой. Тогда естественным становится разместить первую ступень у передней стенки ГЧ, а вторую - у задней, что, очевидно, является нормальной практикой в США [15, стр. 14]. Это подтверждается тем фактом, что в случае французской ГЧ, запускаемой с подлодки - носителя баллистических ракет, (у нее вторая ступень находится спереди, а первая - сзади) малое пространство вокруг второй ступени было особой проблемой при проектировании [15, стр.14]

В головной части на рис. 12, сама боеголовка может весить всего 100 кг и иметь максимальный диаметр 30 см и длину около 60 см. Эти цифры совпадают с характеристиками боеголовки W80 для крылатых ракет, у которой соотношение мощность-вес составляет около 2 [54]. Аналогичные характеристики можно вывести из "физического пакета" ядерной бомбы B61, используя опубликованные фотографии [29] и информацию, что базовая конструкция W80 есть модификация бомбы B61 [54].

⁴⁴ Смотри предыдущую сноску.

Глава 2

РАЗРАБОТКА ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ В РАМКАХ ДВЗЯИ

2.1 ДОГОВОР О ВСЕОБЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Так называемый ДВЗЯИ, который был принят Генеральной Ассамблеей ООН 10 сентября 1996, положил конец *взрывным испытаниям* ядерного оружия. Однако, поскольку на лабораторный испытания ДВЗЯИ не распространяется, разработка ядерного оружия будет продолжаться, используя ряд технологий, которые совершенствовались во время последних 40 лет и которые сегодня могут эффективно заменить полевые испытания.

Лабораторные технологии имеют потенциал порядков улучшения величин по сравнению с традиционными методами, т.к. они не позволяют изучать многие процессы физики ядерного оружия, начиная с первых принципов, а производство ядерного оружия становится чисто техническим предприятием - лишенное научных неопределенностей, которые сделали ядерное оружие чем-то вроде черной магии.

Действительно, отсутствие взрывных испытаний наряду с широкими лабораторными возможностями создает новые перспективы для производства чрезвычайно надежного нового ядерного оружия, будь оно основано на старых или на новых принципах. Научное сопровождение арсеналов оружия (SBSS) [10] - эвфемистическая концепция, которая в отсутствие полномасштабных, лабораторных технологий помогает поддерживать минимальную компетенцию, необходимую для "надежного и безопасного хранения"[21]¹ - имеет потенциал революционизировать технологию ядерного оружия.²

Существует два главных класса ядерных испытаний, разрешаемых ДВЗЯИ: *субкритичные эксперименты* и *микро взрывы*.

Субкритичные эксперименты и условия для использования мишеней с делящимся материалом в лазере и других импульсных моделирующих установках описаны в разделе 2.2. Микро взрывам и вопросу их легальности в рамках ДВЗЯИ и ДНЯО посвящен раздел 2.3.

Сегодня, наиболее важным современным лабораторным инструментом для конструкторов ЯО является ЛТС. Эта моделирующая технология позволяет выполнять в лабораторных условиях термоядерные взрывы мощностью, равной нескольким кг ТНТ.

Различные установки ЛТС работают и строятся в нескольких странах (см. таблицу 2.1). Две крупнейшие - это Национальная Установка Зажигания (NIF) в LLNL в Калифорнии [329] и

¹ За дополняющей точкой зрения обратитесь к [20]

² Концепция "Научно обоснованного сопровождения арсенала" является главным образом детищем JASON - элитной группы ученых, консультирующих Правительство США. Эта группа консультантов была сформирована в 1960 году по инициативе ряда высокопоставленных ученых и советников Правительства США, с целью вовлечения очень способных молодых людей, в основном, физиков, в работы по национальной безопасности [18, примечание 1], [1]. За собранием документов, относящихся к JASON, и о его влиянии во время Вьетнамской войны, см. [1, 4, 5]. Хотя JASON традиционно старалась быть незаметной, ее деятельность стала гораздо видней после распада Советского Союза.

Лазер Megajoule во Франции [330]. Эти установки будут примерно в 20 раз мощнее, чем существующая NOVA в LLNL.

Для того, чтобы продемонстрировать потенциал NIF и других наземных экспериментальных установок (о которых будет идти речь дальше), ученые Ливермора повторили серию впечатляющих графиков, сравнивая возможности NIF с возможностями взрывных испытаний [10,20,100]. С такими подписями как “Изменение масштаба оружейной физики: высочайшая плотность энергии работает наилучшим образом” [10,стр.53], “Если вы хотите достигнуть оружейных условий, вам нужен крупный лазер” [20,стр.34} или “Плотности энергии NIF переключат плотности ядерного оружия” [10,стр.26] эти графики были воспроизведены в нескольких документах. Четыре из них в упрощенной форме обсуждались в *Energy and Technology Review* [100], ежемесячном журнале, публикуемом Ливерморской лабораторией.

Раздел 2.4 описывает основные особенности ЛТС и его военные применения в общих чертах. В разделах 2.5 - 2.11 девять вышеупомянутых графиков будут использоваться для иллюстрации важности ЛТС и других технологий для разработки ядерного оружия.³ Сравнивая возможности наземных экспериментальных установок с возможностями настоящих полномасштабных взрывов, например, испытания ядерного оружия, можно понять современную физику термоядерного оружия и продемонстрировать влияние ЛТС на горизонтальное и вертикальное распространение ядерного оружия.

В заключении этой главы, в разделе 2.12 будет дана оценка влияния ЛТС на распространение ЯО.

2.2 СУБКРИТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ ДОГОВОРА

Во время переговоров по ДВЗЯИ пять ядерных держав встречались конфиденциально несколько раз либо в двустороннем, либо в многостороннем порядке, для того, чтобы прояснить свои интерпретации текста договора, который лишь оговаривает “не производить никаких ядерных взрывных испытаний или любых других ядерных взрывов” (Статья I договора). В частности, они обменивались информацией о том, что они хотели бы разрешить или запретить договором ДВЗЯИ и договаривались об общем понимании среди них относительно “деятельности не запрещенной договором”.

Хотя точные термины этого понимания конфиденциальны, известно, что важный вопрос заключался в так называемых *гидроядерных испытаниях*,⁴ т.е. испытаниях ЯО или экспериментах с ВВ, которые ограничиваются подкритическим, небольшим надкритическим, нейтронным размножением.⁵ Для того, чтобы договор был квалифицирован, как “полностью всеобъемлющий”, т.е. “с нулевой мощностью”, и поэтому политически приемлемым для большинства стран-членов ООН, ядерные державы договорились запретить гидроядерные испытания, в которых делящийся материал движется к критичности.

Другими словами, любые ядерные испытания, где делящийся материал остается в подкритическом состоянии, разрешаются ДВЗЯИ. В частности, он позволяет изучать свойства деля-

³ Семь из этих графиков были репродуцированы и обсуждались в Информационном бюллетене INESAP [25]

⁴ За техническим обсуждением гидроядерных испытаний в контексте ДВЗЯИ, см. в особенности [116]

⁵ Точное определение этих терминов будет дано в разделе 3.2.

щихся материалов при любом давлении или плотности, используя любую экспериментальную методику, при условии, что образец небольшой и никогда не станет критическим.

В действительности, то, что подкритичные эксперименты запрещены ДВЗЯИ, стало определенно ясно весной 1997. Это произошло после того, как спор был начат объявлением Министерства энергетики США о проведении серии экспериментов с плутонием⁶ на полигоне Невада [117]. Первое заявление появилось в обзоре JASON :

“ДВЗЯИ, согласно записи переговоров, запрещает взрывы, производящие ядерный выход. США представляет это как то, что разрешаются эксперименты, в которых обычные ВВ собирают критическую массу делящегося материала” [118,стр.10]

Это заявление предполагает то, что чистый факт того, что критичность (а тем более надкритичность) не достигается, является существенным для соответствия положениям ДВЗЯИ. Другими словами, для США “ядерный выход” связывается с освобождаемой энергией во время цепной реакции, предполагая, что тип взрыва, который запрещается договором, таков, в котором энергия “не контролируется”. Это подтверждает Министерство энергетики США в своем заявлении о субкритичных экспериментах, произведенных сразу после публикации JASON:

“Подкритические эксперименты полностью согласуются с условиями ДВЗЯИ, подписанного Президентом Клинтонем в прошлом сентябре в ООН. Договор запрещает “любые испытания ЯО или другие ядерные взрывы”. Субкритичные эксперименты, с другой стороны, конфигурируются таким образом, что ни одна самоподдерживающаяся ядерная цепная реакция не может произойти, даже если будет специальный ядерный материал. “ [119]

Это официальное заявление предполагает, что могут иметь место ядерные взрывы, которые не запрещены ДВЗЯИ : единственным явным ограничением является то, что не должна случиться “самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция”. Остается открытым вопрос о возможности конструировать устройства, в которых освобождается ядерная энергия деления полуконтролируемого типа. Характеристики таких субкритичных ВВ будут обсуждаться в разделе 3.3.

Первое субкритичное испытание после подписания ДВЗЯИ было проведено США 2 июля 1997. Единственной официальной реакцией на него были заявления правительств Китая 3 июля, Индии 5 июля и Индонезии 19 июля 1997.⁷

2.3 МИКРО ВЗРЫВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ДОГОВОРА

Законность микро взрывов, т.е. детонации миллиметровых таблеток делящегося и/или синтезируемого материалов⁸ является очевидной и главной лазейкой ДНЯО и ДВЗЯИ.

⁶ Следует подчеркнуть, что важные составляющие данных, которые могут быть получены в подкритических экспериментах (например, “уравнения состояния, определяющие соотношения, свойства поверхностей, выбросы, откольные эффекты, и фазовые изменения плутония” [118, стр.2] могут быть также получены, используя лазерные методы [128, 141].

⁷ Суммарная численность этих трех стран равняется 41% населения мира.

⁸ Подобные микровзрывы соответствуют выходу мощности в диапазоне от 0.1 до 10 тонн!

Несмотря на это, во время переговоров по ДВЗЯИ были лишь ограниченные попытки - за исключением лишь Индии⁹ - включить ЛТС и другие типы микровзрывов в объем договора.

В действительности, отсутствие ссылки на ядерные микровзрывы является не только опущением текущего режима договора о нераспространении. *Термоядерный синтез*, например, никогда явно не упоминался ни в каком международном договоре по контролю за вооружением,¹⁰ и понятие "специальных ядерных материалов" относится только к расщепляющимся материалам таким, как плутоний или обогащенный уран. Эти неопределенности породили разные реакции. Например, на конференции 1975 по ДНЯО шведская делегация подняла вопрос об исследованиях лазерного синтеза.¹¹ США объявили:

"Такие взрывы не являются 'другими взрывными устройствами' в смысле ДНЯО и исследования в этой области разрешаются статьей IV.1"[2].

За этим заявлением последовало более существенное утверждение делегации США, которое отвечало на общий вопрос микросинтезе и микровзрывах:

"Вопрос был поднят относительно источников энергии, включая ядерные реакции, инициированные в миллиметровых таблетках делящегося материала лазерами или энергетическими пучками частиц. На основе настоящего понимания этого типа источников энергии, которые находятся все еще на раннем этапе исследования, мы сделали заключение, что он не составляет понятие ядерного взрывного устройства в рамках этого значения по ДНЯО или положениям Договоров по гарантиям МАГАТЭ "[3].

Эта интерпретация была поддержана Великобританией и Данией [3]. СССР не возражал.

В 1996 году, во время окончательных переговоров по ДВЗЯИ, вопрос о микровзрывах был вновь главным, особенно для ядерных оружейных лабораторий. Это иллюстрируется заявлением П. Робинсона, Директора СНЛ, третьей из трех исследовательских лабораторий оружейного комплекса Министерства энергетики США (ЛАНЛ, ЛЛНЛ и СНЛ).

"Я озабочен тем, что недавние политические дискуссии относительно содержания ДВЗЯИ могут ограничить возможность проводить адекватную программу управления запасами вооружения при отсутствии испытаний. Если Агентство по Разоружению и Контролю за Вооружением (ACDA) решит добиваться включения положений в договор, которые ограничивают ЛТС только лазерными драйверами и драйверами пучков частиц, основанных на переговорах 1975 по ДНЯО, тогда другие методы для возбуждения ЛТС, некоторые из которых разрабатываются здесь и за границей, будут нарушениями договора.

⁹ Индия предложила "запретить и предотвращать, и не выполнять, любые взрывы ядерного оружия, или любые другие ядерные взрывные испытания, или любые выбросы ядерной энергии, вызванные (быстрой) сборкой или сжатием материала деления или синтеза химическими взрывчатыми веществами или другими способами" [22]. Поскольку это предложение принято не было, страны-обладательницы ядерного оружия не пошли на компромисс чтобы увеличить охват договора, Индия в конце отказалась вступить в СТВТ.

¹⁰ Техническая и юридическая оценка охватываемых областей в существующих договорах по контролю вооружений (и различных соглашениях по экспортному контролю, имеющих силу) для технологий синтеза и других технологий не на расщеплении можно найти в [28].

¹¹ В то время Швейцария все еще дебатировала свое присоединение к ДНЯО и работы над различными аспектами взрывных зарядов на делении [143, 33] и синтезе.

Если бы язык ЛТС договора 1975 был перенесен на ДНЯО, некоторые мощные ускорители, которые используются сегодня лабораториями для моделирования разнообразных условий облучения и которые будут необходимы в будущем, должны быть запрещены. Такие ограничения не были частью понимания Директора лаборатории, когда мы говорили Президенту, что мы могли бы выполнить наши миссии без подземных ядерных испытаний. Нашим ожиданием было то, что больше не будет дальнейших ограничений на использование различных подходов к ЛТС. Мне кажется существенным то, что ЛТС разрешен ДВЗЯИ без таких ограничений,” [104,стр. 9-10].

Таким же образом, после подписания ДВЗЯИ 24 сентября 1996 Германия сделала следующее заявление:

“Германское правительство понимает, что ничто в этом договоре не должно интерпретироваться или применяться как предотвращение исследования и разработки управляемого термоядерного синтеза и его экономического использования.” [24].

Поэтому, получается, что ни ДНЯО, ни ДВЗЯИ не налагают ограничений на исследования ЛТС, включая возможность использования различных драйверов, начиная с огромного лазера или установки пучка частиц, которые используются в настоящее время для этой цели. Более того, даже не смотря на то, что концепция “нулевого выхода” применима к “любому взрывному ядерному испытанию”, выход взрывов микро синтеза не ограничивается ДВЗЯИ.

В то время, как отсутствие этого ограничения ясно для взрывов микро-синтеза, ситуация неясна для взрывов микро-расщепления. Это потому, что интерпретация ДВЗЯИ такова, что запрещаются только те эксперименты, в которых происходит само поддерживающаяся ядерная цепная реакция. Таким образом, не надо будет ждать официальных оправданий, которые могли быть даны, когда первый взрыв микро расщепления будет выполнен на NIF или другой установке, Однако, поскольку вся информация по мишеням ЛТС, в которых “делящийся материал доводится до критичности” [11,стр. 121] секретна и эксперименты по микрорасщеплению и микросинтезу могут быть сделаны незаметно, возможно, что такие эксперименты будут производиться секретно.¹²

2.4 ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ЛТС - т.е. инерциальные термоядерные взрывы - потенциально “варинат для энергетики, но прежде всего - моделирование оружия” [84]. Он был официально признан с самого начала [82, 303, 6], и в США уходит корнями к хорошо известной статье Д. Наколса и др. [79], первой несекретной американской статье по этой теме. Сегодня военная важность ЛТС подтверждена “управлением запасами оружия” и тем фактом, что возможность того, что ЛТС может стать основой термоядерного реактора все еще так же далека, как и использование ЛТС в магнитно-удерживаемом синтезе¹³.

¹² Одна из приводимых причин, по которой микровзрывы не включены в ДВЗЯИ, в том, что их запрет создает очень трудную проблему верификации.

¹³ Основные ограничения на сооружение термоядерных реакторов, которые носят в основном инженерный характер, не зависят от используемого метода удержания плазмы. [107]

Инерциальный термоядерный синтез имеет способность улучшения величин на несколько порядков по сравнению с традиционными методами моделирования по крайней мере для двух целей: изучения основ *физики оружия* и разработки новых *конструкций боеголовок*. О многих аспектах этих и других применений ЛТС было уже написано [6,7,10,21,20,100]. Эти работы компрометируют использование установок ЛТС для оружейных исследований, которые ранее требовали полномасштабных ядерных испытаний и измерения основных физических данных, необходимых для конструкции термоядерного оружия. Эти данные включают функции радиационной непрозрачности, зависящих от давления и температуры для элементов с большим Z , и уравнений состояния высокого давления, высокой температуры, которые ранее могли быть измерены только при подземных ядерных испытаниях.

С другой стороны, всеобъемлющая и независимая оценка полного значения ЛТС для *физики оружия* и новых *конструкций боеголовок* потребовала бы значительного объема исследований. В качестве предпосылки, такое исследование должно бы подтолкнуть к пониманию принципов существующего ядерного оружия за пределами того, что доступно в открытой литературе. ISRINEX был написан, как первый шаг в этом направлении и будет в дальнейшем разработан для того, чтобы включить то, что необходимо для оценки полного вертикального распространения ЛТС. Но более пристальный взгляд на физику термоядерного оружия, полученный при разработке ISRINEX 2.6 важен для прояснения основных военных применений ЛТС.

Рис. 13 - упрощенная диаграмма улучшенной мишени ЛТС того типа, который широко изучался для будущих ЛТС реакторов [102]. Такая мишень состоит из цилиндрической камеры, содержащей 5 мг дейтериево-тритиевой топливной таблетки. Типичные мишени для крупных моделирующих установок, которые в настоящее время строятся (NIF и LMJ) будут содержать от 1 мкг до 1 мг ДТ. Концепция *непрямого инициирования* относится к факту того, что в этом типе мишени энергия драйвера осаждается непосредственно на внешний слой топлива, но сначала конвертируется в термические рентгеновские лучи, ограничивающиеся цилиндрической камерой. В США эта концепция была рассекречена в то же самое время, что и принцип Теллера-Улама (Рис.3), используя практически ту же самую формулировку:

“В некоторых мишенях ЛТС излучение от конверсии сфокусированной энергии (например, лазера или пучка частиц) может содержаться и использоваться для сжатия и воспламенения физически отдельного компонента, содержащего термоядерное топливо” [11,стр. 103].

