

## 2.2 Импульсные системы

Управляемый термоядерный синтез может быть достигнут не только на реакторах с магнитными ловушками, но и на установках инерционного удержания.

### 2.2.1 Инерциальное удержание

Необходимые критерии УТС можно получить, как показал А.Д.Сахаров в 1960 г., и без применения магнитных ловушек, позволяя нагретой D–T-плазме, в которой протекают реакции синтеза, свободно разлетаться во все стороны. Разлету плазмы препятствует инерция ее частиц, обладающих массой. Даже очень нагретая плазма, созданная быстрым внешним облучением, будет «инерциально» удерживаться в течение наносекунд ( $10^{-9}$  с). Столь короткое время, предоставленное для термоядерных реакций, должно быть скомпенсировано высокой плотностью плазмы, которая должна в 100 раз превосходить плотность твердого тела. Вместо очень разреженной, но долго удерживаемой магнитным полем плазмы предлагается противоположное ее состояние – очень плотная и короткоживущая. А результат тот же – превышение энергии, выделяемой в реакциях синтеза, над энергетическими затратами. «Инерциальный термояд» – это путь отдельных микровзрывов D–T-мишеней (шарика радиусом 1 мм), следующих с определенной частотой, наподобие вспышек бензина в цилиндрах ДВС. При этом методе осуществляется быстрое сжатие вещества до столь высоких плотностей, что термоядерная реакция успевает завершиться прежде, чем произойдет его испарение. Дело в том, что при мгновенном испарении поверхностных слоев мишени вылетающие частицы приобретают очень высокие скорости, и шарик оказывается под действием больших сжимающих сил. Они аналогичны движущим ракету реактивным силам, с той лишь разницей, что здесь эти силы направлены внутрь, к центру мишени. Этим методом можно создать давления порядка  $10^{11}$  МПа и плотности, в 10000 раз превышающие плотность воды. При такой плотности почти вся термоядерная энергия высвободится в виде небольшого взрыва за время  $10^{-12}$  с. Происходящие микровзрывы, каждый из которых эквивалентен 1–2 кг тротила, не вызовут повреждения реактора, а осуществление последовательности таких микровзрывов через короткие промежутки времени позволило бы реализовать практически непрерывное получение полезной энергии. Для инерциального удержания очень важно устройство топливной мишени. Мишень в виде концентрических сфер из тяжелого и легкого материалов позволит добиться максимально эффективного испарения частиц и, следовательно, наибольшего сжатия.

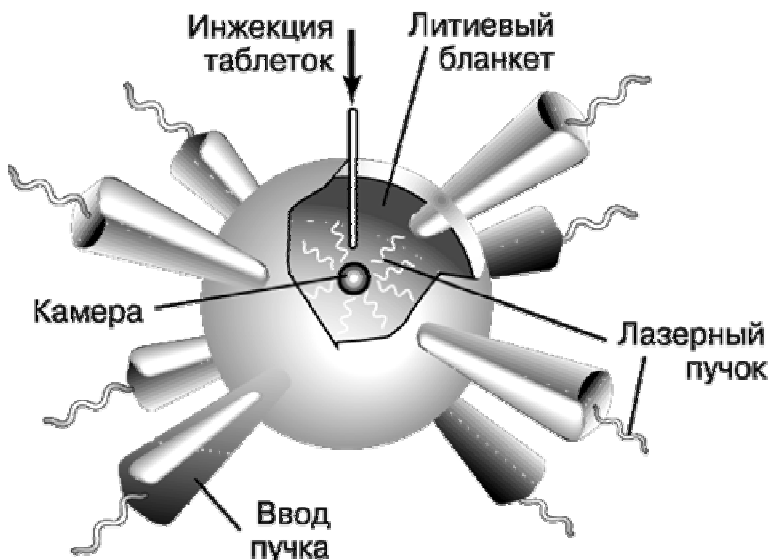
Таким образом, идея метода заключается в том, что дейтерий-тритиевая смесь в конденсированном (замороженном) состоянии сверхбыстро нагревается до температуры порядка  $10^8$  К. Длительность сохранения объема топлива определяется временем разлета плазмы, которое имеет порядок  $d/u$ , где  $d$  - линейный размер объема,  $u$  - средняя скорость частиц нагретой плазмы. Это время можно принять за время удержания плазмы, которое входит в критерий Лоусона. Тогда можно оценить размер  $d$ :  $nd/u \sim L$ , откуда  $d \sim Lu/n$ . Используя для дейтерий-тритиевой плазмы значения  $L=10^{14}$  с/см<sup>3</sup>,  $u=10^8$  см/с и  $n=5 \cdot 10^{22}$  см<sup>3</sup>, получим значение  $d=2$  мм, а время удержания  $t=2 \cdot 10^{-9}$  с.

Сжатие и нагрев до термоядерных температур можно производить сверхмощными лазерными импульсами, со всех сторон равномерно и одновременно облучающими топливный шарик, потоком ускоренных до релятивистских скоростей электронов, бомбардировкой ускоренных до высоких энергий ионов (как легких, так и тяжелых), направленным взрывом химических веществ.

### 2.2.2 Лазерный термояд

Конкретный путь реализации лазерного термояда был указан Н.Г.Басовым и О.Н.Крохиным в 1964 – обжимать и нагревать D–T-мишени мощными лазерными пучками, самой природой предназначенными для быстрого ввода в малый объем огромной порции энергии. Это направление

получило название **лазерного термояда**. За прошедшие 40 лет лазерный метод проделал большой



путь. Были созданы многопучковые установки, которые позволяли синхронно сбрасывать импульсы лазерного излучения на сферические мишени, добываясь их равномерного сжатия и разогрева.