Поэтому неудивительно, что Рис. 13 и 3 очень похожи, за исключением метода, использованного для образования мягких рентгеновских лучей, заполняющих цилиндрическую камеру. В ЛТС, иницированном лазером, цилиндрическая камера - это цилиндр с отверстиями на обоих концах, позволяющими лазерным лучам нагревать внутреннюю поверхность цилиндра, вызывая эмиссию рентгеновских лучей. В ЛТС, иницированном тяжелыми ионами, эти ионы останавливаются в конвертерах (т.е. небольшие кусочки материалов, состоящих из тяжелых элементов, находятся в пределах цилиндра), которые сильно нагреты. С другими драйверами, например, пучки легких ионов или антипротоны, детали будут другими, но результат тот же: сильный нагрев радиационного корпуса или конвертеров, ведущий к рентгеновской эмиссии в цилиндр. Поэтому, любой тип ЛТС прямого инициирования сможет обеспечить моделирование физики Н-бомбы в лаборатории.

При любой энергии драйвера (для NIF и LMJ порядка 1 мегаджоуля, доставляемого к мишени) возможно использовать различные методы для увеличения производства энергии рентгеновских лучей до гораздо больших величин, которые были достигнуты прямой конверсией энергии пучка в термические рентгеновские лучи нагреванием радиационного корпуса или конвертера. Одним из таких методов является использование небольшого количества делящегося материала, доведенного до критичности пучками [111]. Поместив эту таблетку плутония или урана в положение рисунка 3 и допустив прохождение лазерных пучков или пучков частиц через радиационный корпус для подрыва делящегося материала, получаем миниатюрную водородную бомбу! По этой причине вся информация о “делящемся материале, доведенном до критичности” [11, стр. 107] и “капсулах, моделирующих конструкции ядерного оружия, выводы его или относящиеся к вопросам специального ядерного оружия” [11, стр.107] засекречена.

Показав, что физика ЛТС качественно та же самая, что и физика термоядерного оружия, теперь важно показать, что эта похожесть тянет и на количественный уровень. Рис.13 показывает, что типичный размер большой мишени ЛТС - порядка 1 см. Это должно сравниваться с диаметром самой маленькой водородной бомбы, а именно 155 мм артиллерийского снаряда (W82). Отсюда, внешний размер большой мишени ЛТС только 1\16 диаметра наименьшего полностью разработанного термоядерного оружия! Та же самая разница возникает при сравнении масс топлива. Например, при 100% эффективности сгорания и соотношении 50\50 деление\синтез, количество топлива синтеза в 100 кт водородной бомбе и в 1 кт нейтронной бомбе - 1 кг LiD и 0.01 кг Li_2DT , соответственно. При сравнении с порядком 10 мг к 1 мг DT топлива в таблетке ЛТС это соответствует масштабному множителю 10^6 для массы топлива и только 10^2 для объема топлива.

Но это сравнение учитывает только объем: масштабирование должно учитывать также сжатие. Для этого нужно включить физику термоядерного горения. Нужно вычислить Ω , т.е. отношение радиуса таблетки к толщине термодинамической детонационной волны при оптимальном сжатии для воспламенения и распространения горения, которое определяется с помощью (1.26). Выполняя это, а $\Omega \approx 1$ находится для сегодняшних 1мкг таблеток, вычисляется $\Omega \approx 10$ для более крупных, чем 1 мг NIF/LMJ таблеток.¹⁴ Поэтому с типом таблеток, которые будут иметься на крупных моделирующих установках, которые сейчас строятся, будет возможно изучать физику термодинамической детонации при условиях, которые эквивалентны условиям крупномасштабных термодинамических взрывов. Другими словами, физика 1-5 мг DT таблетки та же самая, что и у 100-300 кт водородной бомбы.

Конечно, можно возразить, что не все физические феномены могут быть смоделированы на установке ЛТС. Это относится к некоторым эффектам неустойчивости, которые не могут быть смоделированы до тех пор, пока мишень ЛТС слишком большая. Оказывается, что такие установки, как NIF и LMJ как раз нужного размера для этих эффектов и лабораторного изучения (см. раздел 2.7).

Поэтому ясно, что эксперименты ЛТС сделают свой вклад в продвижение *оружейной физики*. Это особенно верно, т.к. эксперименты ЛТС с микро взрывами могут выполняться при частоте примерно один взрыв в день, в то время как подземные взрывы ограничиваются одним в месяц. Более того, физика ЛТС более сложна, чем физика водородной бомбы. Действительно, “перенос излучения и гидродинамические вычисления должны будут подняться до

¹⁴ Этот простой качественный довод подтверждается результатами детальных компьютерных расчетов, опубликованных недавно [108, стр. 10-11]

высокого уровня, чтобы достичь воспламенения” [10, стр. 49]. Таким образом, моделирование ЛТС не только повторит на небольшом масштабе то, что в противном случае было бы выполнено при взрывах с высокими выходами, но и поднимет понимание оружейной физики до уровня, который может быть достигнут посредством подземных ядерных испытаний.

Относительно *конструкции оружия*, ситуация подобна, за исключением того, что принципы *нового* оружия будут более чем просто улучшения существующего. Новые типы оружия, которые стьнут результатами обширных исследований ЛТС, будут *ядерным оружием четвертого поколения*. Эти новые виды взрывных устройств, основанные на атомных и ядерных процессах, которые не ограничиваются ДВЗЯИ, описываются в главе 3. А мы обратимся к применениям ЛТС и другим лабораторным импульсным моделирующим методикам.

2.5 ОБЩАЯ ЭНЕРГИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ (РИС.14)

Самая очевидная разница между лабораторным микро взрывом и реальным испытанием - это *общая энергия* взрыва, т.е. мощность, которая отличается на $10^4 - 10^6$. Для того, чтобы правильно оценить эту разницу, необходимо учесть *удельную плотность энергии*, т.е. количество энергии на единицу веса. Это показано на Рис.14, где две оси - это общая энергия в испытании и удельная плотность энергии. Для обоих количеств энергия измеряется в килотонном эквиваленте тротила ($1 \text{ kt} = 4.18 \times 10^6 \text{ MJ}$). Для испытаний оружия общая энергия - порядка килотонн, в то время как для экспериментов на NIF - эквивалентна только нескольким килограммам ВВ.¹⁵ Однако, плотности удельной энергии, достигнутые в NIF, показывают существенный переключ с режимом плотности энергии, получаемый при испытаниях оружия. Поэтому NIF может обеспечить высокие плотности энергии, которые необходимы для термоядерных реакций. Двумя преимуществами NIF перед испытаниями оружия является то, что эксперименты на NIF могут проводиться гораздо чаще и без разрушения всех или почти всех диагностических и измерительных инструментов.

Для NIF показаны две области - с воспламенением и без него. Это различие отражает два альтернативных режима, в которых NIF будет использоваться для экспериментов оружейной физики. NIF без воспламенения характеризуется типом экспериментов, описанных в ссылке [100] и в первой половине этой главы (Рис. 15,16 и 17). Эти эксперименты относятся к фундаментальным в смысле исследования явлений, которые не поддаются упрощению, и не используют капсулы, заполненные термоядерным топливом. Вместо этого мишени - это фольги и другие материалы, которые помогают изучать поведение материалов и сред при высоких плотностях энергии, полученных при нагревании рентгеновскими лучами до экстремальных условий. Изученные фундаментальные явления - это уравнения состояния, непрозрачности и турбулентность сжимаемой жидкости.

NIF с воспламенением характеризует эксперименты, к которым мишень - это капсула, заполненная дейтерием-тритием (DT). На рис. 14 вычисленные плотности энергии прогнозируются для различных областях горячей капсулы. Поскольку плотности энергии, достигнутые в обоих режимах работы NIF, показывают существенный переключ по сравнению с режимом, получаемым при испытаниях оружия, NIF может использоваться для исследования подпроцессов, которые происходят в этом режиме. Среди более сложных областей исследования

¹⁵ Базовая энергия лазеров NIF и LMJ равна 1.8 МДж, то есть эквивалентна 0.43 кг ТНТ. Несколько документов (например, [19]) однако ссылаются на Установку с высокой мощностью (High Yield Facility HYF) у которой будет гораздо большая мощность чем у NIF, то есть 40-200 кг [99].

есть феномены, которые возникают из комбинаций или взаимодействий нескольких различных процессов. Это преобладающие процессы передачи энергии, которые имеют место при операциях ядерного оружия - гидродинамика плотности высоких энергий и перенос излучения, показанный на рис. 18,19 и 20 - гидродинамика на излучении, чистая гидродинамика и излучающий перенос.

Ясно, что с воспламенением максимальная плотность энергии та же, что и у NIF и при испытаниях оружия: около $20 \text{ kt} / \text{kg}$, немного больше, чем содержание энергии расщепления плутония и около четверти теоретического максимума отношения мощность - вес для термоядерного оружия - т.е. энергия, освобождаемая в общем синтезе смеси *DT*.

Заштрихованная область представляет высокую плотность энергии. Разделяющая линия с областью низкой плотности энергии соответствует удельной энергии $2 \text{ t} / \text{kg}$, т.е. около $8 \text{ мДж} / \text{г}$, энергии, необходимой для сжатия *DT* до $1'000$ раз ее плотность. Эта удельная энергия также соответствует энергии в делящемся материале: атомная бомба с эффективностью 0.01% , поэтому производится температура только около 100 эВ , недостаточная для иницирования ускорения (см. раздел 1.4).

Нижний предел масштаба плотности энергии составляет $1 \text{ кг} / \text{kg}$, содержание энергии ВВ. Это соответствует "гидродинамическим экспериментам", для которых полномасштабные сборки, использующие модельные ядерные материалы, применяются для экспериментального изучения гидродинамики процесса имплозии в начале эксплуатации оружия. "Подкритические эксперименты" и "гидроядерные испытания", в которых используются делящиеся материалы и в которых высвобождается ограниченное количество ядерной энергии, лежали бы на линии, соединявшей " гидро испытания первой ступени" и "испытанием оружия".

Строящиеся гидродинамические установки включают мощные рентгеновские машины такие, как DARHT. Подобно тому, как американские и французские ученые сотрудничают по строительству LMJ, они также ведут совместные работы по AIRIX [238], следующему поколению французской установки для гидротестов. Другие установки, показанные на рис. 14, представляют собой импульсные мощные машины, основанные на кумуляции электромагнитной энергии (Pegasus, Atlas, Saturne и Jupiter)¹⁶. В сравнении с системами с лазерным пучком технология с пучком частиц имеет преимущество объемов мишеней, которые приближаются к размеру более кубического сантиметра, в то время как мишени NIF составляют несколько миллиметров. Более того, в некоторых диапазонах параметров, показанных на рис.14 - 20, машины пучками частиц дополняют лазерные установки. Однако, как это будет видно на следующих графиках," очевидно, что NIF будет доминировать во всех диапазонах параметров, когда дело дойдет до воспроизводства условий в бомбе" [10, стр. 80].

2.6 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ (Рис. 15)

Уравнение состояния материала - термодинамическое отношение между содержанием энергии данной массы материала и его давлением, температурой и объемом.

Установки ЛТС могут быть использованы для измерения уравнений состояния высокого давления, высокой температуры в режиме, который был прежде достигнут только в подземных ядерных взрывах [10,140]. Лазеры относительно скромного размера - те , что существуют в

¹⁶ За обзором установок на импульсной мощности в США, см. [10, стр.71-88], [331]

Израиле [128], Индии [90,133] или Корее [332]. Однако, разработка высоко мощных установок ЛТС способствует улучшению качества этих данных по сравнению с тем, что можно было сделать с относительно небольшими лазерами [140] или подземными ядерными взрывами [134,138,139,133]¹⁷.

В действующих боеприпасах давление может достигать сотен гигабар и температур в несколько десятков кэВ в LiD. Как можно видеть на рис. 15, уравнение состояние в экспериментах на NIF не распространяется на этот режим. Они ограничиваются несколькими гигабарами и менее чем одним кэВ. Но это не проблема: при ограничении очень высокое давление\ температура есть хорошие теории, основанные на модели Томас-Ферми¹⁸. Именно в режиме гигабар работает установка NIF. В этой области NIF имеет преимущество очень чистых измерений. В контрасте с низко энергетическими системами она производит плоские ударные волны, которые гораздо легче анализировать, чем сферические ударные волны [140], и это позволяет уйти от проблемы предварительного нагрева, который может разрушить образец до воздействия ударной волны.

Недавно экстраординарный потенциал лазерной технологии для уравнений состояния выявлен по результатам первых точных измерений плотности и скорости ударной волны в дейтерии при давлениях до 200 гигапаскалей (2 мбара). Эти измерения были сделаны на NOVA в ЛЛНЛ [142] и показали расхождение в 1-2 раза с широко используемым уравнением состояния модели, на которой основываются контрольные таблицы [136].

2.7 НЕПРОЗРАЧНОСТЬ

Непрозрачность - это степень, до которой Среда поглощает излучение определенной длины волны. Это фундаментальное количество посчитать очень трудно, т.к. есть много переходов этапов ионизации, которые могут внести вклад в непрозрачность определенного элемента. Знание непрозрачности Среды необходимо для понимания, как Среда поглощает энергию и передает ее от одного места в другое. В ядерном оружии непрозрачность при рентгеновских длинах волн особенно важна, т.к. это диапазон энергии, в котором большая часть энергии переносится. особенно в случае конфигурации Теллер-Улам, где рентгеновские лучи от первичного взрыва используются для сжатия и воспламенения вторичной сборки, содержащей материалы синтеза.

Функции непрозрачности рентгеновских лучей, зависящих от температуры и давления для элементов с высоким Z до недавнего времени были секретными¹⁹, а теперь открыто обсуждаются на международных встречах [145]. Эти непрозрачности представляют небольшой интерес для астрофизиков²⁰. Но они очень важны для мишеней ЛТС и конструкции ядерного оружия.

¹⁷ Согласно ссылке [139, стр. 1124], ссылка [134] есть "первая открытая публикация измерений сжимаемости (конденсированных материалов) в условиях подземных ядерных испытаний"

¹⁸ За обзором, смотри, например, статьи Шалома Элизера в [137].

¹⁹ Значения непрозрачности для рентгеновских лучей при температуре ниже 0.35 кэВ были рассекречены в 1993 году [11, стр.104] как следствие "инициативы открытости" Министерства Энергетики США [12]. Отчет JASON [10, стр..55] предлагает, что можно рассекретить непрозрачности для температур дл 0.6 кэВ.

²⁰ Начиная в 1986 году, группа из 30 экспертов, набранных из 13 ведущих лабораторий и обсерваторий в области атомной физики и астрофизики из США, Европы, и Южной Америки выбрала ключевые исследовательские публикации, компьютерные расчеты и данные по элементам до железа, которые раскрывают самую интересную информацию по звездной непрозрачности [146].

На рис. 16 абсцисса - это температура материала. Образец помещается в кольраум, нагреваемый лазером NIF, создавая ванну рентгеновских лучей, которая доводит до желаемой температуры и плотности. Измерение выполняется проходящими рентгеновскими лучами, образованными лазером заднего осветителя, через полость для исследования образца. Рентгеновские лучи заднего осветителя могут иметь энергии от нескольких десятков эВ до нескольких кэВ (максимальная энергия рентгеновских лучей, произведенная первичным расщеплением). Температуры полости NIF 600-700 эВ должны быть достижимы, что даст возможность измерять непрозрачность при условиях, близких к условиям второй ступени [10, стр. 49].

Ордината на рис. 16 - это атомный номер образца. Нижняя и верхняя границы заштрихованной области соответствуют минимальной температуре полости, необходимой для открытия оболочки L или M исследуемого атома (отрезки при $Z=10$ и $Z=29$ - это соответствующие атомные номера со своими оболочками). Эксперименты на NIF могут дать уровни ионизации, достаточные для измерения непрозрачностей оболочки M в материалах таких же тяжелых, как уран ($Z=92$).

В моделирующем переносе излучающей энергии происходит существенное упрощение, когда материал достаточно непрозрачен к излучению. так что Среда локально находится в термодинамическом равновесии (ЛТР). В этом ограничении действует так называемое приближение Росселанда (или модель излучающей проводимости) [123]. Перенос излучения управляется уравнением нелинейной диффузии, а среда характеризуется единым параметром: средний свободный пробег Росселанда λ , который относится к средней непрозрачности Росселанда σ отношением $\lambda\sigma\rho = 1$, где ρ - плотность. Рис. 16а показывает, что на NOVA ЛТР инициируется столкновениями между электронами и ионами плазмы, в то время как на NIF можно добиться ЛТР на излучении, которое характерно для ядерного оружия.

Рис. 16а взят из [20]. На рис. 16б. взятом из [10], измерения непрозрачности представлены в различном диапазоне параметра: температура заменена отношением срока жизни мишени к времени термического равновесия (времени, за которое температуры электрона, иона и излучения становятся нулевыми). Это отношение находится между 1 и 100 для NIF, что касается испытаний, то непрозрачности Росселанда с оболочкой M тяжелых элементов могут быть измерены при условиях ЛТР на NIF.

2.8 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ (Рис. 17)

Главный вопрос в эксплуатации ядерного оружия - это вопрос стабилизации имплозии как первой, так и второй ступени. В ЛТС топливо должно быть сжато до плотностей от 1'000 до 10'000 раз больших плотности твердого состояния с температурой в центральной горячей точке около 5 кэВ. Успех в достижении таких высоких сжатия и температуры требует очень симметричного осаждения энергии и избежать хорошо известных нестабильностей (P-T, K-G и P-M), понимание которых также критично для конструкции оружия [10, стр. 39].

Поскольку мишени, выполненные из делящегося материала, могут использоваться на NIF, эту установку можно использовать для изучения материаловедения плутония в таких областях, как уравнение состояния, непрозрачности или откалывание. Однако, другой класс неопределенностей относится к образованию смеси на различных интерфейсах и ее влиянию на горение бустера [10, стр. 49]. Здесь опыт, полученный на NIF с плутониевыми мишенями, заполненными смесью D-T, может быть перенесен на понимание усиленного поведения ЯО и первых ступеней термоядерного оружия.

Нестабильности Р-Т [147, 148,149] развиваются, когда интерфейс между двумя жидкостями различной плотности ускоряется, а нестабильности К-Г случаются, когда одна жидкость получает касательную скорость относительно другой. Оба типа могут привести к ламинарному или турбулентному перемешиванию материалов, например, плутония и DT в имплозии на ВВ усиленной первой ступени или обедненного урана и LiD в рентгеновской имплозии на абляции термоядерной второй ступени. Избежать такого перемешивания очень важно для правильной эксплуатации ядерных боеприпасов.

В то время как нестабильности Р-Т и К-Г могут контролироваться до известной степени удачной конструкцией, наведенной турбулентности сжимаемой жидкости Р-М [150] избежать гораздо труднее. Эта нестабильность образует слой перемешивания, когда сильная ударная волна проходит через интерфейс между двумя материалами.

Программа работ по исследованию нестабильности на NIF включает изучение роста слоя перемешивания и эволюцию турбулентности сжимаемой жидкости от режима линейного роста с малой амплитудой (который свойственен имплозии ЛТС) до полной эволюции турбулентности (которая относится к боеприпасам). В случае слоев турбулентного перемешивания универсальные правила, которые контролируют ширину таких слоев перемешивания, как функция времени, были обнаружены в 1983 в Англии в Британском Центре по Исследованию Атомного Оружия²¹. Для разработчиков оружия было бы очень хорошо найти эти правила [100].

Из рис. 17 ясно, что в то время как среднее сжатие на NOVA позволяет проследить переход от линейной нестабильности к слабой турбулентности, сильной сжатие и большие объемы, доступные на NIF, позволяют проследить весь путь до турбулентной смеси [100]. Более того, поскольку размер образца меньше и длина волны возмущения регулируется на NIF, лабораторные эксперименты должны быть проще, чем испытания оружия. На правой стороне графика ордината дает давление ударной волны - p . На левой стороне дается примерное значение соответствующего фактора сжатия. Теоретически для сильной ударной волны максимальное сжатие равно 4 для плотной плазмы ($\gamma=5/3$), и оно равно 7 для излучающей плазмы ($\gamma=4/3$).

Рис. 17а взят из [20]. На рис. 17б, взятом из [10], ордината слева - не фактор сжатия χ , а M , число Маха Среды, на которую не воздействовала ударная волна. При $\chi=1$ M равно единице, а при $\chi=5$, M равно примерно шести²².

2.9 ГИДРОДИНАМИКА НА ИЗЛУЧЕНИИ (Рис. 18)

Существенной чертой физики ЯО является важность эффектов излучающей плазмы. Аналогов нет в других областях науки кроме некоторых частей астрофизики.

На рис. 18 диапазон параметров гидродинамики на излучении иллюстрируется с точки зрения относительного излучающего потока и среднего свободного пробега Росселанда λ в уравне при нормальной плотности. Этот средний свободный пробег (около 2 мм при 10 кэВ и

²¹ См. обзор в [150].

²² Уравнения, задающие s и r как функция M , приведены как уравнения (85.7) и (85.8) в [122]. Аналогичные уравнения для сферической симметрии даны в [130].

около 0.1 мм при 2 кэВ [143]) дает представление о пределе толщины атомной бомбы с точки зрения воздействия рентгеновскими лучами или о глубине проникновения лучей в поверхность корпуса водородной бомбы.

По значению λ можно сделать вывод о том, что типичные излучающие температуры NOVA, NIF и испытаний оружия составляют около 1.8, 5 и 10 кэВ. Если мы возьмем температурную зависимость T^4 закона Планка, соответствующие излучающие потоки энергии имеют относительные значения, показанные на горизонтальных осях, в случае с NIF - относительно близкие к испытаниям оружия, а в случае с NOVA - примерно в 1'000 раз ниже.

2.10 ЧИСТАЯ ГИДРОДИНАМИКА (Рис. 19)

Ударное сжатие и нагревание взрывающихся материалов описывается в гидро динамике, поддающейся масштабированию, при условии, что радиационные эффекты игнорируются (чистая гидродинамика) и различные ионные компоненты плазмы находятся в локальном термическом равновесии (гидродинамика двух жидкостей). Такие условия скорее всего преобладают во второй ступени во время имплозии, до воспламенения термоядерных реакций.

Рис. 19 показывает соответствующий диапазон параметров, В привязке к рис. 15 можно отметить, что NIF способна производить ударные динамические давления нескольких гигабар. Это позволяет моделировать условия имплозии эквивалентные условиям эксплуатации ядерных боеприпасов.

В плазме температуры различных образцов частиц определяются процессами переноса энергии, которые зависят от соответствующих электрических зарядов и относительных масс. электроны и ионы различных видов могут иметь разные температуры. Рис. 19 показывает, что условия ЛТР, достигнутые на NIF, сходны с условиями испытаний оружия, с примерным отношением температур тяжелых ионов к температуре легких 0.5.

2.11 ИЗЛУЧАЮЩИЙ ПЕРЕНОС

Рис. 20 показывает сходность условий излучающего переноса в NIF и испытаниях оружия. $E_{rad} \propto T^4$ и $E_{mat} \propto T$ - плотности энергии вещества и излучения. В соответствии с рис. 18 существует отношение около 20 в среднем свободном пробеге между NOVA и испытанием боеприпасов или NIF, и фактор 100-200 в $E_{rad}/E_{mat} \propto T^4$. Эксплуатация NIF происходит явно в излучающей области, и диффузная аппроксимация применима, поскольку мишени NIF больше, чем средний свободные пробег излучения.

2.12 ЛТС И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

В оценке JASON научного сопровождения арсеналов оружия [10] было сделано следующее заявление:

“Технология NIF - это не ядерное орудие, не может приниматься за ядерное оружие и требует технологических знаний гораздо больших, чем требуется для ядерного оружия. NIF внесет вклад в научное понимание вторых ступеней термоядерного оружия, но без мощных подземных испытаний (≈ 150 кт по действующему договору о пороговом запрещении испытаний ЯО), нереально

ожидать каких-либо существенных улучшений от экспериментов NIF” [10, стр.54].

Это утверждение²³ очень правильно, т.к. мощные ядерные боеприпасы, находящиеся в настоящее время в арсенале, основаны на принципах, обнаруженных в 40-е и 50-е гг. После пятидесятилетних исследований даже при том, что научное понимание многих деталей неполное, существующие типы термоядерного оружия достигли такой степени совершенства, что немного можно сделать для их существенного улучшения. Более того, они уже имеют необходимые качества, которые делают их годными для военного использования: они просты, износостойкие, надежные, смертоносные и относительно недорогие. Поэтому маловероятно, чтобы термоядерные боеприпасы существующего типа исчезли, если только они не будут запрещены международным законом.

Новые типы боеприпасов, которые будут результатом глубокого исследования ЛТС, будут четвертым поколением ядерного оружия, т.е. взрывными устройствами, основанными на атомных и ядерных процессах, которые не подвергаются ограничению со стороны ДВЗЯИ. Эти физические процессы - которые рассматривались для использования в военных целях десятилетиями - обсуждаются в следующей главе.

Разработка этих новых боеприпасов происходит при понимании физики термоядерных взрывов, которые будут результатом использования установок ЛТС таких как NIF и LMJ. Тот факт, что общая энергия в этих установках эквивалентна только нескольким кг ТНТ, не будет ограничением: производство более высоких мощностей - всего лишь дело масштабирования. Основная проблема, для которой уже ищутся решения (см. разделы 3.7 и 3.8), - это создание компактной (но единственного использования) первой ступени для замены огромного лазера, который нужен для лабораторного взрыва таблеток. Вот почему физические процессы, “разрешенные ДВЗЯИ”, так важны: они дадут средство для конструирования чрезвычайно компактных первых ступеней, т.е. первых ступеней, делающих возможным использование таких экзотических материалов, как антивещество, ядерные изомеры, супертяжелые элементы или металлический водород, или использование процессы магнитного сжатия, горения субкритического расщепления или лазеров на ВВ. Если такие компактные первые ступени будут, знания, полученные при исследовании ЛТС будут использоваться для создания компактных вторых ступеней, которые будут использовать относительно недорогие термоядерные топлива (дейтерий, тритий, литий) в качестве основного взрывного заряда.

Однако, как было показано в предыдущих разделах, безотносительно к четвертому поколению оружия, лазерные и другие установки с высокой плотностью энергии могут использоваться для исследования многочисленных аспектов физики сегодняшних ядерных боеприпасов. Эти возможности обобщаются Shalom Eliezer (Израиль) в предисловии [132] к специальному выпуску журнала *Laser and Particle Beams*, в который внесли свой вклад Китай, Япония, Израиль, Великобритания и Россия.²⁴ Более того, значительная ценность технологии ЛТС для потенциальных распространителей ЯО признана в работе под заголовком “NIF и

²³ Аналогичное заявление сделано в 1996 году в JASON отчете по ЛТС: “Открытость нужна, чтобы вдохнуть уверенность среди мирового сообщества, что научно-обоснованное сопровождение арсенала не прячет разработку нового поколения ядерного оружия, возможность для которой каким-то образом появляется благодаря связи между ЛТС и физикой вторых ступеней” [19, стр. 12]

²⁴ Элизьер приводит шесть областей исследований ударных волн, вызванных лазерными пучками или пучками частиц: уравнения состояния, фазовые переходы, динамическое поведение материалов, электрическая проводимость, атомная физика, и гидродинамические неустойчивости. [132, стр.9].

вопрос нераспространения”[103], подготовленной Отделом по контролю за вооружениями для министра Министерства Энергетики США.

“Термоядерные боеголовки, разработанные США и СССР в 50-е годы, были огромные, тяжелые и сконструированы скорее для доставки большим самолетом, а не ракетой. через широкую программу ядерных испытаний термоядерные боеголовки стали меньше весить и их стало легче доставлять. Без ядерных испытаний распространитель не смог бы разработать такие термоядерные боеприпасы, но в зависимости от его мотивации для разработки оружия, ему могут не потребоваться дальнейшие поставки. Современный распространитель с доступом к компьютерным программам ЛТС и рабочим станциям имел бы больше средств для конструирования вторых ступеней, чем США, Великобритания или СССР в 50-е или Франция и Китай в 60-е. К тому же многие концепции были секретны”²⁵ [103].

Таблица 2.1 представляет собой компиляцию основных характеристик главных работающих или планируемых ЛТС установок в мире. В последней колонке “С” означает, что установка строиться, а “D” - что она находится на стадии конструирования. Длина волны в микрометрах.

В этой таблице энергия установки - это номинальная максимальная энергия. Это потому, что связь луч-мишень является функцией природы луча (т.е. луч лазера или частицы) и его энергии, например, это длина волны фотона случае с лазерным лучом.²⁶ Отсюда, сравнения относительных возможностей установок ЛТС нетривиально. Требуется некоторая конвенция. Например, мощность установок с микровзрывом может быть выражена как общая энергия, которую лазерная система может доставить до мишени при определенной длине волны. В настоящее время применяя такую конвенцию до кратчайшей длины волны, самая мощная энергия лазера достигает примерно 2 кДж для России и Китая и около 1 кДж для Великобритании. Номинальная энергия LMJ будет такой же как и у NIF, т.е. 1' 800 кДж, что соответствует энергии порядка 600 кДж при кратчайшей длине волны.

Недавно в обзоре американской программы по ЛТС появился график, показывающий прогнозируемую номинальную мощность мишени ЛТС. Он иллюстрирует, что энергия драйвера около 0.9 мДж необходима для того, чтобы достичь температуры 15-18 кэВ в капсуле ЛТС, что вызовет воспламенение и приведет к приросту мишени большему чем единица. Номинальная энергия 1.8 мДж соответствует двум запасам прочности, что должно позволить наблюдать плато примерно постоянного прироста (≈ 6) для энергий драйвера между 0.9 и 1.8 мДж.

Понятно, что установки ЛТС с номинальными энергиями в диапазоне 0.1 - 1 мДж не будут достаточно мощными чтобы достичь воспламенения. Вот почему, Япония не будет строить установку Конгох, а более крупную Койо. Такой же вывод можно сделать относительно проекта Германии NIBALL : поскольку взаимодействия луча тяжелых ионов с мишенью хорошо

²⁵ Основным доводом Отдела Агентства по контролю вооружений и разоружением (ACDA) для снятия со счетов воздействия NIF и ЛТС на распространение ОМП (и поэтому, поддержка строительства NIF) является:

“Безотносительно доступа к NIF или любой другой ЛТС установке, нельзя исключить что технологически развитая страна сможет поставить на вооружение очень консервативно спроектированный термоядерный заряд, который будет представлять достоверную угрозу, без ядерных испытаний” [103, стр. 27].

²⁶ Эта длина волны может быть укорочена за счет оптического умножителя частоты, который улучшает связь пучок-мишень, но за счет понижения энергии пучка.

поняты, используя низкоэнергетические установки типа KALIF, строительство полномасштабной установки на тяжелых ионах можно начинать прямо сейчас. В противоположность высокоэнергетической лазерной технологии технология на тяжелых ионах хорошо известна и используется в нескольких фундаментальных лабораториях, особенно в Европе (Дармштат) и Церне (Женева).

В заключении, строительство крупных установок ЛТС, таких как NIF и LMJ даст гонке вооружения новое ускорение. Нужно понимать, что в результате будут значительные последствия в других странах. Япония и в меньшей степени Германия уже имеют ЛТС и другие установки качества сравнимого с подобными установками США и Франции. Эти страны будут увеличивать мощность их ЛТС драйверов на пучках лазера и частиц. Индия²⁷, Израиль²⁸ и Корея оснащают себя сами ядерным оружием четвертого поколения, обходя получение предшествующих поколений термоядерного оружия.

²⁷ Мы не нашли ссылок на какой-либо лазер, мощнее чем 20-50 Дж Nd:стекло лазер, на который ссылаются в [133]. Тот факт, что Индия работает над этой технологией, проиллюстрирован докладом "Разработка высокомогущного стеклянного лазера для ЛТС в Индии" за авторством А.С. Иоши на встрече технического комитета МАГАТЭ по драйверам и установкам воспламенения для ЛТС в университете Осака, Япония, 10-14 марта 1997 года. Вдобавок, как и в других вопросах, связанных с ядерной энергией, не следует недооценивать способности Индии. См., например [35].

²⁸ Нет открытых источников, показывающих, что энергия АЛАДИНа была увеличена свыше его уровня 1985 года, то есть 100 Дж [128]. Следует подчеркнуть, однако, что израильские ученые работают в тесном сотрудничестве с американскими учеными и находятся на передовом крае нескольких сложных задач, например, расчет непрозрачности [144].

Страна	система	место	энергия, кДж.нс	кол-во лучей	длина волны	
<i>Пучки частиц</i>						
США	Saturn	SNL	400/5	36		
	PBFA-II-Z	SNL	1500/20	36		
	ILSE	SNL	6400/10	16		D
Германия	KALIF	Karlsruhe	20/5	1		
	HIBALL		5000/20	20		D
<i>Стеклянные лазеры</i>						
США	Omega	LLE	3/0.6	24	0.35	
	Omega-UG	LLE	40/3	60	0.35	C
	Nova	LLNL	50/1	10	0.35	
	NIF	LLNL	1800/5	192	0.35	D
Япония	Gekkp-XII	Osaka	20/1	12	1.06	
	Kongoh	Osaka	300/3	92	0.35	D
	Koyo	Osaka	4000/5	400	0.35	D
Франция	LULI	Palaiseau	0.5/0.6	6	1.06	
	Octal	Limeil	0.9/1	8	1.06	
	Phebus	Limeil	14/2.5	2	0.53	
	Megajoule	Bordeaux	1800/15	188	0.35	D
Китай	Shen-Guang-I	Shanghai	1.8/1	2	1.06	
	Sh-G-II	Shanghai	6.4/1	8	1.06	
	Sh-G-III	Shanghai	60/1	60	0.35	D
Англия	Helen	AWE	1/1	3	0.53	
	Vulcan	RAL	3/1	6	0.53	
Россия	Дельфин	Москва	3/1	108	1.06	
Италия	ABC	Frascati	0.2/2	2	0.53	
Израиль	ALADIN	Soreq	0.1/3	1	1.06	
	Continuum	Soreq	0.07/7	1	1.06	
Индия		Bombay	0.05/5	1	1.06	
Корея	Sinmyang -III	Taejon	0.08/0.5	1	1ю06	
<i>Лазеры KrF</i>						
США	Mercury	LANL	1/5	1	0.25	
	Nike	Nrl	5/4	56	0.25	C
Япония	Ashura	Ibaraki	0.7/15	6	0.25	
	Super-Ashura	Ibaraki	0.85/0.5	112	0.25	C
Англия	Sprite	RAL	0.09/60	6	0.25	
	Titania	RAL	0.85/0.5	1	0.27	
<i>Иодные лазеры</i>						
Россия	Искра-5	ВНИИЭФ	15.0ю25	12	1.30	
Германия	Asterix	Munich	1/0.45	1	1.30	

Таблица 2.1 : Основные действующие или планируемые установки ЛТС. В последней колонке С означает то, что установка строится, а D - что находится в стадии конструирования. Длина волны - в микрометрах.

Глава 3

Четвертое поколение ядерных вооружений

3.1. Введение

По мере развития науки и технологии, все новые и новые вооружения изобретаются и разрабатываются. Однако, поскольку развитие науки — довольно медленный процесс, новые типы вооружений могут рассматриваться в течение очень долгого времени и привлечь внимание общественности только после того, как они достигнут стадии разработки и развертывания. Так, например, произошло со Стратегической Оборонной Инициативой президента Рейгана, когда в марте 1983 года многие люди впервые услышали о лучевом оружии высокой мощности, хотя эти вооружения серьезно рассматривались по меньшей мере со Второй Мировой Войны.

В случае ядерного оружия, многие его различные типы — некоторые из которых основаны на физических процессах, которые отличаются от сегодняшних термоядерных вооружений — исследовались в течение долгого времени. Речь идет о бомбах чистого синтеза, бомбах, инициируемых лазером, кумулятивных термоядерных зарядах, новых зарядах, основанных на ядерных изомерах, сверхтяжелых элементах, металлическом водороде и т.д.¹ До сих пор ни одна из этих концепций не привела к реальному оружию. Но это может быть только вопросом времени, особенно с тех пор, как в некоторых из этих концепций были достигнуты значительные успехи.