**Рис.9** В лазерном реакторе УТС маленький шарик, содержащий дейтерий и тритий, облучается со всех сторон несколькими лазерными пучками одновременно. За счет бурного испарения частиц с его поверхности шарик сжимается, в результате чего температура и плотность внутри него повышаются до уровня, необходимого для термоядерной реакции.

пригодные для УТС, и многослойные мишени, сжимаемые равномерно без потери формы. Плотность в фокусе лазерного луча достигла  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>. Расчеты показывают, что при энергии лазерного излучения порядка мегаджоуля ( $10^6$  Дж) и КПД лазера не менее 10% производимая термоядерная энергия должна превышать энергию, израсходованную на накачку лазера.

Водородный синтез происходит в миллиметровых размеров шариках, наполненных дейтерием или дейтерий-тритиевой смесью в твердом либо газообразном состоянии. Шарики один за другим падают в рабочее пространство установки, где по ним поочередно со всех сторон ударяют мощные лазерные лучи. Они на лету сильно нагревают и сжимают шарик-мишень, в котором, как в водородной бомбе, происходит термоядерный микровзрыв и выделяется значительная энергия

Термоядерные лазерные установки имеются в исследовательских лабораториях России, США, Западной Европы и Японии.

И все же лазерный вариант отстает от магнитного. Главный недостаток – слабое поглощение лазерного излучения горячей плазмой: чем выше ее температура, тем меньше она «замечает» лазерный луч, проходящий через нее. Велики потери на отражение от холодной короны, образованной вокруг мишени. Низок КПД мощных лазеров. «Лазерный термояд» еще не исчерпал своих потенциальных возможностей, он нуждается в новых подходах, чтобы стать более эффективным. И на этом пути нет надежды на быстрое решение проблемы УТС.

### 2.2.3 Пучковый термоядерный синтез

В настоящее время изучается возможность использования вместо лазерного луча, пучка тяжелых ионов или сочетания такого пучка со световым лучом. Благодаря современной технике такой способ инициирования реакции имеет преимущество перед лазерным, поскольку позволяет получить больше полезной энергии. На этом направлении возникло несколько методов **пучкового термояда** – электронного, протонного, ионного, в последнее время – пучков тяжелых ионов. Тут выбор достаточно большой – в дело пойдут потоки любых частиц, получаемые на ускорителях. Плюсы пучкового термояда – высокий КПД (особенно для электронных пучков), сильное взаимодействие с мишенью (для протонов и ионов), огромная концентрация энергии при сбросе на мишень тяжелых ионов, хорошо изученная методика разводки пучков. Недостатки – электростатическое отталкивание одноименно заряженных частиц, трудность фокусировки пучка на мишени, сложность одновременного сброса на мишень многих пучков. Пока пучковый термояд отстает от лазерного.

## 2.2.4 Рентгеновский термоядерный синтез

Один из вариантов пучкового термояда базируется на использовании пучка рентгеновского излучения. При сдвливании электрическим разрядом (**Z-пинч**) вольфрамовых проволок, окружающих дейтериевую мишень, проволоки испаряются, создавая мощный рентгеновский импульс, который сжимает и нагревает мишень. На установке Национальной лаборатории Сандиа (США) достигнута, по-видимому, рекордно высокая температура, свидетельство чему – большой выход нейтронов ( $10^{10}$  на один Z-пинч) из дейтериевой плазмы. Это достижение – важный успех. Здесь была реализована D-D реакция, вместо обычно исследуемой D-T – реакции. Использование рентгеновской установки вместо дорогого лазера ведет к удешевлению ТЯ-энергии, повысив ее конкурентную способность. Отказ от D-T и переход на D-D -топливо снимет сложную проблему наработки трития. А это не только экономическая выгода, но и важный экологический стимул. Первый успех установки Сандиа дал импульс для разработки конкурирующей с токамаком силовой станции «Z-pinch fusion power plant».

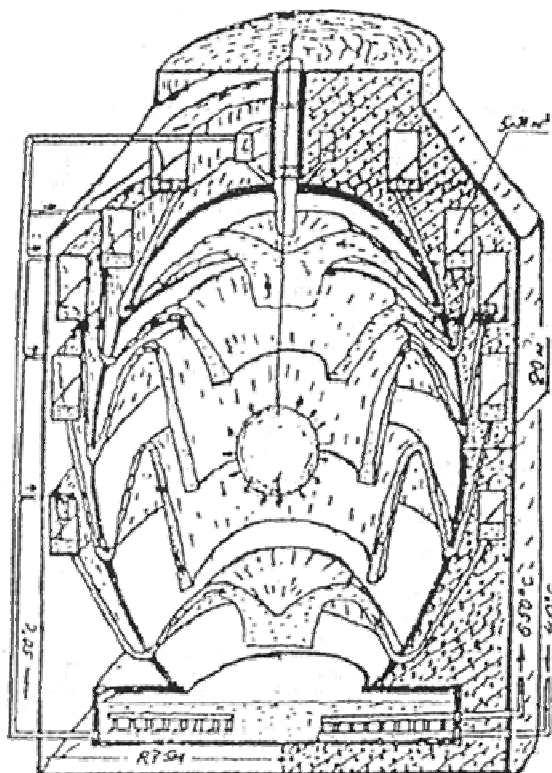
В принципе, современные методы уже сейчас позволяют создать очень высокие давления. Известно, что в статических условиях максимальное давление определяется прочностью алмаза: оно составляет 0.5 млн. атм., так что установки с алмазными наковальнями работают до давлений не более 5-6 млн. атм. Это давление можно поднять в установках инерционного удержания плазмы. Ожидается, что через 15-20 лет будет достигнуто давление в 5 млрд. атм в реакторах с повторяющимися взрывами. Но у взрывчатки есть предельный уровень мощности (порядка 1 ТВт), который достигается при химических реакциях. В установке инерционного удержания, которая создается в США, мощность составит 100 ТВт. Для справки: 10 ТВт - мощность всех электростанций, которые ныне существуют на Земле.

Таким образом, лазерные, электронные пучки, ионные пучки и установки с Z-пинчем дают уникальную возможность получать очень высокие давления и температуры. На установке «Ангара-5-1», сделанной в Троицке (ТРИНИТИ), удалось получить давление в десятки миллионов атмосфер. В ней используется излучение плазмы, которая ярче Солнца в  $10^8$  раз (Кстати, на Ангара-5-1 получен еще больший выход нейтронов, чем на Сандиа)

К сожалению, для реализации УТС этого мало.

## 2.2.5 Взрывная дейтериевая энергетика

С середины 90-х гг. в Российском федеральном ядерном центре ВНИИТФ (г. Снежинск, ранее Челябинск-70) разрабатывается метод получения ТЯ-энергии путем взрывов атомных зарядов, инициирующих D-D-реакцию. Уран или плутоний будут выполнять роль «запала». При этом предлагается производить в камере **КВС (котел вспышечного сгорания)** термоядерные взрывы большой мощности (а не микровзрывы, как в инерциальном термояде) с целью получения энергии. Достаточно создать камеру достаточной площади, заполнить ее частично теплоносителем, периодически взрывать в ней дейтериевые энергозаряды, а выделяющуюся энергию через теплообменники преобразовывать в электричество и тепло, как в обычных АЭС. Такой котел внутреннего сгорания (КВС) может работать в замкнутом энергетическом цикле. Имеющихся запасов  $^{238}\text{U}$  хватит мировой энергетике на сотни лет, даже если все урановые



рудники будут закрыты. Энергетическая выгода заключается в том, что выделяемая в реакции энергия идет на производство электричества, а нейтроны регенерируют  $^{239}\text{Pu}$  из  $^{238}\text{U}$ , как это делается сейчас в реакторах на быстрых нейтронах (возможен ториевый цикл – получение из ядер  $^{232}\text{Th}$  нового топлива, ядер  $^{233}\text{U}$ ). Используется только дейтериевое топливо – благодаря высокой температуре, получаемой при взрыве атомного запала. Предлагаемая мощность зарядов – 10 килотонн в тротиловом эквиваленте, что в  $10^5$  раз больше мощности микровзрывов лазерных мишеней!

**Рис. 10.** Схема реактора КВС (взрывная дейтериевая энергетика)

Такой взрыв может выдержать КВС очень большого размера – диаметр 120 м, высота 250 м, камера из железобетона со стенками толщиной 25 м, наполненная разреженным аргоном (**Рис. 10**). Для смягчения ударной волны за секунды до взрыва перед стенками создается защитный занавес из жидкого натрия, одновременно используемого как теплоноситель первого контура и как аккумулятор наработанного ядерного топлива. Установка размещается под землей в скальном грунте. По размерам и техническим параметрам КВС – это монстр, по сравнению с которым токамак выглядит жалким лилипутом. Схема предполагаемое КВС-электростанции приведена на **Рис.11**.

Дополнительное преимущество предлагаемого метода в том, что решается проблема оружейного плутония, запасы которого, согласно международным договорам по ядерному разоружению, некуда девать. Накопленного плутония хватит для обеспечения мировой энергетики на тысячу лет. Возможно, именно этот «задел» позволит «взрывной энергетике» быстро заменить традиционные электростанции.

Но пока реализация этого метода вряд ли возможна. Огромная мощность взрывов, грандиозность КВС, высокая радиоактивность продуктов, постоянная опасность ужасных катастроф. Кроме того, все атомные взрывы, даже подземные, запрещены. Даже звезды (за исключением вспыхивающих новых и сверхновых) выбирают стационарный, контролируемый ТЯ-синтез. В целом метод крайне «тревожный», на который не так просто решиться даже под угрозой энергетического голода.

**Рис.11.** Схема КВС-электростанции



## 2.2.6 Холодный термоядерный синтез

Особняком стоит метод УТС, в котором не нужны горячая плазма, микро- и макровзрывы, вообще какой-либо разогрев. Это направление, получившее название холодного термояда, или, более правильно, **мюонного катализа**, было предложено А.Д.Сахаровым и Я.Б.Зельдовичем в 1957 г. Суть его заключается в использовании нестабильной частицы – отрицательно заряженного мюона, масса которого в 200 раз больше массы электрона. Мюон по своим свойствам очень похож на электрон, в частности, он может замещать электрон в атоме, но радиус мюонной орбиты в 200 раз меньше, чем электронной. Атомы дейтерия и трития, в которых место электрона занял мюон, могут объединяться в молекулы, где ядра дейтерия и трития сближены в 200 раз, до расстояния около  $10^{-11}$  см, что все еще намного больше радиуса ядерных сил ( $10^{-13}$  см). В горячей плазме при таком сближении ядерная реакция не пойдет, т.к. встреча ядер длится мгновение, после чего они разлетаются. Но в мезомолекуле дейтерий и тритий постоянно находятся на таком расстоянии и

могут, «почувствовав» друг друга, с заметной вероятностью осуществить «туннельный переход», вступив в D-T-реакцию. Образуются ядро гелия и нейтрон, выделится энергия синтеза, а мюон, ставший вновь свободным, может сесть на орбиту соседнего атома, заменив в нем электрон. Произойдет новое сближение ядер и новая реакция синтеза. Отрицательный мюон выступает здесь в роли активного посредника, сводящего вместе дейтерий и тритий. Он – ядерный катализатор. Оказывается, за время своей жизни (2 мкс) мюон успевает осуществить до ста D-T-реакций.