В этой главе мы описываем те из этих концепций, которые лучше всего документированы и анализируем их потенциал становления частью нового поколения ядерного оружия.² Мы ограничимся теми, которые могут привести к новым типам ядерных зарядов. Например, мы оставим вне рассмотрения такие разработки, как лучевое оружие высокой мощности, рентгеновские или гамма лазеры, электромагнитные импульсные вооружения действующие на ИТС [16], термоядерные кумулятивные (сформованные) заряды [50]. Более того, мы сфокусируемся в первую очередь на их научной осуществимости, оставляя вопрос технической осуществимости на раздел 3.8. Мы начнем с рассмотрения основных характеристик предыдущих поколений ядерных вооружений:

Первое поколение ядерного оружия— урановые или плутониевые атомные бомбы. Наука и технология этого оружия широко распространена и присущая ему простота такова, что его успешная разработка не требует ядерных испытаний. Сегодня, это оружие составляет основную угрозу горизонтального распространения. Основное военное качество этого оружия в том, что оно может быть очень надежным, прочным и компактным. Примером может служить артиллерийский ядерный снаряд W33 (впервые поставленного на вооружение в 1956 году), имеющий энерговыделение 5-10кТ и вес примерно 100 кг.

¹ Некоторые из этих концепций уже рассматривались в открытой литературе, в особенности Фридвартом Уинтербергом [110, 50] и П.К.Ийенгаром [75, 78]. См. также [77].

² Краткое описание некоторых концепций ядерного оружия четвертого поколения ранее появилось в «Информационном Бюллетене INESAP» [76].

Второе поколение ядерного оружия — двухступенчатые термоядерные устройства. Бомба деления с тритиевым ускорением используется для имплозии и зажигания вторичной системы, в которой реакции синтеза производят большую часть выделяемой энергии. Разработка этого оружия потребовала обширных испытаний и привела к оружию большой мощности (100-500кт), у которого соотношения между энерговыделением и весом были примерно в двадцать раз больше, чем у лучших образцов первого поколения. Прогресс этого оружия был очень медленным и научное понимание деталей вторичных систем все еще не является полным.³ Однако, после более чем 50 лет исследований и разработок, и после почти двух тысяч испытательных взрывов, существенный прогресс в этом поколении оружия не ожидается. Продолжение полномасштабных испытаний, возможно, никогда не изменило бы эту ситуацию, поскольку имеется большое число сложных явлений, которые происходят одновременно в течение доли микросекунды — времени взрыва водородной бомбы. Это, возможно, основная техническая причина, по которой Договор о Всеобъемлющем Запрещении Ядерных Испытаний (ДЗВЯИ), является действительно приемлемым с военной точки зрения.

Со стратегической точки зрения, важно понять, что современные ядерные вооружения второго поколения обладают всеми необходимыми качествами, делающими их пригодными для военного использования: они просты, прочны, безопасны, надежны, относительно недороги и обладают мощными поражающими факторами. Поэтому маловероятно, что они исчезнут, если только не будут запрещены международным законом. Например, сокращение, почти на половину, числа вооружений в Американских и Российских арсеналах является в основном результатом списания устаревшего оружия, устранением оружия, разработанного для устаревших или сомнительных военных задач, и огромных проблем, связанных со старением производственных мощностей и поддержанием больших запасов ядерного оружия.

Третье поколение ядерного оружия составляют боеголовки “точного” или “усиленного” действия — такие как Боеголовка Усиленного Радиационного действия (Enhanced Radiation Warhead — ERW), Уменьшенной Остаточной Радиоактивности (Reduced Residual Radioactivity — RRR) или Электромагнитные Импульсные бомбы (Electromagnetic Pulse (EMP) bombs), устройства горячих рентгеновских лучей для противоракетных систем, “чистые” заряды для возможного использования в мирной деятельности — или вооружения “направленной энергии” с ядерной накачкой, производящие лучи или струи Рентгеновских лучей, электромагнитных волн, частиц, плазмы и т.д. Подобно многим видам ядерного оружия, эти устройства так и не нашли действительно убедительного военного использования.⁴ Более того, ни одно из них не дало решающего преимущества (такого, как существенно уменьшенные побочные разрушения, отсутствие радиоактивности и т.д.) и их разработка потребовала бы большого числа испытательных взрывов. По этим причинам, разработка третье-

³ “Мы не полностью понимаем физические процессы, участвующие в работе ядерного оружия” [100, с.24]. “Мы не понимаем процессы в ядерном оружии достаточно хорошо, чтобы точно рассчитать перенос энергии внутри оружия”. [100, с.30]

⁴ Типичный пример — так называемые нейтронные бомбы (ERW), которые не доказали свою эффективность в качестве противотанкового оружия [70, 71, 72].

го поколения ядерных вооружений испытывает наиболее сильное воздействие со стороны ДЗВЯИ [74].

Четвертое поколение ядерных вооружений, основанное на таких процессах, с энерговыделениями от 1 до 100 тон ТЭ, может меньше нескольких килограмм. Их техника может широко использовать нано-технологии и разнообразные методики миниатюризации, разрабатываемые, например, для изготовления мишеней ИТС. Их технологии серийного производства будут похожи на технологии производства микрокомпьютеров. Поскольку эти виды оружия будут содержать только небольшое количество дорогостоящих специальных материалов, их стоимость будет низкой. Их небольшой размер и вес сделает их подходящими для доставки при помощи артиллерийских или танковых снарядов, кластерных бомб, небольших ракет, беспилотных самолетов, крылатых миниракет и т.д.

3.2. Подкритические и микровзрывные заряды.

Для того, чтобы рассматривать подкритические заряды, полезно вспомнить некоторые элементы нейтронной физики.

Если k_{∞} — среднее число нейтронов, производимое делением (и, возможно, другими процессами) на нейтрон, поглощаемый в бесконечной среде, и l — число нейтронов, выходящих из конечной сборки, действующим коэффициентом умножения нейтронов, или коэффициентом критичности будет:

$$k = k_{\infty} - l. \quad (3.1)$$

Средний срок жизни нейтрона в поглощающей среде, т.е. время τ_a между его появлением и поглощением есть:

$$\tau_a = \frac{\lambda_a}{v}, \quad (3.2)$$

где λ_a — средний свободный путь поглощения и v — средняя скорость нейтрона. Для каждого поколения нейтронов, то есть для каждого интервала τ_a , число n нейтронов в сборке приращивается на $n(k-1)$. Таким образом временная зависимость изменения числа нейтронов

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k-1}{\tau_a} n = \alpha n, \quad (3.3)$$

где α называется “ α России”.⁵

При постоянных k и τ_a , и $n(0)$ - начальном числе нейтронов, решение этого уравнения имеет экспоненциальный характер:

$$n(t) = n(0) \exp\left(\frac{k-1}{\tau_a} t\right). \quad (3.4)$$

⁵ В ядерном взрыве α является функцией времени, поскольку все параметры, такие как геометрия, плотность и ядерные свойства делящегося материала изменяются во времени во время цепной реакции. В первом приближении $\alpha \approx v \sigma_f (k-1)$, где σ_f — поперечное сечение деления, v — число нейтронов на деление и χN_0 — плотность числа делящихся ядер, и χ — коэффициент сжатия.

Когда коэффициент критичности $k=1$, число нейтронов остается постоянным и сборка называется «критичной». Это — нормальный эксплуатационный режим ядерного реактора, в котором имеется стабильная цепная реакция. Если $k>1$, сборка — «сверхкритичная», и число нейтронов увеличивается во времени экспоненциально. Цепная реакция — расходящаяся и приводит к взрыву сборки. Наконец, если $k<1$, сборка — «подкритичная» и число нейтронов экспоненциально уменьшается во времени, что подразумевает, что самоподдерживающаяся цепная реакция отсутствует. Однако это не означает, что подкритичная сборка не может быть использована для производства атомной энергии или для осуществления ядерного взрыва. Действительно, поскольку при каждом поколении нейтронов, число нейтронов в сборке n умножается на k , общее число нейтронов, произведенное начальным числом $n(0)$ есть

$$n(\infty) = n(0)(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = \frac{n(0)}{1 - k}. \quad (3.5)$$

Этот ряд конвергирует (сходится) для $k<1$. Таким образом, для подкритической сборки, начальное число нейтронов умножается с коэффициентом $G=1/(1-k)$. При k близком к 1, этот коэффициент приращения становится очень большим. Отсюда, при впуске достаточного числа начальных нейтронов в подкритическую сборку, возможно произвести большое число делений, и таким образом высвободить значительное количество ядерной энергии. Эта методика называется *подкритическим горением*.

Рисунки 21 и 22, взятые и изменениями из ссылки [115], являются результатами детального компьютерного моделирования подкритического горения малых таблеток плутония. Эти таблетки имели вес 14, 70 и 700 миллиграмм, и целью этого моделирования было определение (как функцию от сжатия) числа начальных нейтронов, необходимого для 100% сгорания, что соответствует выходу 0.24, 1200 и 12000 кг энергии деления. Очевидно, что энерговыделения в диапазоне от 0.24 до 12 тон ТНТ представляют значительный военный интерес. Более того, при подкритическом горении качество делящегося материала имеет малую важность: реакторный плутоний столь же хорош, как и оружейный.⁶

Рисунок 21 показывает, что при плотности делящегося материала порядка 10^3 - 10^4 г/см³, то есть для коэффициентов сжатия порядка от 10 до 1000, число начальных нейтронов, необходимых для полного сгорания около 10^{18} . В том же диапазоне, работа сжатия для достижения необходимой плотности плутония эквивалентна энергетическому содержанию примерно 100 г химической взрывчатки, как это можно видеть на Рис.22. При допущении 10% эффективности превращения химической энергии в работу сжатия, это означает, что с 1 кг бризантных ВВ и менее 1 г плутония теоретически возможно изготовить очень компактный заряд деления четвертого поколения с энерговыделением в несколько тон.⁷ При практическом осуществлении этой концепции двумя главными проблемами являются способ сжатия и начальный источник нейтронов. Возможным решением этих проблем является магнитное сжатие и малое количество

⁶ Все изотопы плутония — делящиеся при быстрых нейтронах, например, см.[37], и проблема пред-инициации отсутствует при подкритичном горении.

⁷ Энерговыделение неядерных боеголовок современных ракет и гравитационных(?) бомб ограничено весом максимум в 0.1 или несколько тон ТЭ.

во антипротонов (см. раздел 3.5) для того, чтобы произвести необходимое число начальных нейтронов [215]. Как видно из рис.21, меньше микрограмма антипротонов будет достаточно для этой цели.

Если опять взглянуть на Рис. 21, можно заметить, что при достаточном сжатии число начальных нейтронов резко сокращается. Это происходит потому, что когда $k \rightarrow 1$, приращение возрастает по мере приближения сборки к критичности, где в принципе: одного нейтрона достаточно для начала цепной реакции. Это приводит к идее *зарядов микроделения*, в которых небольшая таблетка делящегося материала приводится к критичности при помощи лазера или другими средствами [109,110, 111]. Сначала думали, что этот метод может быть использован для зажигания синтезируемых материалов [110], и таким образом это дает легкий путь к ИТС и почти чисто-термоядерным зарядам для военных целей.⁸ Но скоро было обнаружено, что основная трудность с микроделением — проблема инициирования цепной реакции [113]. На самом деле, при микроделении время стабильного состояния сильно сжатой таблетки столь мало, что вероятность спонтанного деления, выпускающего начальные нейтроны, становится пренебрежимо малой. Более того, использование внешнего источника нейтронов почти невозможно, поскольку очень сложно доставить и сфокусировать поток нейтронов на очень малую мишень как раз в нужное время.

Исходя из этого, было предложено, что начальные нейтроны могут прийти из реакции ДТ синтеза, произведенной в центре [112] (или в рефлекторе [114]) делящейся таблетки. Однако, как и в случае с ИТС таблетками, окруженными тяжелым экраном для увеличения времени закрытости (ограничения) [81] всегда лучше работать с мишенью чистого синтеза, чем с гибридной мишенью деления-синтеза. Вот почему ДТ легче сжать, чем любой более тяжелый материал, и поскольку удельное содержание энергии ДТ больше, чем у делящихся материалов. Тем самым, намного более привлекательно разрабатывать устройства на *микросинтезе*, чем на *микроделении*.

По сравнению с микроделением, практические проблемы подкритического горения менее острые. С одной стороны, как можно увидеть на Рис. 22, работа сжатия в десять-сто раз меньше энергии, необходимой для достижения критичности. Более того, поскольку подкритическое горение не зависит от самоподдерживающейся цепной реакции, но от поуступления внешних нейтронов, 100% эффективность горения деления в принципе может быть достигнута. Наконец, в отличие от микроделения, подкритическое горение не ограничено ДЗВЯИ.

3.3. Трансплутониевые и сверхтяжелые элементы.

Трансплутониевые элементы это — искусственные элементы, производимые в реакторах деления или в ядерных взрывах множественным захватом нейтронов: $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, $^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{240}\text{Am}$, и т.д.; при обстреле протонов, дейтронов или разнообразных тяжелых ионов в мишенях ускорителей, или при

⁸ Взрывающаяся таблетка микроделения — интенсивный источник рентгеновских лучей, что может быть использовано для сжатия и зажигания относительно большой вторичной системы с термоядерным топливом.

ядерном синтезе⁹ тяжелых ионов. *Сверхтяжелые элементы* — тяжелые трансплутониевые элементы, которые не могут быть легко произведены в реакторах деления, и которые впервые были открыты в обломках термоядерных зарядов [151, 152].

Военный интерес трансплутониевых элементов состоит в том, что они как правило делящиеся и их критические массы меньше — и, в случае сверхтяжелых ядер, потенциально, очень намного меньше [75] — чем у плутония. Это происходит потому, что более тяжелые элементы имеют тенденцию к большей поперечной площади деления и к производству большего количества нейтронов на деление. Например, критическая масса ^{245}Cm составляет около одной трети от ^{239}Pu [165]. Это преимущество, однако, должно быть сопоставлено с проблемами, присущими трансплутониевым элементам, а именно, коротким сроком существования, большим поперечным сечением спонтанного деления, и трудностью их производства. Действительно, даже для относительно легкого трансплутониевого элемента, такого как ^{245}Cm , который может быть получен (выведен) из ^{244}Cm в реакторе на быстрых нейтронах, технические трудности создания ядерного оружия (например, предустановка цепной реакции, вывод тепла от спонтанного разложения и т.д. [36, 37]) будут намного больше, чем при использовании реакторного плутония.

Таким образом, военный потенциал трансплутониевых элементов основывается на возможности, что может существовать относительно тяжелый трансплутониевый элемент, который можно производить по разумной цене и который может иметь правильные (подходящие) физические свойства¹⁰ для изготовления критического или подкритического ядерного заряда. В особенности, огромный практический интерес представляло бы нахождение долгоживущего трансплутониевого или сверхтяжелого элемента с критической массой в диапазоне одного грамма¹¹ или менее. Явно, что эта возможность всегда была достаточно сильной, чтобы мотивировать вложение существенных ресурсов в исследование сверхтяжелых элементов с 1950-х до сегодняшнего дня. Это происходило так, потому, что ранние теоретические модели давали довольно оптимистические оценки [153] и позднее, поскольку теория предсказывала, что должен существовать островок стабильности¹² около предсказанных замкнутых оболочек при $Z=114$ и $N=184$ [157].

⁹ «Ядрный синтез» означает синтез тяжелых ионов, эндоэнергетический процесс, в то время как «термоядерный синтез» означает экзоэнергетический синтез легких ядер.

¹⁰ Деление сверхтяжелого ядра $^{298}114$ произведет 10 нейтронов и освободит 320 МэВ энергии, соответственно в около 3.2 раз больше, чем деление плутония [158]. Теоретически, спонтанный распад деления сверхтяжелых элементов должен быть сильно подавляем.

¹¹ Это подходило бы для изготовления очень компактных ядерных зарядов с энерговыделениями в диапазоне 1-10 тон. Более того, миллиграммовых количеств такого материала было бы достаточно для использования в качестве очень компактных зажигателей для больших ИТС таблеток.

¹² В соответствии с моделью ядерных оболочек, ядра, содержащие «магическое» число (т.е. 2, 8, 20, 50, 82, 126, 184 и т.д.) протонов или нейтронов — особенно стабильны. Когда и число протонов, и нейтронов — «магические числа», т.е. ядра «дважды магичны», предполагается, что они особенно стабильны. Тем самым среди сверхтяжелых элементов, ядра, содержащие дважды магические числа $(Z,N)=(114,184)$, $(126, 184)$ и т.д. и ядра около них должны быть стабильными и жить в течение долгого времени, после того, как они произведены. Области вокруг этих ядер называются «островками стабильности».

Первой методикой, использованной для производства сверхтяжелых элементов далеко за пределами Периодической Таблицы была попытка синтезировать их множественным захватом нейтронов в высшей степени интенсивном нейтронном потоке, имеющемся внутри и около ядерных взрывов. С этой целью между 1961 и 1969 годами, Американская программа Plowshare поддерживала эту конструкцию и испытание пяти специальных мирных ядерных взрывов (МЯВ) и «добавочных экспериментов» на около 10 оружейных испытаниях на Невадском Полигоне¹³ [161,307]. В Советском Союзе, между 1975 и 1979 гг. 13 МЯВ было посвящено получению трансплутониевых элементов[307].

К началу 1970-х ни одного трансплутониевого элемента за лауренцием ($Z=103$, $N=157$) не было обнаружено. Были предложены новые методы получения: быстрое восстановление (извлечение)и повторное использование тяжелых элементов последовательных ядерных взрывах, использование ИТС в качестве альтернативы полномасштабным ядерным испытаниям [159], и синтез при помощи реакций тяжелых ионов. Но, к концу 70-х, многие физики, работающие в этой области, стали довольно скептически [163, 162], оставляя в качестве последней надежды ядерный синтез тяжелых ионов.

Действительно, с использованием реакций тяжелых ионов, элементы от $Z=104$ до $Z=109$ были наконец открыты в Беркли, США, Дармштадте, Германия между 1969 и 1982 гг. Однако позднее, обширные исследования сверхтяжелых элементов с использованием SuperHILAC в Национальной Лаборатории имени Лоуренса в Беркли (LLBNL) и UNILAC в Обществе по Исследованию Тяжелых Ионов (Gesellschaft fur Schwerionenforschung -GSI) сообщили об отрицательных результатах. [164]. Выглядело так, как будто сверхтяжелые элементы, близкие к островку стабильности, не могут быть произведены. [166].