Преимущества метода очевидны: не нужны сверхвысокие температуры, нет надобности в капризной плазме, отпадают сильные магнитные поля и мощные пучки частиц. Но простота не дается даром – нужны интенсивные потоки мюонов, получаемые на ускорителях во взаимодействии энергичных протонов с ядрами, и, как в любом методе, необходимо условие положительного выхода энергии. Сейчас идет борьба за энергетическую «цену» одного мюона, и если она окажется меньше суммарного выхода реакций синтеза, мю-катализ будет включен в реестр конкурирующих путей УТС.

Есть и другие, еще более экзотические проекты. Предлагается, например, осуществлять термоядерную реакцию, сталкивая пучки ионов дейтерия в коллайдере.

### **2.3 Тупиковые пути ядерного синтеза**

Не все подходы к методам реализации УТС оказались плодотворными. Не обошлось без дутых сенсаций и смелых надежд, оказавшихся несостоятельными.

Толчком к развертыванию исследований по холодному ядерному синтезу (ХЯС) послужило интервью М. Флешмана и С. Понса (США) 23 марта 1989 г. газете "Financial Times", в котором они заявили, что возможно создание энергетического источника промышленных масштабов на основе слияния ядер тяжелого водорода при комнатной температуре. Тогда, в 1989 году, появилась надежда на получение колоссального количества энергии в простом приборе для электролиза воды: электроды были изготовлены из палладия, используемая вода была "тяжелой". В ходе электролиза этой тяжелой воды с помощью электродов из палладия ядра дейтерия, якобы, сливались, образуя изотопы трития и гелия. Экспериментаторы, опять же якобы, однажды зафиксировали потоки нейтронов и добились выделения тепла, не предусмотренного законами электролиза. Ионы дейтерия скапливались в электроде, где из-за большого давления мог происходить «туннельный эффект», как при мю-катализе. Никакие теоретические оценки не подтверждали такой возможности. Всего за первые два года, прошедшие после опубликования статьи Флешмана и Понса было опубликовано более двух тысяч экспериментальных и теоретических работ, в США выдано 96 заявок на патенты.

Ажиотаж возник благодаря двум подтверждениям из Техасского университета "Эй энд Эм" и Института технологических исследований штата Джорджия. Однако когда электрохимики из Техаса провели контрольные измерения не только с тяжелой, но и обыкновенной водой, выяснилось: повышенное выделение тепла было вызвано электролизом последней, поскольку термометр служил в качестве второго катода! В Джорджии же нейтронные счетчики оказались настолько чувствительными, что реагировали на тепло поднесенной руки. Так был зарегистрирован «выброс нейтронов».

Включившиеся в исследования высококвалифицированные ученые из ведущих физических центров ряда стран мира пришли к однозначному выводу о беспочвенности надежд на возможность создания подобного источника энергии. Обошлась эта проверка, как признавал тот же "Nature" в конце 1989 года, в 50 миллионов долларов. Тем не менее, работы по ХЯС продолжаются и сегодня. По мнению академика А.Л. Бучаченко (Институт химической физики РАН), "холодный ядерный синтез – на 99% авантюра, но тут есть и интрига: организовать разветвленную цепную реакцию (холодный термояд) нельзя, однако наблюдаемое явление, природа которого пока неясна, может быть интересно с точки зрения физики твердого тела.

Отвергнув этот метод, исследователи получили положительный результат: оказалось, что при некоторых условиях ядерный синтез возможен без высокой температуры за счет скрытого

ускорения частиц в субатомных электрических полях. Получить на этой основе энергетически выгодный УТС невозможно.

Другая сенсация пока еще жива, но, похоже, и она скоро заглохнет. Речь идет о пузырьковом термояде, предложенном 10 лет назад академиком Р.Нигматулиным (Уфимский научный центр) и подтвержденном группой американских исследователей во главе с проф. Р.Лэхи. Это тоже вариант холодного синтеза, но с более серьезным обоснованием. В дейтерированном ацетоне создавались условия роста микропузырьков газа, а затем внешним акустическим воздействием проводилось их сжатие (кавитация), что резко повышало температуру (до нескольких миллионов градусов) и могло инициировать реакции D-D-синтеза. Регистрировались нейтроны и активность трития – индикаторы D-D- реакции. Несомненно, ядерный синтез происходил, но совершенно не очевидно, что будет получен энергетически выгодный термояд. Критические замечания, появившиеся в печати, показывают, что исследователи переоценили полученные результаты, а теоретические расчеты российского ученого слишком неопределенны, чтобы на их основе делать заключение о перспективности метода.