Прорыв произошел в 1993. В результате совместного эксперимента в Лаборатории Ядерных Реакций Флерова (FLNR) в Дубне, около Москвы, группа американских и российских ученых смогла синтезировать несколько тяжелых изотопов элементов 108, т.е. $^{267}108$. Было обнаружено, что этот элемент имеет срок жизни 19 миллисекунд [171], примерно в десять раз больше, чем у $^{265}108$ [166]. Более того, новые изотопы элемента 106, т.е. $^{265}106$ и $^{266}106$ имели срок жизни около 10 секунд [169, 172], т.е. также на порядок величины больше, чем изотоп $^{263}106$, который был обнаружен в 1974. Эти экспериментальные результаты подтвердили сложные теоретические вычисления А.Собичевского [168], Дж.Р.Никса [170] и других, относительно существенного увеличения сопротивляемости спонтанному делению, когда нейтроны добавляются к сверхтяжелым элементам возле островка стабильности [169, 171]. Эксперимент стал возможен благодаря новой методике, которая открыла дорогу к синтезу еще более тяжелых сверхтяжелых ядер.

К концу 1994 [173] элементы с атомными номерами 110 и 111 были синтезированы в лаборатории тяжелых ионов GSI в Германии, через 13 лет после того, как в этой же лаборатории был синтезирован элемент 109 и через 25 лет после основания GSI. Затем, в феврале 1996, также в GSI был синтезирован эле-

¹³ Интерес к сверхтяжелым элементам играл ключевую роль в начале программы Plowshare. В общем, в США было 27 МЯВ.

мент 112 [174], в настоящее время это самый тяжелый элемент из когда-либо произведенных. В процессе был открыт новый изотоп элемента 108, т.е. $^{269}108$, и было обнаружено, что его период полураспада составляет 19.7 секунд, т.е. более чем в 100 раз больше, чем срок жизни самого тяжелого из сверхтяжелых элементов, известных в 1991 году [166]. Это означало, что разрыв между естественно встречающимися элементами и островком сверхтяжелых ядер был пересечен.

Открытия 1993-1995 убедительно наводят на мысль, что еще более тяжелые атомы могут быть произведены. Недавние теоретические вычисления предсказывают, что около 400 сверхтяжелых ядер между элементами 106 и 136 должны быть стабильными и что по меньшей мере двенадцать из них должны иметь срок жизни более 25.000 лет, т.е. срока жизни плутония [178]. Проблема состоит в том, что производство большинства из них может быть чрезвычайно сложной, даже если и не невозможной. Однако, для военных применений, может оказаться так, что интересующие ядра находятся среди тех, которые легче всего синтезировать. Благодаря своим исключительно низким поперечным сечениям производства, цена производства макроскопических количеств этих материалов может быть очень высокой.¹⁴ Тем не менее, как и в случае производства антиматерии (см. следующий раздел), могут быть разработаны эффективные методы производства.

В недавнем анализе способа, которым были получены элементы 110, 111 и 112 [177], ученые из Лос-Аламоса и GSI обнаружили, что теоретические модели, разработанные в Лос-Аламосе в 1970-х [160,170] могут объяснить основные черты реакций синтеза тяжелых ионов, которые были использованы для синтеза этих элементов в GSI. Эта находка подразумевает, что эти модели могут быть с уверенностью использованы для указания на наиболее перспективные реакции для производства сверхтяжелых элементов. Например, некоторые элементы в области $116 \leq Z \leq 122$ могут быть достижимы с использованием пучков стабильных ионов, в то время как пучки радиоактивных ионов потребуются для синтеза других ядер на дальней стороне сверхтяжелого островка [178, с.159]. Сооружение установки следующего поколения по производству пучков радиоактивных ионов, которая была бы важна для таких экспериментов, было выбрано в качестве задачи первоочередной важности для ядерной физики будущего в Европе [179].

В настоящее время в мире существует только четыре института, в которых могут быть синтезированы сверхтяжелые элементы с $Z > 103$: Национальная Лаборатория имени Лоуренса, Беркли (LBNL), (США), GSI в Дармштадте (Германия), Лаборатория Флерова в Дубне (Россия) и PSI в Виллингене около Цюриха (Швейцария). Однако, Франция с GANIL (Grand Accélérateur National de Ion Lourds - Большой Национальный Ускоритель Тяжелых Ионов) в Казне [179, с.9] и Япония с Кольцевым Циклотроном в RIKEN (Институт Физических и Химических Исследований) в Сайтама [175], скоро могут присоединиться к этому клубу.

3.4. Антиматерия

Взаимодействие материи и антиматерии производит больше энергии на единицу массы, чем любые другие средства производства энергии. Например, реакция аннигиляции протона и антипротона высвобождает в 275 раз больше энергии в форме кинетической энергии заряженных частиц, чем ядерное деление или синтез ДТ. Более того, когда антиматерия оказывается вблизи материи, аннигиляция начинается спонтанно, без необходимой критической массы, как при делении, и без энергии зажигания, необходимой при синтезе. Коротко говоря, это идеальный ядерный пусковик, при условии, что будут найдены методы производства и управления достаточными количествами антиматерии.

Поэтому неудивительно, что концепция использования антиматерии в качестве источника энергии в течение десятилетий присутствует в научной литературе [188, 193, 190, 191]. Также рассматриваются другие практические применения антиматерии.¹⁵ Они включают, например, системы тяги на антиматерии [194], размещенные в космосе силовые генераторы и вооружения направленной энергии [197, 199, 204] и опухолевую терапию [195, 234]. Наконец, и Эдвард Теллер [180, 184, 186, 187, 189] и Андрей Сахаров¹⁶ [192], два ключевых ученых, отвечавших за разработку водородной бомбы соответственно в своих странах, демонстрируют в своих опубликованных научных работах сильный интерес к аннигиляционным свойствам антиматерии, ядерному процессу, который, как предполагалось, приведет к новому поколению ядерных бомб после оружия деления и синтеза.

Действительно, в 1950 г., за два года до взрыва первой водородной бомбы, уже изучалось зажигание дейтериево-тритиевой смеси антиматерией. Однако, как показано, например, в статье, специально изучающей захват антипротонов дейтерием и тритием [181], и в статье, пытающейся рассчитать результат взаимодействия между антипротоном и ядром обыкновенной материи [182], основная проблема в то время состояла в том, что не было экспериментальных данных, на основании которых можно было сделать точное предсказание того, что могло произойти, когда встретятся протон (или нейтрон) и антипротон. Более того, было не известно, когда и как сможет быть произведена антиматерия. Следовательно, в течение нескольких лет, прикладные исследования концентрировались на более перспективных краткосрочных методиках — и проблема зажигания водородной бомбы была решена использованием атомной бомбы в качестве пусковика, и существование антипротона осталось теоретическим до 1955 года.

Исторически, первой наблюдавшейся античастицей был антиэлектрон, также называемый позитроном, открытый в 1932 году Карлом Давидом Андерсоном. При наблюдении космического излучения он заметил частицу той же массы, что и электрон, но противоположного заряда. Многие попытки предпри-

¹⁴ Для типа военных применений, рассматриваемых в настоящем отчете, небольшие количества, порядка 10^{-12} — 10^{-6} грамм достаточны, чтобы использовать их в качестве мощного первичного источника нейтронов или рентгеновских лучей.

¹⁵ Обширная библиография по науке и технологии антиматерии была опубликована в 1988 [211].

¹⁶ В статье 1968 года Сахаров отмечает: «Аннигиляция 0.3 г материи и 0.3 г антиматерии имеет эффект взрыва атомной бомбы» [185, с.218].

нимались для обнаружения антипротона тем же методом, но безуспешно. С имевшимися в то время детекторами и зная только его массу и электрический заряд было практически невозможно идентифицировать антипротон в космическом излучении с какой-либо уверенностью. Он должен был быть произведен искусственно. Для этого нужен был ускоритель, намного более мощный, чем все, что было построено к тому времени.

Вкратце, антиматерия производится следующим образом: протоны ускоряются до скорости, близкой к скорости света и затем направляются на мишень. Последующее столкновение настолько интенсивно, что часть энергии трансформируется в пары частиц-античастиц. Когда ускоритель в 1955 году в Беркли был построен, антипротоны были впервые «увидены» [183]. При впуске антипротонов в детектор, заполненный жидким водородом, энергия, освобождавшаяся при взрывном взаимодействии протона и антипротона, была обнаружена, как заново материализующаяся в разбросе (ряде) других частиц (в основном пионов, выстреливающих во всех направлениях), что забирало большую часть энергии аннигиляции. Для военных ученых это было большим разочарованием.

Но Эдвард Теллер и его ученик Ганс-Петер Дюрр на этом не остановились [184]. В 1956 году они предложили гипотезу: если вместо аннигиляции с простым ядром водорода, антипротон будет аннигилировать с протоном или нейтроном, помещенным в ядре сложного атома, такого, как углерод или уран, рассматриваемое ядро буквально взорвется.¹⁷ Это приведет к большому местному выходу энергии, опять создавая возможности мирных и военных применений антиматерии.

Прошло тридцать лет до того времени, когда был изобретен комплекс машин необходимый для аккумуляирования и замедления антипротонов. Единственная в мире¹⁸ система этого типа находится в Европейском Центре Ядерных Исследований (CERN), в Женеве, Швейцария. Наконец, стало возможным изучение на большом масштабе столкновений антипротонов и ядер. В результате стало возможным продемонстрировать, что выход энергии, хотя и меньший, чем надеялся Теллер (или более недавно другие [196]), достаточен для обеспечения осуществимости военных применений антиматерии. С другой стороны, вследствие очень высокой цены и огромного количества энергии, необходимой для ее производства, также стало ясно, что антиматерия никогда не станет применимым источником энергии для энергоустановки.

Благодаря результатам CERN'а мы в 1985 году смогли опубликовать в августе 1985 года оценку числа антипротонов, необходимого для начала термо-

¹⁷ Общая энергия связи ядра урана или плутония — 1.750 МэВ, примерно в десять раз больше, чем энергия, освобождаемая их делением в реакторе или атомной бомбе. Если эта энергия может быть полностью освобождена вместе с полной энергией аннигиляцией антипротона (т.е. 2×1.0836 МэВ), каждая аннигиляция антипротона в тяжелом ядре выдаст более 5.000 МэВ энергии.

¹⁸ В конце 1986 года система производства и охлаждения антипротонов была в действии в Ферми-лаб, Национальной Ускорительной Лаборатории им. Ферми (Fermi National Accelerator Laboratory — FNAL) около Чикаго. Однако, до сих пор нет определенных планов построить в США систему, сравнимую с CERN'ом, а именно такую, которая может достаточно замедлять антипротоны, так, чтобы их можно было обездвиживать и захватывать в магнитную ловушку [233]. что касается России, известно очень мало деталей о состоянии их проектов в области антиматерии.

ядерных реакций, будь то зажигание водородной бомбы или запуск микровзрыва таблетки термоядерного топлива [203]. Мы обнаружили, что можно построить водородную бомбу, или нейтронную бомбу, в которой от трех до пяти килограмм плутония заменяются одним микрограммом антиводорода. Результатом будет так называемая «чистая» бомба, т.е. оружие, практически свободное от выпадения радиоактивности из-за отсутствия делящихся материалов. Для того, чтобы такое военное применение стало реальным, нужна технология производства антипротонов в количестве, достаточном для по крайней мере для одного пуска (срабатывания) антиматерии в день. Это соответствует минимальному объему производства в 10^{13} антипротонов в секунду, на шесть порядков величины больше, чем сегодня возможно в CERN'e (10^7 антипротонов в секунду). Однако, существуют многочисленные пути увеличения этого объема [203, 199, 210].

Мы не знали в 1985 году, что начиная с лета 1983 года корпорация RAND проводила исследование для ВВС США «для изучения возможностей применения выхода большой энергии от аннигиляции материи и антиматерии» [199]. Исследование RAND было завершено 1984 году. Версия, опубликованная в 1985 году составляет серьезную оценку возможностей разработки такого предприятия для военных применений. В соответствии с этим документом, безусловная оценка возможности производства и манипулирования 10^{13} антипротонами в секунду и создания передвижных резервуаров антипротонов может быть реализована к началу 90-х гг. Это воспринималось как осуществимое, поскольку многие важные технологические проблемы могут быть исследованы с использованием обычных частиц вместо антипротонов. Этот же отчет указывает четыре основные категории применений: *двигательное* (топливо для сверхбыстрых противоракетных ракет), *в энергоустановках* (легкие и ультракомпактные генераторы для военных платформ на орбите), *в оружии направленной энергии* (антиводородные пучки или лазеры с накачкой, основанные на очень кратковременном выпуске энергии) и *специальные дополнительные секретные вооружения* (различные бомбы, запускаемые антиматерией).

В начале июля 1986 мы приехали в Мадрид, где вся сессия Четвертой Международной Конференции по Возникающим Ядерным Системам была посвящена энергетическим концепциям антиматерии. Было запланировано четыре доклада Лос-Аламосских ученых по различным аспектам ануки и технологии антиматерии. Ко всеобщему удивлению, американцы не приехали. За десять дней до начала, они объявили о своем снятии докладов без каких-либо убедительных объяснений. Участники конференции быстро поняли, что американские власти произвели переоценку военного значения антиматерии и, возможно, запретили Лос-Аламосским ученым поездку в Мадрид.¹⁹ Возможно, так произошло из-за факта, что на этой же конференции мы должны были представить

¹⁹ Названия снятых сообщений были следующими: У. Сэйлор, С.Хоун (Хоув), Д.Холткамп, М.Хайнес (приглашенный доклад) *Завод по производству антиматерии — системные компромиссы*. М.Х.Хольцшайтер. *Хранение антипротонов — новая концепция энергетических систем будущего*. Л.Дж.Кэмпбелл: *Хранение антипротонов в конденсированном веществе — надежды и перспективы*. С.Хоун (Хоув) (приглашенный доклад). *Использование продуктов аннигиляции антиматерии для получение используемой энергии для космических применений*.

точку зрения, что реальные применения энергетических технологий аннигиляции существуют только в военной области [201].

В Мадриде мы показали, что термоядерная бомба, запускаемая антиматерией, — научно и технически осуществима. В одной возможной конструкции, которую мы детально оценивали [201], антиматерия находится в центре в виде таблетки размером в одну десятую миллиметра. Она окружена термоядерным топливом (100 г полая сфера Li_2DT) и изолирована от него. После сжатия взрывными линзами, топливо входит в контакт с антиводородом. Спонтанно начинается реакция аннигиляции и дает энергию для зажигания термоядерного топлива. Если выбранная степень сжатия велика, получается бомба с усиленным механическим эффектом, а если она мала — получается нейтронная бомба. В обоих случаях, из-за отсутствия тяжелых материалов, эффект электромагнитного импульса (который происходит в основном из-за гамма лучей от затухания возбуждения и распада тяжелых радиоактивных ядер) и радиоактивные осадки существенно ниже, чем у современных атомных и водородных бомб той же мощности (1кт).

Вскоре после конференции, в ночь с 17 на 18 июля 1986 года, антиматерия впервые в истории была захвачена электромагнитную ловушку [200]. Из-за относительно ненадежных условий этой первой успешной попытки, удалось сохранить антипротоны в течение всего лишь около десяти минут. Это, однако, было намного больше, чем надеялись американские ученые, работавшие в CERN'e при поддержке ВВС США. Этот результат был особенно важен для американцев, поскольку многие эксперименты, которые можно осуществить только с антиматерией, необходимы для исследования осуществимости военных применений антиматерии. По мере того, как антипротоны, получаемые в Европе (на швейцарской территории) могут быть законсервированы и привезены обратно в США, корпорация RAND решила, что установка по производству/накоплению, такая же как в CERN'e, хотя и будет желательна, но не будет необходимо построена в США [199, с.43].

События в Мадриде, иммобилизация первых антипротонов и стратегические последствия были предметом нескольких статей [202, 204, 206]. Впоследствии эти статьи были воспроизведены в сборнике на тему технологии антиматерии для военных применений вместе с оценкой известных физиков, работающих в области разоружения или контроля вооружений [207].

В последующие десять лет, с 1986 по 1996, огромное количество исследований, и экспериментальных, и теоретических, было сделано по многим проблемам, которые прямо или косвенно относятся к практическим применениям антиматерии. В особенности важным вопросом является разработка простых и компактных технологий хранения антиматерии. В этой области рассматривается два основных подхода. Первый состоит в производстве антиводорода соединением антипротонов с позитронами. Первые атомы антиводорода были синтезированы в CERN'e в 1996 [224]. Следующим шагом будет изготовление таблеток из твердого антиводорода [208], которые можно будет хранить и которыми можно будет манипулировать при помощи различных электромагнитных и оптических методик бесконтактного подъема (манипулирования). Могут быть по-

лучены очень высокие плотности хранения — но только в криогенных хранилищах и при очень высоком вакууме.

Наиболее привлекательным подходом, однако, стало бы хранение антиматерии в обычной материи. Действительно, хотя частицы материи имеют тенденцию спонтанно аннигилировать при контакте с материей (или под действием электромагнитного притяжения, как в случае антипротонов и позитронов, или по действием силы ван дер Вальса в случае антиводорода), существование метастабильных состояний антипротонов в конденсированном веществе не может быть априорно отброшено [209]. Например, если атом антиводорода с очень низкой энергией диффундирует в твердое тело, он движется в нем, пока его позитрон не аннигилирует с электроном. Антипротон затем может занять место этого электрона и при каких-то условиях останется закрепленным в определенных точках (узлах) внутри кристаллической структуры. В настоящее время тип вещества, которое может быть использовано, не известен, но огромное число химических соединений и кристаллических типов потенциально может дать оптимальный материал.

Когда антипротоны низкой энергии станут обычными и доступными, определенное число физических величин, представляющих военный интерес, может быть точно измерено на Кольце Антипротонов Низкой Энергии (Low Energy Antiproton ring - LEAR²⁰) в CERN'е. Например, около 16 нейтронов было получено остановленной аннигиляцией в уране [206]²¹. Это означает, что относительно малое число антипротонов будет достаточным для инициирования цепной реакции в сильно сжатой таблетке плутония или урана. Это могло бы решить проблему инициирования взрывов микроделения, поскольку, в отличие от нейтронов, антипротоны легко могут быть направлены и сфокусированы на очень малую мишень. В США этот вариант исследуется в Лос-Аламосе [216] и Лаборатории Филлипса²² [219].