Под "холодным ядерным синтезом", который теперь предлагается заменить на термин "ядерные процессы, индуцированные кристаллической решеткой", понимаются аномальные с точки зрения вакуумных ядерных столкновений, стохастические низкотемпературные ядерные процессы (слияние ядер с выделением нейтронов), существующие в неравновесных твердых телах, которые стимулируются трансформацией упругой энергии в кристаллической решетке при фазовых переходах, механических воздействиях, сорбции или десорбции водорода (дейтерия). Другими словами, это аналог «горячей» термоядерной реакции (при которой происходит слияние ядер водорода и превращения их ядра гелия, с выделением колоссальной энергии), проходящий при комнатной температуре.

Холодный термоядерный синтез, точнее определять как химически индуцированные фотоядерные реакции. И хотя прямой холодный термоядерный синтез осуществить не удалось, тем не менее он подсказал новые стратегии. Чтобы запустить термоядерную реакцию нужно генерировать нейтроны. Идея проста: механостимулированные химические реакции приводят к возбуждению глубоколежащих электронных оболочек и рождают рентгеновское или гамма-излучение, которое захватывается ядрами (фотоядерная реакция). Далее возбужденные таким образом ядра распадаются, генерируя нейтроны (и, возможно,  $\gamma$ -кванты). Основная проблема в том, чтобы механическое воздействие возбуждало внутренние электроны оболочки, поскольку только в этом случае конверсия внешних электронов на внутренние вакансии будет генерировать жесткий рентген или  $\gamma$ -кванты. Ясно, что наиболее вероятно это осуществить в условиях ударной волны (при взрыве обычной взрывчатки)!

### **3. БЕЗОПАСНОСТЬ УСТАНОВОК УТС**

Достоверная оценка безопасности термоядерного реактора получена пока только в рамках проекта ИТЭР. В этом реакторе практически вся радиоактивность сосредоточена в твердых отходах (конструкционных материалах, бридере (бланкете) топлива и бериллии, если он есть в реакторе). Единственным радиоактивным газом является тритий, величины предельно допустимых концентрации которого на несколько порядков ниже, чем для большинства остальных радиоактивных материалов реактора. В инженерном проекте ИТЭР приведен детальный анализ аварийных ситуаций с оценкой возможных выбросов радиоактивности. Максимально возможный аварийный выброс не превосходит примерно 50 г по тритию, 25 г по продуктам коррозии и 40-100 г по пыли, образующейся в плазменной камере. При аварии суммарные дозы облучения на границе площадки станции оказываются в 2-10 раз ниже допустимой для населения дозы, так что его эвакуации не потребуется.

Пассивная безопасность реактора заложена в физике: температура плазмы падает из-за радиационного охлаждения в случае попадания в нее материалов первой стенки, если эта стенка

плавится или испаряется. Низкая энергонапряженность и большая тепловая инерция обеспечивают пассивное охлаждение конструкций в случае аварийных ситуаций, связанных с потерей теплоносителя или ограничения его циркуляции. Максимальные температуры конструкционного материала не превысят 600-700°C, а общая структурная устойчивость конструкции и барьеры безопасности сохранятся.

Малый выброс радиоактивности из термоядерного реактора при любой аварии, размещение систем очистки и хранения трития в отдельных зданиях, а отработавших элементов реактора (в первую очередь blankets) - в изолированных зданиях систем выдержки, хранения и рефабрикации делают довольно бессмысленной попытку проведения террористических акций на площадке термоядерной электростанции с целью нанесения ущерба населению. Если пассивная безопасность обеспечена, а выбросы радиоактивных продуктов за пределы площадки термоядерной электростанции минимальны, то их можно строить в густонаселенных районах и окрестностях больших городов.

Отсутствие реакций деления ядерного топлива в термоядерном реакторе существенно изменяет характер радиоактивных отходов: нет трансурановых элементов, продуктов деления и радиоактивных газов, кроме трития. Тритий нарабатывается в замкнутом цикле станции, поэтому его транспортировка к станции, исключая начальную загрузку, не требуется. Анализ показал, что отсутствие радиоактивных газов и относительно низкая удельная радиоактивность отработавших срок элементов конструкций позволяют хранить отходы на территории станции, причем подавляющее большинство из них может размещаться на открытой площадке. Возможна ручная или дистанционная переработка до 60% материалов отслуживших срок конструкций, а еще 20-25% могут быть переработаны после 100 лет выдержки. Завод по переработке может находиться рядом с термоядерной электростанцией, что снимет проблему перевозки многотонных радиоактивных элементов реактора.

Несмотря на эти достоинства, экономику будущей термоядерной энергетической станции сегодня, когда еще не реализован УТС, оценить непросто. Очевидно, что на нынешнем этапе из-за сложности технологии и низкой энергонапряженности термоядерная электростанция будет проигрывать энергетике деления, энергетике угля, газа и нефти. Однако исчерпание невозобновляемых ресурсов, в том числе и урана для АЭС на тепловых нейтронах, рано или поздно вынудит обратиться к термоядерным электростанциям как экологичным и безопасным. Термоядерная энергетика в первую очередь могла бы развиваться там, где в силу разных причин нельзя строить АЭС.

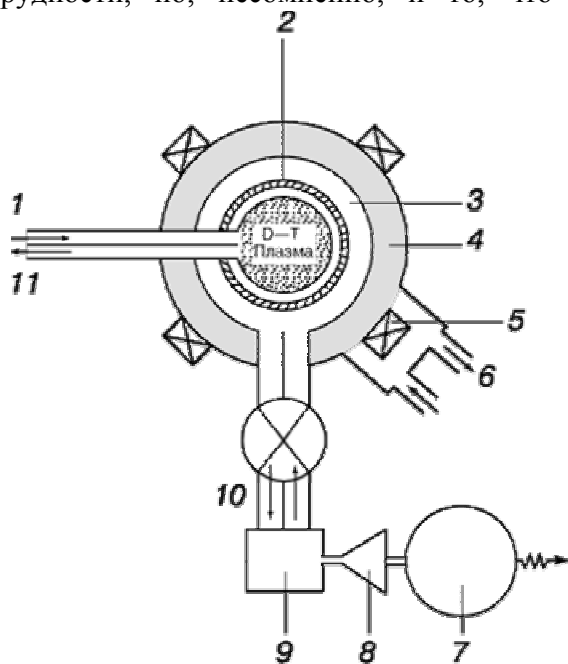
Доступность топлива для термоядерной электростанции - важный фактор для большинства стран мира. Равнораспределенность топлива смягчит многие мировые конфликты, возникающие из-за крайне неоднородного распределения на земном шаре природных запасов нефти, газа и даже угля. Проведенный в Европе анализ свидетельствует, что если человечество решится возвратиться к выбросам CO<sub>2</sub> на уровне 50-х годов прошлого столетия, термоядерные электростанции могут занять значительную долю (около 20%) в мировом производстве электроэнергии.

Экологичность термоядерной энергетике основана, в частности, на отсутствии выбросов CO<sub>2</sub>. Нарастающее поступление CO<sub>2</sub> в атмосферу от традиционной энергетике – важная проблема в связи с возможным потеплением климата. Только Китай, при выходе на европейский уровень энергопотребления на душу населения должен сжигать ежегодно 2-3 т/чел, угля, что при численности населения 1.5 млрд. человек увеличит количество сжигаемого на земном шаре угля на 100%. В мире нет технологий очистки отходящих газов от CO<sub>2</sub> - основного продукта горения. Проблема экологически приемлемой энергетике Китая и других развивающихся стран, по сути, является общемировой. В ее решении термоядерные электростанции могут сыграть важную роль.

## 4. ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Устройство термоядерной электростанции схематично показано на **Рис. 12**. В камере реактора находится дейтерий-тритиевая плазма, а окружает ее литиево-бериллиевый «бланкет», где происходит поглощение нейтронов и воспроизводится тритий. Вырабатываемое тепло отводится из бланкета через теплообменник в обычную паровую турбину. Обмотки сверхпроводящего магнита защищены радиационными и тепловыми экранами и охлаждаются жидким гелием. Однако не решены еще многие проблемы, связанные с устойчивостью плазмы и очисткой ее от примесей, радиационным повреждением внутренней стенки камеры, подводом топлива, отводом теплоты и продуктов реакции, управлением тепловой мощностью.

Следующее поколение токамаков должно решить технические проблемы, связанные с промышленными реакторами УТС. Очевидно, что перед их создателями возникнут немалые трудности, но, несомненно, и то, что по мере осознания людьми проблем, касающихся окружающей среды, источников сырья и энергии, производство электроэнергии новыми рассмотренными выше способами займет подобающее ему место.

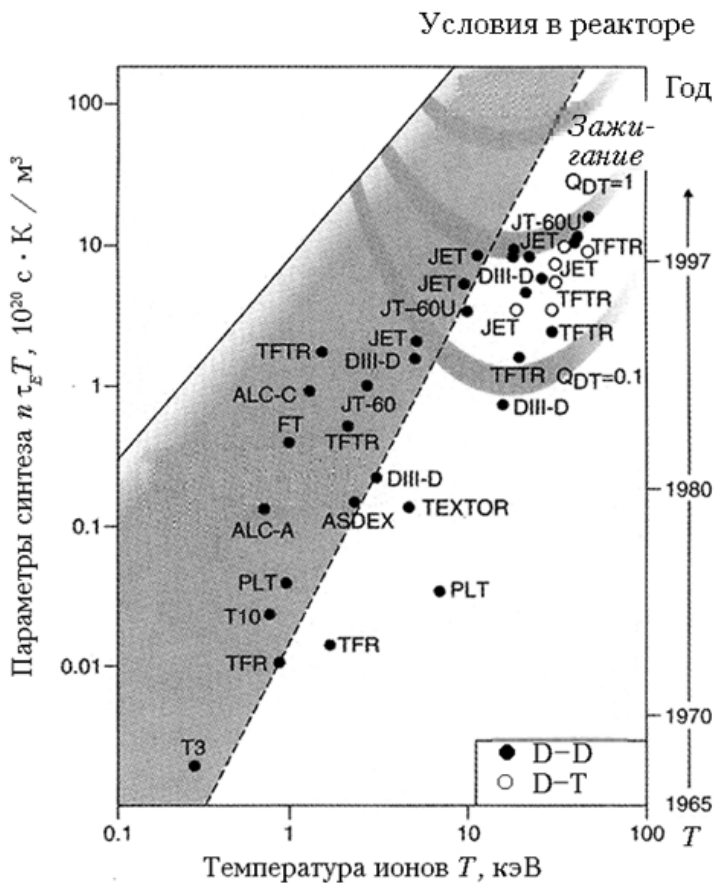


**Рис. 12.** Схема термоядерной электростанции. Показаны поперечный разрез реактора УТС, система охлаждения и система преобразования энергии. 1 – инжекция топлива; 2 – стенка вакуумной камеры; 3 – литиево-бериллиевый бланкет; 4 – радиационно-тепловая защита; 5 – магнитные обмотки; 6 – охлаждение жидким гелием; 7 – электрогенератор; 8 – паровая турбина; 9 – теплообменник; 10 – теплоноситель внутреннего контура; 11 – вывод продуктов реакции.