Однако, как объяснено в разделе 3.3, подкритическое горение потенциально намного более перспективный метод для изготовления ядерного оружия с очень низким энерговыделением: направленные на подкритическую сборку, антипротоны могут инициировать подкритическое горение делящихся материалов. Это открывает перспективу изготовления очень легких зарядов деления с энерговыделением в диапазоне *ниже килотонны*. В Лаборатории Филлипса проводятся эксперименты по изучению этой возможности [215]. Типы рассматриваемого устройства основаны на плутониевых таблетках с массой 0.014 и 0.700 граммов, которые имеют энерговыделение от 0.2 до 12 *тонн* в тротиловом эквиваленте. Для того, чтобы инициировать эти таблетки, сжатые посредством магнитной компрессии, достаточно намного меньше, чем микрограмма антипротонов (см. Рис.21).

²⁰ LEAR - 80-метровое по окружности кольцо, которое позволяет хранить и замедлять антипротоны до энергий на уровне 5МэВ. Это — первая большая установка, когда-либо построенная для замедления, а не для ускорения частиц.

²¹ В мишенях из сжатого урана средний выход нейтронов на антипротон увеличивается с 16 до примерно 22 [218].

²² «Лаборатория Филлипса» — новое название «Оружейной Лаборатории ВВС» на базе ВВС Кертланд около Альбукерке, Нью-Мексико.

Для этих исследований американские исследователи предполагают использовать антипротоны, полученные в CERN'е. «Законсервированные» в электромагнитной ловушке, они отправлялись бы в Лабораторию Филлипса по воздуху.²³ Конструирование и изготовление этой ловушки были предприняты Лос-Аламосской Национальной Лабораторией [216] и она тестируется в CERN'е. В 1996 году более миллиона антипротонов, полученных при одном «выстреле» LEAR было захвачено и до 65% захваченных антипротонов было впоследствии охлаждено и хранилось до одного часа [229].

Другое важное применение антиматерии для четвертого поколения ядерных зарядов — инициирование ИТС таблеток [214, 220]. С этой целью, как мы обнаружили в 1985 году [203], важной проблемой является перенос максимально возможного количества аннигиляционной энергии к *DT* или *LiD* плазме²⁴. Привлекательная возможность — которую Эдвард Теллер должно быть уже рассматривал в 1956 году [184] — аннигилировать антипротоны в каком-то специальном материале, который будет «взрываться» в легкие осколки, которые в свою очередь будут разогревать плазму. По этой и другим причинам, многочисленные измерения были проведены для изучения аннигиляционных качеств антипротонов в различных ядрах, например [213, 228]. Перспектива такова, что то, что наблюдалось во взрывном дроблении на множество осколков (*explosive multi-fragmentation*) тяжелых ядер, бомбардировавшихся легкими ионами [223], может случиться с антипротонами [227]. Например, ожидается, что ядро золота, содержащее 197 нуклонов может распасться на 40 или более частей, в основном алых кластеров и отдельных нейтронов и протонов [227].

В настоящее время три основные лаборатории заняты производством антипротонов: CERN (Швейцария и Франция), FNAL (США) и Институт Физики Высоких Энергий (ИФЭ) в Серпухове (Россия). Эти лаборатории используют большие ускорители для производства антипротонов в очень небольших количествах. Однако, использование мощных лазеров может привести к эффективности преобразования в миллион раз большей, чем достигаемая при использовании ускорителей [212]. Для этой цели особенно полезны так называемые «петаваттные лазеры», т.е. лазеры с очень короткой длительностью импульса [189, 225]. Эти лазеры также разрабатываются для обеспечения альтернативного метода для зажигания ИТС-таблеток, так называемая концепция «быстрого зажигания» [225, 226]. Эксперименты по получению антиматерии планируются на NIF. Для начала эти эксперименты будут посвящены изучению релятивист-

²³ Ссылка [230, с.1418] дает следующие детали: «Транспортируемая ловушка имеет высоту 1 метр, поперечник 30 см и весит 55 кг. Она имеет эксплуатационную температуру 4°K, поддерживаемую криогенными резервуарами азота и гелия, и обладает уникальной чертой: удерживающий магнит сделан из постоянно магнитных материалов *SmCo*, которые должны оказаться прочными. Эта ловушка была испытана в CERN'е в конце 1995 года, затем была послана в CERN для наполнения и демонстрационной поездки по Европе. Мы планируем вернуть наполненную ловушку в США в 1996 для запланированных экспериментов, спонсируемых ВМФ США». Однако, из-за трудностей с экспериментами и остановки LEAR в декабре 1996, антипротоны до сих пор не были перевезены из CERN'а в США.

²⁴ В применениях в космических силовых установках существует та же проблема, поскольку топливо, которое надо нагреть, как правило, является легким веществом, например водородом [235], для того, чтобы максимально увеличить удельный импульс.

ских плазм и пондеромоторных эффектов (ponderomotive effects) около плотности энергии для получения электронов-позитронов [10, с.46], [15, с.С-6].²⁵

В конце 1996 года установка LEAR в CERN'е была остановлена что было частью большой реорганизации ускорительного комплекса CERN'а ввиду строительства нового большого ускорителя — Большого Адронного Сталкивателя (Large Hadron Collider) (LHC)— который будет адронным ускорителем с самой высокой энергией, который когда-либо строился.²⁶ Сооружение LHC начнется в 2000 году и будет продолжаться пять лет. В течение этого времени, в CERN'е не будет физики *высокой энергии*. Это произойдет потому, что LHC будет установлен в том же туннеле, что и LEP, Большое Электронно-Позитронное кольцо, которое в настоящее время является основным ускорителем CERN'а.

Для того, чтобы продолжить программу исследований в области антиматерии — которая будет единственной исследовательской программой по основной физике в CERN'е в течение 2000 — 2005 гг., — строится новый источник антипротонов, Замедлитель Антипротонов (Antiproton Decelerator - AD) [232]. AD будет использовать предыдущее кольцо Антипротонового Коллектора (Antiproton Collector - AC) остановленное в 1987 году для усиления мощностей CERN'а по антипротонам в десять раз) и различные компоненты LEAR (такие, как система охлаждения антипротонов). Более половины цены постройки AD будет внесено Японией [231].

Действительно, Япония начинает амбициозную программу исследования антиматерии. Японское Министерство Образования, Науки и Культуры (Monbusho) объявило, что «Наука об антиматерии» была выбрана как один из двух наиболее важных исследовательских проектов, осуществляемых начиная с 1998 года [237]. Именно поэтому Monbusho поддерживает строительство AD и участие японских ученых в экспериментах с антиматерией в CERN'е. Взамен, Япония получит разнообразные устаревшие компоненты антипротонного комплекса CERN'а для строительства своего собственного источника антипротонов [236].

Начиная с 1999, на AD будет проводиться два основных эксперимента [238,239] с участниками из США, Германии, Дании, Италии, Польши, Нидерландов, Кореи и Японии. Оба эксперимента включают участников, частично поддерживаемых по программе технологии антиматерии ВВС США, например [221, 229]. Третий эксперимент будет совместным Японо-Европейским по продолжению исследований метастабильных состояний антипротонов в обычном веществе [237].

В начале следующего тысячелетия, после остановки LEP, не будет достаточного количества антипротонов для всех трех экспериментов с антиматерией в CERN'е. Более того, используя антипротоны, полученные и захваченные в CERN'е, многочисленные другие эксперименты будут проводиться в различ-

²⁵ Недавно был продемонстрирован другой метод получения материи-антиматерии, в котором мощный лазерный луч используется совместно с пучком частиц высокой энергии [241].

²⁶ Например, LEAR будет использоваться как кольцо накопления тяжелых ионов для LHC

ных лабораториях Европы и США.²⁷ Очевидно, что единственным конкурентом будет Япония, где антипротоны с низкой энергией станут доступны около 2003 года.

Сегодня исследования антиматерии, возможно, — наиболее важное и энергичное исследование среди программ исследований и разработки ядерного оружия четвертого поколения. Причина состоит в том, что исследования аннигиляции материи и антиматерии в настоящее время более не ставят никаких фундаментальных исследовательских проблем: их военное использование в основном является вопросом технологической разработки.²⁸

3.5. Ядерные изомеры

Ядра состоят из нуклонов, т.е. протонов и нейтронов. Они идентифицируются химическим символом и верхним индексом: указывающим общее число нуклонов, $A=Z+N$. Иногда число протонов (подразумеваемое химическим символом) пишется вместо химического символа, т.е. AZ . Например, уран-235 может быть записан как ^{235}U или $^{235}_{92}$. Ядра с одинаковыми Z называются *изотопами*, с одинаковыми N — *изотонами*, и с одинаковыми A — *изобарами*. Наконец, некоторые ядра с одинаковыми Z и N могут иметь очень долговременные возбужденные состояния (т.е. метастабильные состояния). Ядра в основном состоянии и ядра в метастабильном состоянии в этом случае могут сосуществовать так, как если бы они принадлежали как разным видам.²⁹ При этом два ядра одного вида, но в различных энергетических состояниях, из которых одно — метастабильно, называются *изомерами*. Основное состояние обозначается символом AZ и изомерическое состояние — AZ^m .

Изотоп $^{180}\text{Ta}^m$ имеет двойное отличие. Это — наиболее редкий стабильный изотоп, встречающийся в природе и единственный естественно встречающийся изомер [248]. Реальное основное состояние ^{180}Ta имеет период полураспада 8.1 часа, намного меньше, чем $\approx 10^{15}$ лет периода полураспада его изомерического состояния $^{80}\text{Ta}^m$. Это изомерическое состояние имеет энергию возбуждения 75.3кэВ.

Военный интерес к изомерам имеет двойной характер: во-первых, они могут проложить путь к разработке гамма-лучевых лазеров [244,258], [252, с.54] и, во-вторых, они могут оказаться полезными в качестве топлива и взрывчатки [255], [252, с.54].

Например, ВВ имеет содержание энергии порядка 5кДж/г. Ядерные изомеры имеют энергию порядка 1ГДж/г, близкую к освобождаемой при ядерных реакциях (например 80 ГДж/г высвобождается при делении). При сравнении с

²⁷ В этой перспективе, система AD оптимизируется для переноса антипротонов в ловушки [232].

²⁸ Мы еще раз подчеркиваем, что многие технические проблемы с антиматерией могут быть решены с использованием протонов, атомов H^+ , или позитронов вместо антипротонов. Например, методы захвата и манипулирования антиматерией при помощи лазера могут быть испытаны с обычными атомами [217], и срок жизни антиматерии, удерживаемой магнитной ловушкой, может быть исследована на позитронах [240].

²⁹ Продолжительность жизни возбужденного состояния может даже быть большей, чем продолжительность жизни основного состояния.

имеющимися ядерными зарядами преимущество изомеров состоит в том, что они могут не давать радиоактивности.

Существует два вида ядерных изомеров: *ядерные изомеры вращения (спиновые изомеры)* и *ядерные изомеры формы*. Оба типа высвобождают энергию электромагнитно: таким образом, они не производят радиоактивности. Во многих случаях их окончательное ядерное состояние — стабильно, поэтому они не дают *остаточной* радиоактивности.

Ядерные изомеры вращения изучались более шестидесяти лет и сотни таких изомеров были идентифицированы. Например, в области $A < 90$ существует около семидесяти изомеров с продолжительностью жизни в диапазоне от 0.1 с до 2.44 дней [256]. В этом типе изомеров количество имеющейся энергии исключительно велико. Но ядерные изомерические состояния вращения (которые нормально распадаются с выпуском электрона или позитрона) очень стабильны по отношению к электромагнитному распаду, и поэтому им нужен очень мощный пусковик для инициирования выпуска энергии [255, с.102]. Более того, ни один из них не является стабильным. Поэтому маловероятно, что спиновые изомеры дадут основу для практических применений [247].

Изомеры ядерной формы были случайно открыты в 1962 году С.М.Поликановым³⁰, когда он пытался синтезировать сверхтяжелый элемент $Z=104$ [242]. То, что он открыл, было необычным изотопом америция $^{242}\text{Am}^m$, с вероятностью спонтанного деления примерно в двадцать раз большей, чем у основного состояния. Это явление никогда не предсказывалось и сильно повлияло на дальнейшие исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер. Такие состояния называются изомерами формы, поскольку их электромагнитный распад до основного состояния сдерживается (ему препятствует) различие в форме ядра в возбужденном и в основном состояниях.³¹

Примерно сорок изомеров формы наблюдались в области между торием и беркелием, с $A=225$ до $A=250$. Вследствие их довольно большой вероятности спонтанного распада деления, период полураспада этих изомеров находится в диапазоне от 0.5нс до 14мс. Эти продолжительности жизни слишком малы для практических применений. Однако, предполагают, что для некоторых изотопов урана, и, возможно для других относительно легких трансурановых элементов, этот спонтанный распад деления относительно долгий, и таким образом некоторые из их изомерических состояний могут иметь намного большую продолжительность существования [243, с.408]. Но до сих пор эти состояния не наблюдались [260].

Нет принципиальных причин, которые бы сделали маловероятным формирование изомеров формы во всех ядрах периодической таблицы, где в общем, деление рассматривается как запрещенный режим снятия возбуждения. Дейст-

³⁰ Некролог С.М.Поликанова (1926-1994) и несколько интересных комментариев по изомерам см в [261]. Поликанов также интересовался взаимодействием антипротонов с ядрами и возможным применением антипротонов для разогрева плазмы [198].

³¹ Изомеры формы имеют очень удлиненные эллиптические формы (отношение осей примерно 2:1). В то время как обычные ядра обычно слегка не сферичны, такие сильные деформации называются *сверхдеформациями*. Поскольку естественный режим распада изомеров формы — спонтанное деление, они также называются *изомерами деления*.

вительно, правдоподобность этой возможности очень сильно возросла в 1986 году с открытием первого не делящегося сверхдеформированного ядра, ^{152}Dy [246]. После этого сверхдеформированные ядра наблюдались в ядрах с атомными массами в области $A=130, 150, 190$, и, недавно $A=80$ [260], особенно для некоторых изотопов стронция и иттрия.

В 1988 году первый изомер формы вне области актининов³², ^{68}Ni был обнаружен в Орсе, около Парижа в эксперименте по столкновению тяжелых ионов, проводимом группой исследователей под руководством М.Жиро (M.Girod), физика из Центра Исследований Брюэр-лэ-Шатель (Centre d'Etudes de Bruyeres-le-Châtel) (ведущей французской военной лаборатории) [250].

Это открытие подсказало важное теоретическое усилие по установлению обширного списка не делящихся ядер, которые могут давать изомеры формы. Эта работа началась во Франции [252, с.54], (особенно в Брюэр-лэ-Шатель [251]) и развилась в францозско-американское сотрудничество по контрактам бывшей ОСОИ (Организация Стратегической Оборонной Инициативы - Strategic Defense Initiative Organization — SDIO) и НАТО [253].

Для практических применений, например для гамма-лучевых лазеров или ВВ, изомеры формы должны быть локализованы (расположены) при сравнительно низкой энергии возбуждения [251, 255]. Это вызвано в основном стремлением сделать возможным снятие возбуждения изомерического состояния, которое вызывалось бы относительно низко энергетичным первичным контуром. Возможные механизмы запуска включают лазерно-электронное соединение (спаривание) [249, 151], [255]³³, эта возможность также обсуждается в России [259], и нейтронный [255, 265] или гамма-катализ [248].

Поиск используемых для военных целей ядерных изомеров в широком диапазоне масс представляет сложную теоретическую и экспериментальную задачу. В США самая современная и чувствительная установка использующаяся для этой цели — детектор «Гаммасфера» («Gammisphere») в Ливерморской Лаборатории им. Лоуренса [262].

Во Франции, обширная программа поиска ядерных изомеров является основным приоритетом GANIL.³⁴ В марте 1993 пучок ^{42}Sc в изомерном состоянии 0.62 МэВ (период полураспада — 61 секунда) был получен на GANIL группой ядерных физиков из Брюэр-лэ-Шатель. Этот тип пучка, первый в Европе (единственный другой — в США в Национальной Лаборатории Сверхпроводящего Циклотрона (National Superconductive Cyclotron Laboratory) в университете штата Мичиган) позволяет более глубоко исследовать (брать пробы) экзотические ядра в данном изомерном состоянии [254, с.40], [257]. Более того, в

³² Актиниды — ряд атомов от актиния ($Z=89$) до лауренция ($Z=103$).

³³ Три различных схемы запуска при помощи лазера исследуются в ЛЛНЛ.

³⁴ Во время строительства GANIL, в период между 1975 и 1982, один из нас (А.Г.) работал в CERN'е и FNAL. Постоянно ходили слухи о том, что Дирекция Военных Применений (*Direction des applications militaires DAM*) была одним из основных спонсоров GANIL. Это подтверждается фактом, что многие ссылки на работу GANIL, например [252, 254] появляются в военном разделе ежегодного отчета французского Комиссариата по Атомной Энергии (CEA).

1995 году, новый изомер (^{32}Alm) был идентифицирован на GANIL в результате француско-российского сотрудничества [263].

Ни один из ядерных изомеров, обнаруженных до сих пор, не пригоден для практических применений. Однако, открытие изомеров с практическими применениями может быть делом случая. Он может быть обнаружен в относительно небольшой стране, такой как Венгрия [264] или в большей стране, не обладающей ядерным оружием, такой как Германия [266].

Что касается производства, трудность может быть не столь большой, как это считалось несколько лет назад: удивительно большой выход изомеров был обнаружен в 1993 в реакциях расщепления (фрагментации -образования осколков) пучком (пучка) тяжелых ионов (heavy-ion fragmentation reactions) [256]. Этот метод теперь стандартно используется для получения пучков изомеров [257]. Эти пучки представляют огромный интерес, поскольку они позволяют экспериментально исследовать в деталях свойства изомеров, а также различные лазерные и ядерные методики, которые в настоящее время предлагаются для снятия их возбуждения [265] — и которые сегодня могут испытываться в нескольких специальных конфигурациях [245,248].

Остается только ждать, действительно ли «демонстрация существенного высвобождения энергии от [от изомеров] станет возможной в ближайшие пять-семь лет» — как предполагалось ученым из Ливермора в 1993 году 255, с.102].

3.6. Сверх-взрывчатка и металлический водород

Химические ВВ имеют удельные энергии порядка 5 кДж/г и максимальные плотности около 2 г/см³. Это соответствует максимальной плотности энергии примерно 10 кДж/см³. Химическая *сверх-взрывчатка* — химическое ВВ, которое может иметь плотность энергии по меньшей мере 100 кДж/см³.