Сделанный вывод подтверждают результаты работы комиссии экспертов Европейского союза под председательством Д.Кинга - советника по науке премьер-министра Англии. Комиссия пришла к выводу о необходимости ускорения работ по термоядерному синтезу с целью перехода к его практическому использованию. В программе "Fast Track" ("Быстрый путь") предлагается использовать международные структуры ИТЭРа для начала работ над проектом демонстрационной термоядерной станции и параллельно с созданием ИТЭРа построить источник нейтронов для материаловедческих испытаний. Подобное требование к американскому термоядерному сообществу сформулировал директор отдела науки департамента энергетики США Р.Орбах. Отметим также, что в последнее время активно рассматриваются варианты двухцелевых термоядерных электростанций, включающих параллельно с выработкой электроэнергии выжигание долгоживущих радиоактивных отходов атомной энергетики, опреснение соленых вод, производство синтетического топлива, в том числе водорода из воды.

Условия осуществления управляемого термоядерного синтеза с положительным энергетическим выходом оказались технически сложными и энергетически «затратными»: температура – не ниже 100 млн градусов, напряженность удерживающего магнитного поля – десятки тысяч эрстед, требуемый объем горячей плазмы – сотни кубических метров. Столь высокие требования и непредсказуемость поведения плазмы привели к тому, что «прямой путь» затянулся на столетия (**Рис. 17**) и тянется до сих пор.





**Рис. 17.** На пути к реактору-токамаку с положительным выходом энергии (1965–1998 гг.).  $Q_{DT}$  – отношение ТЯ-энергии к энергии разогрева плазмы

УТС достигнуть пока не удалось. Приходится утешаться промежуточными результатами термоядерных исследований. Конечно, работы по термояду оказали положительное влияние на развитие науки и технологии. Физика горячей плазмы, построенная на основе электродинамики, астрофизики, газодинамики, физики твердого тела и газового разряда, обогатила эти научные дисциплины новыми разработками. На плазменных установках моделируются явления в космосе, идеи плазменных неустойчивостей используются в физике полупроводников. Физика горячей плазмы дала новый импульс физике

низкотемпературной плазмы. Анализ теории неустойчивостей плазмы многое внес в нелинейную физику. УТС внес существенный вклад в разработку новых технологий, приборов и устройств.

Длительная затяжка УТС на базе токамака вызвала, с одной стороны, серьезные сомнения в практической возможности создания термоядерных электростанций, с другой, – появление альтернативных путей ядерного синтеза.

Тем не менее, на вопрос: что такое термояд: красивая и увлекательная наука, путь к новой энергетике или голубая мечта человечества остается открытым. Поэтому в заключение этой лекции рассмотрим доводы оптимистов и пессимистов.

Символом УТС можно считать картину, обошедшую когда-то многие издания. На берегу океана (моря, озера, реки) стоит электростанция, топливом для которой служит вода. Именно вода: в некоторой части ее молекул вместо водорода всегда есть тяжелый водород – дейтерий, необходимый для реакций синтеза. Расход воды невелик – несколько цистерн могут сутки кормить электричеством большой город, такой, скажем, как Рязань, Одесса или Бостон. (Еще раз напомним наглядный пример: при "сжигании" дейтерия, содержащегося в литре воды из крана, выделяется столько же энергии, сколько ее имеется в 400 литрах бензина). Да и то реально расходуется лишь ~0,016% всей массы воды (атомы дейтерия), а остальные ~99,84% возвращаются в водоем. Полное же количество дейтерия в океане составляет около  $4 \cdot 10^{13}$  тонн. Его хватит для производства  $10^{20}$  киловатт-лет электроэнергии. Так что человек нашел для себя безвредный и практически неисчерпаемый энергетический источник.

Что и говорить – красивая картина! Хорошо бы, чтоб она имела к действительности хоть какое отношение....

Главными аргументами в пользу термоядерного синтеза как физической основы энергетики будущего в настоящее время являются следующие утверждения:

1. Неограниченные запасы общедоступного топлива;
2. Реактор УТС содержит гораздо меньше радиоактивных материалов, чем атомный реактор деления, и поэтому последствия случайного выброса радиоактивных продуктов менее опасны;

3. При термоядерных реакциях образуется меньше долгоживущих радиоактивных отходов;
4. Термоядерная энергетика безопасна с точки зрения нераспространения ядерного оружия;
5. УТС допускает прямое получение электроэнергии.

Невозможно сосчитать число дифирамбов пропетых по этому поводу. Не стоит обольщаться! Скептики (а их число среди ученых и инженеров активно растет) утверждают – это все мифы. Академик В.А.Легасов (зам. директора Института атомной энергии, в котором проводились и проводятся основные работы по термояду), например, неоднократно заявлял – 1) термояд в энергетике в 21-м веке не появится, 2) УТС никогда не будет достигнут на установках типа токамак, 3) затраты на ИТЭР – выброшенные на ветер деньги.

Кто же прав: оптимисты, или пессимисты?

Рассмотрим теперь доводы пессимистов.