Открытие используемого сверх-ВВ имело бы кардинальные последствия для технологии ядерного оружия.³⁵ Например, в бомбе деления (или первичном контуре водородной бомбы) нижние ограничения по весу и размеру определяются количеством и объемом химического ВВ, используемого для имплозии делящегося материала, и щита/рефлектора, окружающего его. Действительно, допуская относительно большую эффективность деления, вес делящегося материала задается желаемым энерговыделением оружия. Таким образом, если примерно 10-20 кг ВВ нужно для имплозии 2-3 кг плутония, окруженного 3-4 килограммовым экраном,³⁶ доступность сверх-ВВ приведет к оружию, в котором вес ВВ будет меньше веса делящегося материала. Аналогично, объем ядра оружия заметно уменьшится, что повлечет существенные сокращения общего веса и размеров из-за уменьшения площади поверхности корпуса. Очевидно, когда размеры и масса водородных бомб имеют более низкую границу по характеристикам первичного контура, такие сокращения в свою очередь будут иметь сильное влияние на технологию термоядерного оружия.

³⁵ Конечно, если цена сверх-ВВ будет низкой, оно также будет иметь огромное значение для обычных вооружений.

³⁶ Мы предполагаем использование относительно тонкого бериллий/стальной рефлектор/экран, как на Рис. 1

Ясно, что до сих пор не было обнаружено ни одного применимого сверх-ВВ. Тем не менее, были слухи (в особенности после распада СССР), что какое-то исключительно мощное неядерное взрывчатое вещество, условно называемое «красная ртуть», возможно производилось в СССР [291]. В этой информации мог быть элемент правды: «красная ртуть» могла обозначать какой-то тип *атомного изомера*.³⁷ Однако, известные ядерные изомеры имеют плотность энергии не намного превосходящую таковую у ВВ. Это происходит потому, что очень сильно возбужденные атомные состояния, в которых некоторые внутренние электроны становятся «выбитыми» из своих позиций, имеют очень короткую продолжительность жизни. Пока не открыта какая-то методика стабилизации высоко энергетичных³⁸ изомерных состояний, маловероятно, что они могут быть метастабильными в течение достаточно долгого времени, чтобы атомный изомер мог использоваться в качестве ВВ. Более того, по сравнению с ядерной физикой, атомная физика хорошо изучена, так что открытие атомного изомера, подходящего для использования в качестве сверх-ВВ было бы большим сюрпризом.

Для того, чтобы получить сверх-ВВ, нужно открыть практические средства для хранения существенных количеств энергии в малом объеме. В химическом ВВ механизм хранения — *химическое связывание*, и полезная энергия происходит из тепла образования, необходимого для синтеза ВВ.

Возможный метод синтеза сверх-ВВ — компрессия.³⁹ Например, если любой материал подвергнут достаточно высокому давлению — процесс имеет эндоэнергетический характер — электроны атомов будут выжаты из своих оболочек, и материал может претерпеть фазовый переход в новое состояние. Если по каким-то причинам материал в новом состоянии является метастабильным (т.е. если он остается в состоянии, достигнутом посредством компрессии после снятия внешнего давления), накопленная энергия может быть использована для практических применений. В частности, если энергия перехода контролируема, такой материал мог бы быть использован как топливо в авиационных или космических силовых установках. Однако, если выход энергии нельзя проконтролировать после начала перехода, материал в метастабильном состоянии будет скорее взрывчатым веществом, чем топливом.

Наиболее простой и широко встречающийся атом — водород. Он также является одним из немногих веществ, чьи свойства во многих случаях рассчитываются на основании общих законов. В 1926 году Дж.Д.Бернал предположил,

³⁷ Атомный изомер — атом, в котором электрон остается в возбужденном состоянии в течение относительно долгого времени. Связанная концепция — концепция *эксимера (excimer)* (сокращение от *excited dimer* — возбужденная молекула из двух атомов), т.е. молекула — такая как $(KrF)^*$ — образованная взаимодействием между двумя атомами или молекулами, один (одна) из которых возбужден(а). Связанная молекула может радиативно распасться к основному состоянию и диссоциировать. Эксимеры хорошо известны и имеют различные практические применения. Например, они используются как высоко эффективная среда для создания когерентного света для мощных лазеров, они тщательно исследовались как потенциальное топливо с высокой плотностью энергии для ракет, и т.д.

³⁸ Энергетическое содержание химического ВВ около 10эВ на молекулу. В этом контексте «очень высокая энергия» обозначает атомное возбуждение в диапазоне от 0.1 до 1 кэВ.

³⁹ Конечно, компрессия используется в химической промышленности для синтеза различных молекул. Здесь мы рассматриваем компрессию при намного больших давлениях.

что при очень высоких давлениях все материалы становятся металлами, т.е. кристаллическая решетка встраивается в море слабо связанных электронов, которые легко проводят электричество. Это действительно происходит во многих материалах.⁴⁰ Однако в случае водорода проблема его перехода в металлическое состояние все еще является открытым вопросом, несмотря на шестьдесят лет и большой объем теоретических и экспериментальных работ [298].

Первая теоретическая оценка давления, необходимого для перехода водорода из молекулярного в металлическое состояние была сделана Вигнером и Ханнингтоном, которые в 1935 году предсказали, что этот переход может произойти при давлении около 250 кбар [267]. Более поздние расчеты⁴¹, однако, привели к более высоким значениям, порядка 2Мбар, давление, которое до самого последнего времени не могло быть получено в лаборатории. Эти вычисления были мотивированы рядом соображений, включая тот факт, что давления в мегабарного диапазона обнаружены на глубине в несколько тысяч километров внутри Земли и возможности, что водород во внутренней части гигантских планет, таких, как Юпитер (который в основном состоит из горячего и плотного водорода) может быть в металлическом состоянии.

Следующим главным событием, которое имело эффект разорвавшейся бомбы в научном сообществе [281, с.106], было предсказание в 1968 году Эшкрофтом того, что металлический водород может быть высокотемпературным сверхпроводником при атмосферном давлении [268]. Это предсказание было важным с практической точки зрения, поскольку высокотемпературный сверхпроводник может иметь много промышленных и военных применений, и поскольку доводы Эшкрофта открыли дискуссию о возможной долгосрочной стабильности металлического водорода при обычном давлении.

Вслед за публикацией статьи Эшкрофта, по вопросу метастабильности металлического водорода был опубликован ряд статей [272, 273, 274],⁴² и первый уточненный расчет и структуры кристаллической решетки, и сверхпроводящих свойств металлического водорода были опубликованы в Швейцарии [269, 270, 271, 279].⁴³

Вскоре после этого первое заявление о металлизации водорода было сделано Россией [275]. Это дало начало продолжающейся и сейчас серии заявлений и опровержений [298]. Методом, использовавшимся в этих экспериментах было изэнтропическое (адиабатическое) сжатие цилиндрической оболочки зарядом химического ВВ, методика описана в [277]. Примерно в то же время, методика использования лазеров высокой мощности (т.е. ИТС-установки) для получения

⁴⁰ Например, изолирующая молекула йода постепенно трансформируется в металлическое состояние при давлении от 40 до 170 кбар при комнатной температуре [283].

⁴¹ Обзор работ по металлическому водороду до 1975 г. дан в ссылке [281].

⁴² Ни одна из этих работ не цитирует в явном виде Эшкрофта

⁴³ Эти статьи Шнайдера и Штолля, двух швейцарских физиков твердого тела, часто цитируются советскими учеными, но редко американскими. Не известно, участвовали ли Шнайдер и Штолль в швейцарской программе разработки атомной бомбы, которая привела к публикации ряда результатов, которые были (в свое время) секретны в других странах. Однако их работа показывает, что опыт (знания) мирового класса в области физики высокого давления и конденсированного вещества существовала в Швейцарии во время этой программы.

металлического водорода была предложена Анисимовым в СССР [276] и Теллером в США [278].

Второе русское заявление о получении металлического водорода было сделано в 1975 году группой, работающей с алмазной наковальней, охлажденной до 4.2°K [282] и аналогичное заявление было сделано в том же году группой японских геофизиков, сжимавших газообразный водород при комнатной температуре, пока он не стал электропроводным [280].

Эти заявления подтолкнули к публикации обширного обзора по металлическому водороду, выпущенному корпорацией RAND в качестве части продолжающегося исследования RAND избранных областей науки и технологии, проекта, спонсировавшегося Агентством Передовых Оборонных Исследовательских проектов США (U.S. Defense Advanced Research Projects Agency) [284]. Помимо высказанных сомнений о том, действительно ли наблюдался переход от молекулярного к металлическому состоянию, основным моментом доклада было открытое признание значительного военного потенциала металлического водорода.⁴⁴

«Потенциальная полезность металлического водорода может быть приписана нескольким факторам. Вследствие высокой температуры Дебая ($\approx 2000 - 3000^\circ\text{K}$) он может быть сверхпроводником при повышенной (возможно, комнатной) температуре⁴⁵ Высокий удельный импульс металлического водорода ($\approx 1400 \text{ с}$) по сравнению с ракетным топливом, таким как JP4 с жидким кислородом ($\approx 400 \text{ с}$) делает его потенциально привлекательным в качестве ракетного топлива. Металлический водород имеет содержание энергии 400 кДж/г.моль, или в 300 раз выше, чем у любого имеющегося авиационного топлива. Это делает его привлекательным для авиационных силовых установок. Однако, если скорость выхода энергии перехода не будет контролируемой после начала перехода, металлический водород будет скорее взрывчаткой, нежели топливом. В этом случае, с энергией 50 ккал/г и плотностью $\approx 1 - 1.3 \text{ г/см}^3$, он является ВВ, примерно в 35 раз более мощным, чем тротил ($Q=1.345 \text{ ккал/г}$). Его высокая плотность также должна сделать металлический водород полезным в ядерном оружии»⁴⁶ [284, с.5].

⁴⁴ Хотя металлический водород постоянно возникающая тема неспециализированных научных журналов, его военный потенциал упоминается редко. Похоже, единственная явная ссылка на отчет RAND появилась год спустя в *Science* [287]. Единственная предыдущая ссылка на потенциальные возможные следствия была в *New Scientist*, где они косвенно следовали из предположения, что металлический водород «может быть использован в лазерном синтезе и хранении энергии» [285].

⁴⁵ К сожалению, высокая температура Дебая металлического водорода также указывает, что он может быть квантовой жидкостью (квантово жидким) [284, с.5].

⁴⁶ При плотности 1.3 г/см^3 плотность энергии металлического водорода будет примерно 270 кДж/см³. Поскольку водород — самый легкий элемента, металлический водород мог бы стать самым мощным мыслимым химическим ВВ.

Первое американское заявление о металлизации водорода было сделано в 1978 году группой Ливерморских ученых, использовавших устройство сжатия магнитного потока под действием ВВ [286]. Следующее заявление было сделано в 1988-89 гг. Группой геофизиков, из Института Карнеги в Вашингтоне, работавших с алмазной ячейкой. Наконец, после нескольких обнадеживающих измерений в диапазоне 0.1-0.2 Мбар [289] и последующих экспериментов до 0.83 Мбар [290] и 1.8 Мбар [293, 297], другая группа из Ливермора (работающая с двухступенчатой пушкой на легком газе) объявила в 1996 году о непрерывном переходе сжатого водорода из полупроводникового в металлическое состояние при 1.4 Мбар.

В прошлом было много заявлений об успешной металлизации водорода, но до сих пор ни одно из них не удовлетворяло требование достоверной воспроизводимости. Поэтому не удивительно, что последнее заявление Ливермора было встречено с некоторым скепсисом, например [294, 295, 296, 298, 300]. В особенности, в то время, как в прошлом ожидание концентрировалось на низкотемпературном, твердом металлическом водороде, открытие металлического водорода в условиях высокой температуры и относительно низкого давления было неожиданным [296]. Это указывает на факт, что самый простой элемент «Периодической Таблицы» не понятен в экстремальных состояниях [300], и что действительно металлический водород все еще нужно искать в намного более сложной фазовой диаграмме, чем это ранее ожидалось [298].

Тем не менее, насколько это касается краткосрочных применений, Ливерморские ученые более чем удовлетворены.⁴⁷

«(Эти) Находки приведут к новым базам данных, влияющим на программы разработки оружия и лазерного синтеза, которые обе используют изотопы водорода. Ученые, занимающиеся лазерным синтезом используют сжимаемость водорода для настройки лазерных импульсов для получения максимального выхода энергии. Эти новые результаты указывают, что уравнение состояния водорода таково, что можно ожидать более высокого энерговыделения от синтеза» [292].

Конечно, в свете необычайного потенциала методик лазерного сжатия, уже продемонстрированных на NOVA (например, [142]), сооружение NIF позволит практически осуществить метод, предложенный Анисимовым [276] и Теллером [278]. Исследования металлического водорода на NIF (например, [10,

⁴⁷ Существенный интерес к этим результатам в области астрофизики не должен недооцениваться. Однако тем, кто требует, чтобы такие исследования не были ограничены международными соглашениями по контролю вооружений следует напомнить, что именно астрономия и астрофизика являются примерами так называемых «чистых» наук, которые во все времена были значительным источником политической и военной *мощи* (например, навигация, $E=mc^2$ и т.д.). В то время как ученые, работающие в оружейных лабораториях, не стесняются демонстрировать, насколько *оборонные программы* имеют «чисто» научные следствия [288, 299], именно «чистые ученые», работающие в университетах «забывают» о военном значении своих академических исследований (например, [298], [240]).

с.45]), может дать ответ на все еще открытые вопросы: Существует ли твердый металлический водород? Можно ли его производить по разумной цене? И — если да — применим⁴⁸ ли он как топливо или сверх-ВВ?

3.7. Заряды чистого синтеза

«До сих пор у нас было ядерное оружие двух принципиально разных типов: бомба деления и бомба (термоядерного) синтеза. Нет нужды детально обсуждать, как они работают, Бомба деления не может взорваться, если она не содержит определенное количество (критическую массу) очень дорогого металла. [...] Водородная бомба может брать энергию из намного более дешевого и намного более распространенного топлива (тяжелого водорода), но для нее нужна по крайней мере умеренно эффективная бомба деления для ее зажигания. Таким образом, каждая водородная бомба стоит по крайней мере столько же, сколько бомба деления. [...]

Ниже определенного взрывного энерговыделения порядка килотонны, ядерные вооружения очень неэффективны и экстравагантны. Однако, для военных целей, отличных от тотального уничтожения, уже килотонна — неразумно сильный взрыв. Существует ясная и острая потребность в заряде, который заполнил бы промежуток между тонной и килотонной ТЭ по цене, которая была бы пропорциональна энерговыделению, а не независимой от негою

Теоретически существует простой способ избежать тирании критической массы. Это — сжигание тяжелого водорода без бомбы деления, которая бы его поджигала. Бомба без деления, содержащая небольшое количество тяжелого водорода и не содержащая делящегося металла, логически является третьим кардинальным шагом в разработке оружия после существующих бомб деления и синтеза» [301, с.458].

Эта выдержка из знаменитой статьи Фримена Дайсона в престижном американском ежеквартальном обзоре *Международные отношения (Foreign Affairs)*⁴⁹ [301] является отличным обобщением того типа мышления и риторики, который преобладал среди тех, кто в конце 50-х защищал оружейные лаборатории и боролся против возможного запрета на ядерные испытания. Девятнадцать лет спустя, в своей книге *Тревожит (тревожащий) Вселенную (Disturbing the Universe)*[302], Дайсон суммировал свою статью 1960 года:

⁴⁸ В особенности, его метастабильная фаза должна быть достаточно «нечувствительной», чтобы он мог быть использован как достаточно «безопасное» военное ВВ. Обсуждение этих концепций см. в [9].

⁴⁹ В это время редакционный совет *Международных Отношений* включал, среди других влиятельных и выдающихся лиц, физика Исидора И. Рабби, одного из основателей JASON.

«Основной тезис статьи состоит в том, что постоянный запрет на ядерные испытания был бы опасной иллюзией, поскольку будущие усовершенствования в оружейной технологии создадут непреодолимое давление в пользу тайных и явных нарушений любого такого запрета. Другими словами, бомбы без деления — волна из будущего, и любое политическое соглашение, игнорирующее или отрицающее их право на появление обречено на провал» [302, с.128-129].

Далее Дайсон замечает, что его аргументы 1960 года «были ошибочны по крайней мере в четырех отношениях: техническом, военном, политическом и моральном» [302, с.129].⁵⁰

В 1960 г. Дайсон проводил кампанию *против* запрета испытания и таким образом, противостоял «Хансу Бёте⁵¹ [который] активно действовал, и публично, и внутри правительства, за всеобъемлющий запрет испытаний» [302, с.127]. Ирония заключается в том, что *сегодня* Бёте использует аргументы Дайсона 1960-х — а именно то, что заряд чистого синтеза научно осуществим и привлекателен в военном отношении — чтобы просить правительство США *запретить* «все физические эксперименты, вне зависимости от того, насколько мало выделение энергии, первичной целью которых является конструирование новых типов ядерного оружия» [308], [309, с.438].

Однако, как и в случае полномасштабных ядерных взрывов, не существует способа определить границу между «военными» и «мирными» микровзрывами на таких установках как Nova, Gekko, NIF, LMJ и т.д. Поэтому, принятие правительством США предложения Бёте было бы эквивалентно признанию того, что программа Научно Обоснованного Сопровождения Боезапаса (Science Based Stockpile Stewardship -SSBS) и мощная установка NIF могут привести к четвертому поколению ядерных вооружений. Более того, предложение Бёте потребует изменить официальную интерпретацию охвата ДЗВЯИ таким образом, что микровзрывы будут запрещены. Это почти невозможно, особенно потому, что программа SSBS и строительство NIF были *приняты* Правительством США для того, чтобы ядерные оружейные лаборатории могли *приспособиться*⁵² к До-

⁵⁰ Всего лишь через год после того, как Дайсон опубликовал эту книгу, т.е. в 1980, вопрос о связях между ИТС и оружием только синтеза был поднят У.А.Смитом и П.Баксма [303]. Эта публикация — одна из редких хорошо осведомленных публикаций по этой теме, появившихся в литературе по контролю вооружений/разоружению в период 1975-1990 гг. — основана на отчете, опубликованном в 1978 г., см. [6, ссылка 6].

⁵¹ Ханс А. Бёте, г.р. 1906, руководивший Теоретическим Отделением Лос-Аламоса во время Второй Мировой Войны, получил в 1967 году Нобелевскую премию в основном за работы в области астрофизики, например, «углеродный цикл», который снабжает энергией Солнце. В 1950 г. он написал [42] статью в ряду из четырех статей против водородной бомбы, опубликованных в *Scientific American* [41,42, 43, 44]. Молодому поколению важно прочитать эти статьи, особенно для того, чтобы ощутить технологический импульс отодвинуть в сторону все, лишь бы только создать новое оружие, несмотря на осведомленность о присущей ему опасности и несмотря на существование открытых дебатов по этому вопросу.

⁵² По этому поводу, см., например заявление С. Пола Робинсона, цитировавшееся в разделе 2.3.

говору о Всеобъемлющем Запрещении Ядерных Испытаний (ДЗВЯИ), подписанному в сентябре 1996 г.

После подписания Договора о Частичном Запрещении Испытаний (РТВТ) в 1963 году, Лос-Аламосская Лаборатория получила ряд мощных инструментов: установку PHERMEX для импульсной рентгеновской радиографии [322], Лос-Аламосскую Установку (для изучения) Мезонной Физики (Los Alamos Meson Physics Facility — LAMPF) [324] и Установку (для) Исследований Нейтронов Оружия (Weapons Neutron Research Facility — WNRF) [323].⁵³ В это время в прессе не было большого шума об этих машинах, но они являются дубликатом сегодняшней Двухосевой Радиографической Гидротестовой установки (Dual Axis Radiographic Hydrotest facility - DARTH) [9, с.28] [326] и Лос-Аламосского Центра Науки о Нейтронах (Los Alamos Neutron Science Center — LANSCE), существенного дополнения к WNRF [9, с.-57-69].⁵⁴ Более того, вместе с обновлением Импульсной Рентгеновской установки (Flash X-ray facility — FXR) [333] Ливерморская Лаборатория получила NIF [329], у которой явно намного более захватывающий военный потенциал, чем заряды с малым энерговыделением деления, разработанные с 1961 по 1977 год в качестве части программы *Plowshare* для “мирных применений ядерных взрывов”. Следовательно, как и в случае РТВТ качество,⁵⁵ и число ядерных испытаний (например, на NIF и т.д.) *возрастет!*

Даже до РТВТ, и особенно во время моратория на ядерные испытания 1958-1961 гг. существовали значительные исследования по чистому синтезу во всех оружейных лабораториях.⁵⁶ Мы не будем детально⁵⁷ рассматривать эту работу, но попытаемся дать обзор типов технологий которые рассматривались (и рассматриваются до сих пор как потенциально пригодные для изготовления зарядов чистого синтеза:

Химические ВВ могут использоваться для имплозии небольших количеств топлива синтеза (например, ДТ-газа). Это ведет к наблюдению большого числа реакций синтеза (простой пример см. в [304]). Однако, поскольку химические ВВ не могут создавать достаточно быстрые и сильные волны, достигаемые температура и степень сжатия всегда таковы, что термоядерное энерговыделение меньше, чем энергия химических ВВ, использовавшихся в устройстве.⁵⁸

⁵³ Значение моратория 1958-1961 гг. как добавочного импульса для получения LAMPF и WNR было подчеркнуто Марком Карсоном в [305, с.49]

⁵⁴ Нет надобности говорить, что компьютерные мощности получили пропорциональное ускорение, как и сегодня в случае Инициативы по Передовым Стратегическим Вычислениям (Advanced Strategic Computing Initiative — ASCI)

⁵⁵ Редко отмечают, что *подземные* ядерные взрывы на деле лучше подходили для разработки ядерного оружия, чем атмосферные испытания.

⁵⁶ О многих интересных аспектах “эпизода с чистой бомбой” и политике конструирования ядерного оружия в 1950-60-х гг. см. [73, 64]

⁵⁷ Тем не менее, необходимо отмечать, что как часть своих соответствующих программ МЯВ, и Американские, и Советские лаборатории разработали термоядерные заряды с очень малым энерговыделением деления. В случае Советской программы, в 1970 году был разработан термоядерный заряд, который имел менее $0,3 \text{ кт}$ энерговыделения деления на общее энерговыделение 15 кт , т.е. “на 98% чистый” заряд деления [307, с.20].

⁵⁸ Несколько интересных комментариев о трудности инициирования термоядерного взрыва без ничего, кроме ВВ, дано в [305, с.50-51].

Разработка и исследования *Синтеза с Магнитным Удержанием* (Magnetic Confinement Fusion — MCF) в течение долгого времени были засекречены в США под кодовым названием *Matterhorn* (Маттерхорн — гора в Пеннинских Альпах на границе Швейцарии и Италии — В.Л.). В частности, считалось, что некоторые схемы MCF (например, устройства магнитного сжатия) могут привести к зарядам чистого синтеза.

Устройства *фокусировки плазмы*, в которых мощный электрический разряд инициируется конденсаторной батареей в атмосфере *DD* или *DT*, являются самыми простыми из существующих генераторов сильных потоков нейтронов [6, с.172]. Они используются и разрабатываются в различных оружейных лабораториях и других организациях, например, [235].

Устройства *магнитного сжатия* могут приводиться в действие конденсаторной батареей [316] или химическими ВВ [321]. Технология этих устройств кумуляции энергии основана на классической физике и находится в разработке в течение долгого времени [310, 311, 312, 74]. Это — область, в которой Российские ученые вложили большие усилия, начиная с начала 1950-х [312, 315].

Подход к магнитному сжатию с химическими ВВ в настоящее время является предметом важного сотрудничества между Лос-Аламосом и Арзамасом-16 [321]. Первая в истории совместная научная публикация группы американских и русских оружейных ученых была результатом этого сотрудничества [320]: была получена горячая плазма и наблюдалось 10^{13} реакций *DT* синтеза — самое большое число в экспериментах под действием ВВ. Согласно авторам этой публикации, эти результаты хорошо согласуются с вычислениями, предполагавшими, что эта методика может использоваться для выпуска 1ГДж термоядерной энергии, т.е. эквивалентно по энергосодержанию 250 кг тротила.

В Лаборатории Филлипса (на базе ВВС Кертленд, Нью-Мексико) магнитное сжатие изучается на установке *Shiva Star*⁵⁹ которая активируется электрическим разрядом в 1.2МА, 4.8 МДж [317,318]. Первые экспериментальные результаты, при которых алюминиевая оболочка радиусом 4 см, толщиной от 0.1 до 0.2 см была сжата до 16.8 г/см³, продемонстрировали осуществимость электромагнитной имплозии сферической прокладки в режиме см/мкс [319]. Эта методика разрабатывается, в частности, для подкритического горения микроделения под действием антипротонов (см. разделы 3.2., 3.4 и ссылки там же).

Устройства под действием лучей (пучков) в которых мощное облучение (световое или рентгеновское) или ток (тяжелых ионов, легких ионов, электронов или антипротонов) используется для испарения поверхности таблетки из топлива термоядерного синтеза или деления (что приводит к колоссальному давлению реакции, которое вызывает имплозию топлива) на сегодняшний день являются наиболее важными устройствами, используемыми для изучения пер-

⁵⁹ Shiva Star — самая большая в мире импульсная батарея быстрых конденсаторов.

вичных и вторичных контуров бомб чистого синтеза. Будут ли сконструированы или нет очень компактные лазеры или генераторы пучков частиц (тем самым открывая возможность *запускаемых лучами бомб чистого синтеза*), синтез инерционного лучевого удержания делает возможной разработку технологии миниатюрных вторичных контуров для устройств чистого синтеза.

К этому списку надо добавить ряд более или менее перспективных концепций — и, возможно, несколько секретных. Однако, успехи, достигнутые по крайней мере в двух из этих методик (а именно синтезе с инерционным удержанием и магнитном сжатии) настолько впечатляющи,⁶⁰ что заряды «чистого синтеза» и «подкритического микроделения» сегодня очень близки к тому, чтобы стать технологически осуществимыми.

В этом контексте Ю, интервью Министра России по Ядерной Энергии Виктора Михайлова от июня 1994 является важным. В.Н.Михайлов — один из ученых, которые помогли разработать нынешнее поколение ядерного оружия.⁶¹ Согласно пресс-релизу агентства Рейтер он сказал, что

«Если военные исследования не будут остановлены, новое поколение ядерного оружия может быть разработано к 2000 году. [...] Это четвертое поколение ядерного оружия может быть направлено более аккуратно, чем сегодняшние вооружения. [...] новое оружие может быть запрограммировано на «выметание» людей, оставляя здания. Вопрос жребия, Россия или Соединенные Штаты станут первой страной, которая изобретет новые вооружения» [306]

⁶⁰ Интересно отметить, что большая часть этих успехов была достигнута в несколько лет, предшествовавших переговорам и подписанию ДЗВЯИ.

⁶¹ Он также является редактором сборника «Ядерные взрывы в СССР», Радиевый Институт им. Хлопина, Москва, 1994

3.8. Технология четвертого поколения ядерного оружия

В настоящем отчете ударение делалось скорее на научных принципах, а не на технологии. Это означает, что для того, чтобы оценить *технологическое расстояние*⁶² четвертого поколения ядерного оружия, мы должны рассмотреть все препятствия, которые могут отложить или предотвратить его воплощение. Это будет сложно, особенно потому, что оценка такого рода сильно зависит от политических и экономических факторов, так же, как и от науки и технологии. В этом разделе мы упомянем только ряд важных технологических факторов.

В то время, как четвертое поколение ядерного оружия воспользуется рядом новых концепций (например, магнетизированные [93] или металлизированные [297] топлива, атомный или ядерный изомеризм [255], антиматерия [215, 203] и т.д.) они также будут широко пользоваться классическими концепциями, такими как *электромагнитная кумуляция энергии*⁶³ и *стадийность* (при помощи которой химическая или электрическая энергия из компактного источника усиливается до более высокого энерговыделения и затем используется для выпуска еще большей энергии). Например, в обычном ВВ, стадийность обозначает зажигание большого количества относительно нечувствительного ВВ (вторичный контур, тротил, например) малым количеством первичного ВВ (детонатор, азид свинца, например).

Стадийность является ключевой концепцией, которая позволит добиться миниатюризации и «оружизации» четвертого поколения ядерного оружия. Как уже отмечалось, небольшие таблетки плутония или термоядерного топлива могут быть сильно сжаты различными типами лучей или магнитной имплозией, как в экспериментах микроделения под ускорением антиматерии [215]. В любом случае, вопрос в том, можно ли построить компактное (но одноразовое (для отдельного применения) устройство, которое может заменить огромный ускоритель, лазер, конденсаторную батарею или магнит, которые нужны для лабораторной имплозии таблеток делящегося или термоядерного материала.

Общий метод использует для этой цели химические ВВ как первичный источник энергии.⁶⁴ Это хорошо известная методика в случае сжатия магнитным потоком, при которой сильные магнитные поля генерируются в довольно компактных устройствах, запускаемых ВВ [316, 321]. Но эта же методика может быть применена к лазерам: на международном семинаре 1991 года при Аспирантуре Флота в Монтерее, Калифорния, была впервые раскрыта информация о

⁶² То есть время, цену и сложность, которые разделяют гипотетическое оружие от производства и размещения.

⁶³ Обзор и введение в процессы кумуляции энергии см. в [313, 314].

⁶⁴ В то время как химические ВВ имеют удельные энергии порядка 5 МДж/кг и химические сверх-ВВ, возможно, порядка 200 МДж/кг, возникающие технологии, такие как *заряжаемые* тонкопленочные батареи и сверхпроводящие кольца имеют удельные энергии порядка 1—50 МДж/кг. Преимущество этих систем, в которых энергия может запасаться непосредственно перед использованием, в том, что они потенциально намного безопаснее, чем химические ВВ

русском мегаджоулевым лазере Н.Г.Басова, приводимом в действие химическим ВВ [337].

Важным аспектом стадийности является то, что она может включать комбинацию нескольких методик, которые сначала считались несовместимыми. Примером может служить комбинация имплозии ВВ и лазерной имплозии. Действительно, идея сжатия лазером с предварительным сжатием ВВ была разработана и экспериментально испытана в Польше между 1972 и 1975 гг. В этих экспериментах, предварительное сжатие порядка 10 было достигнуто при помощи ВВ, а дальнейшее сжатие порядка 5.5 было достигнуто двух лучевой лазерной системой, производящей два противоположных лазерных импульса, давая общее сжатие в диапазоне 50—60 [335].

Предельная техника стадийности состоит в использовании очень малого количества ядерных изомеров, металлического водорода, сверхтяжелых ядер или антиматерии в качестве первичного контура. Такие материалы слишком дорого или драгоценны для использования в качестве основного заряда конструкции⁶⁵ или основного топлива ракеты [204, 220, 222]. В четвертом поколении ядерного оружия кардинальным преимуществом антиматерии будет то, что она дает очень сильный импульс энергии при простом контакте с обычной материей: нет нужды в большом лазере или любом другом громоздком устройстве. От пикограмма до микрограмма антипротонов достаточно для инициирования цепной реакции или подкритического горения в сильно сжатой таблетке делящегося материала [215] (или в смеси делящегося термоядерного материалов [222]) или чтобы инициировать горение термоядерного синтеза [203, 207] или вызывать абляционное сжатие [220] термоядерной таблетки. Более того, даже еще меньшего количества антипротонов может быть достаточно для детонирования малого количества сверхтяжелого или другого экзотического материала.

Следовательно, имеется ряд методик, которые могут быть потенциально использованы как первая ступень легковесных ядерных вооружений четвертого поколения. В этом случае вторая ступень может быть мощным источником рентгеновского излучения, например, взрывающаяся плутониевая таблетка, третья ступень — более мощная таблетка термоядерного топлива и т.д.

Ядерные вооружения четвертого поколения могут развиваться по двум основным направлениям. Первая может основываться на магнитном сжатии и может довольно быстро привести к какой-либо «оружизируемой» концепции, основанной на исследованиях Лос-Аламоса—Арзамаса-16 по зарядам чистого синтеза под действием ВВ [320, 321]. Аналогичные довольно краткосрочные перспективы существуют для зарядов подкритического деления, запускаемого антипротонами, изучаемых в Лаборатории Филлипса [215]. Такие заряды могут иметь полную массу в диапазоне от 10 до 100 кг.

⁶⁵ Бомбы на чистой антиматерии будут не только очень дороги, вероятно они будут очень небезопасны.

Второе основное направление может базироваться на экзотических материалах и более передовых концепциях. Хотя в это трудно поверить, этот маршрут указывает на похожие на научную фантастику «атомные пули», которые могут весить намного меньше 1 кг. Такое ядерное оружие четвертого поколения может иметь энерговыделения от 1 до 10 тон в тротиловом эквиваленте.

Техника четвертого поколения ядерного оружия будет широко использовать *нанотехнологии* и различные методики миниатюризации, которые разрабатываются, в частности, для диагностических устройств ИТС [343, с. 13] и изготовления мишеней ИТС. Действительно, технология мишеней ИТС — исключительно усложненная [336, 94]. Большая ее часть засекречена,⁶⁶ как вследствие ее военного потенциала, так и из-за ее будущего влияния на промышленные технологии.

Нанотехнология определенно является наиболее важной из неядерных возникающих военных технологий [338]⁶⁷, [339]⁶⁸, [340]⁶⁹, [341]⁷⁰. Она кардинально важна для четвертого поколения ядерных вооружений в двух отношениях: 1) Нанотехнология и микротехнология позволит изготавливать очень малых механических сборок (таких, как суб-миллиметровые микро-ловушки для хранения антипротонов); и 2) производство очень мелкодисперсных

⁶⁶ Согласно [94, гл.Х, с.229], первая несекретная статья на эту тему была опубликована израильским ученым [334].

⁶⁷ Этот отчет — хорошее введение в микро-электро-механические системы (MEMS).

⁶⁸ Этот документированный брифинг касается нескольких возникающих технологических областей, например, биотехнологии и биоинженерии, микро- и нано- технологий, передовых энергетических и силовых технологий и т.д.

⁶⁹ На Четвертой Конференции по Перспективам Молекулярной Нанотехнологии в ноябре 1995, закрывающее обращение адмирала Дэвида Э. Иеремии, ВМФ США (в отставке), бывшего вице-председателя Объединенного Комитета Начальников Штабов, является отличным примером современной военной риторики пост-ядерного времени:

«(На театре военных действий будущего) будут доминировать умные вооружения, которые позволят нам уменьшить оптовое разрушение и огромные расходы боеприпасов. Целью является все более и более тонкая точность, большая и большая избирательность и меньшая необходимость массы. Действительно, нужда в оружии массового уничтожения уменьшается, поскольку это оружие становится все менее полезным для нас по своим военным характеристикам. Оружие массового поражения — политический инструмент, используемый одним государством для воздействия на население другого, а не тот военный инструмент, который нужен нам, военным, для выполнения наших военных операций. (...) Военные применения молекулярного производства имеют даже больший потенциал, чем ядерное оружие, для радикального изменения баланса сил» [340, с.15-16].

⁷⁰ В примечании к предисловию к сборнику статей по нанотехнологии, редактор (Б.С.Крэнделл) цитирует бюллетень, который он распространял на конференции по нанотехнологии в Пало Альто в ноябре 1991 г.:

«Современная «реальность» западной культуры — милитаристский капитализм. Ракетные системы получают намного большее финансирование, чем природное здравоохранение и образование (не касаясь образования вообще). В следующие несколько десятилетий, лаборатории, исследующие и разрабатывающие нанотехнологии, управляемые многими культурными группами, чувствующими необходимость наложить гарантии своих частных ценностей насильственному аннулированию жизни и свободы других. Их возможности пугают, включая алмазо-подобные танки, «конструкторские вирусы» и невообразимо тщательное слежение. Несмотря на внутренние опасности, открытая разработка представляется единственным жизнеспособным способом действий» [341, с.193].

«сверхпластичных» материалов⁷¹ позволит осуществить изготовление очень малых компонентов с высоко прогнозируемым поведением при механических напряжениях (в результате их хорошо исследованных металлургических качеств).

Технологии серийного производства ядерного оружия четвертого поколения будут похожи на технологии производства микрокомпьютеров. Поскольку эти виды оружия будут содержать только небольшое количество дорогостоящих специальных материалов, их стоимость будет низкой. Их небольшой размер и вес сделает их подходящими для доставки при помощи артиллерийских или танковых снарядов, кластерных бомб, небольших ракет, беспилотных самолетов, крылатых мини-ракет и т.д.

⁷¹ Такие материалы — замечательное достижение оружейной лаборатории Челябинск-70[342]