Еще раз рассмотрим механизмы энерговыделения в реакторной и термоядерной энергетиках. В реакции ядерного деления, лежащей в основе работы атомного реактора, первичными носителями энергии являются два ядра-осколка, на которые разваливается ядро урана. Осколки мгновенно разгоняются до огромной энергии силой взаимного кулоновского отталкивания, а затем, тормозясь в самом топливе и материале твэлов, нагревают их до стационарной температуры в несколько сотен градусов. Эта теплота, отбираемая теплоносителем, и используется для производства электроэнергии. Энерговыделение за счёт других эффектов (эмиссия нейтронов и гамма-квантов) в реакции деления пренебрежимо мало. Пролет ускоренных осколков в ядерном топливе и оболочке твэла не превышает нескольких микронов, поэтому за пределы твэлов эти осколки (а они высокорadioактивны) не выходят - если, конечно, не считать аварий (а авария с разрушением твэлов является очень тяжёлой). Соответственно, и удаление из реактора основной части радиоактивного материала, образовавшегося при его работе (облучённого ядерного топлива), не представляет серьёзных трудностей - оно занимает сравнительно малый объём, а от попадания во внешнюю среду его защищает оболочка твэла. Наибольшая опасность такого попадания возникает на более поздних стадиях топливного цикла, в особенности при радиохимической переработке облучённого топлива.

Иное дело - термоядерная реакция. При её протекании носителями энергии являются нейтроны синтеза, обладающие большой энергией (14 МэВ) и огромной проникающей способностью. Их пробег в воздухе составляет сотни метров, но даже и в более плотных средах он достигает десятков сантиметров и даже метров. Поэтому объём зоны теплосъёма (бланкета) в термоядерном реакторе, в сравнении с реактором деления, огромен. И весь этот объём чудовищно радиоактивен - высокоэнергетичные нейтроны синтеза вызывают в нём интенсивные реакции активации ((n,γ), (n,p), (n,α), (n,2n) и др, поскольку связь нуклонов в ядре не превосходит 8 Мэв), приводящие к «перерождению» стабильных ядер его материала в радиоактивные. Избежать этого принципиально невозможно. Нейтронное излучение создает очень сильную наведенную активность, в сотни, а то и тысячи раз большую, чем в атомном реакторе.

В термоядерном реакторе электрической мощностью 1000 Мвт (эл) (т. е. такой же, как у современных реакторов деления ВВЭР-1000 и РМБК-1000), где происходит около  $10^{21}$  реакций синтеза в секунду, стационарно содержится до  $10^{11}$  Кюри радиоактивности! Для сравнения укажем, что активность, выброшенная во внешнюю среду при аварии на ЧАЭС, оценивается величиной  $5 \cdot 10^7$  Кюри, а полная радиоактивность, содержащаяся в реакторе деления типа ВВЭР или РМБК, не превышает  $10^9$  Кюри - соответственно, в 2000 и 100 раз меньше! Причём, в отличие от реактора деления, где подавляющая часть радиоактивных материалов локализована в относительно небольших твэлах, в термоядерном реакторе эти десятки миллиардов Кюри рассредоточены в большом (десятки кубометров) объёме бланкета. Как изолировать эту гору

радиоактивного материала от внешней среды, что делать с ней после окончания эксплуатации термоядерного реактора - не понятно, особенно с учётом того, что среди продуктов нейтронной активации есть и весьма долгоживущие (например,  $^{60}\text{Co}$  - неизменный атрибут активации стальных конструкций). Любая замена элементов установки (особенно – реакционной камеры) приведет к большому количеству радиоактивных отходов. И всё это - при условии, что в бланкете содержатся лишь пассивные (неделяющиеся) материалы. Если же, как предусматривается некоторыми концепциями, бланкет, для повышения КПД установки, будет содержать и делящиеся (торий, уран) вещества, то к радиоактивным продуктам активации добавится, разумеется, весь «традиционный букет» продуктов деления - в частности,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$ , известные своей высокой радиотоксичностью. Да и проблема биологической защиты от прямого действия самих нейтронов синтеза, выходящих за пределы объёма бланкета, весьма не проста.

При работе токамака на дейтерии наибольшую опасность представляют: нейтронное излучение, рентгеновское (возникающее при электронной температуре выше  $10^6\text{K}$ , или  $86.21\text{ эВ}$ ,  $\gamma$  – излучение наведённой искусственной радиоактивности и  $\gamma$  – излучение, обусловленное торможением ускоренных электронов ( $E_\gamma = 0.60 - 1.20\text{ МэВ}$ ). Для нейтронов и  $\gamma$ -излучения плазма прозрачна, их энергия утилизируется частично в конструкционных материалах токамака, вспомогательных системах вблизи токамака и полностью в материале (бетоне) стен, окружающих токамак. При работе токамака на протии опасность представляет рентгеновское излучение (возникающее при электронной температуре плазмы выше  $10^6\text{ K}$ , или  $86.21\text{ эВ}$ , а в случае аварии –  $\gamma$ -излучение ( $E_\gamma=12\text{ МэВ}$ ), обусловленное торможением ускоренных электронов.

Другая серьёзная экологическая проблема связана с тритием. Использование в термоядерной энергетике какой-либо иной реакции, кроме синтеза дейтерия и трития, почти исключено. Между тем тритий -  $\beta$ -активный радионуклид с периодом полураспада 12,4 года и высокой радиотоксичностью. Его предельно-допустимые концентрации в воздухе и воде очень низки -  $3,0 \cdot 10^{-10}$  и  $4,0 \cdot 10^{-6}$  Кюри/л, соответственно. Гамма-квантов ядра трития при распаде не испускают, а энергия его  $\beta$ -частиц относительно невелика, поэтому при нахождении вне организма тритий угрозы не представляет. Но вот если он попадает внутрь (с воздухом и водой), он легко замещает атомы водорода в молекулах клеток организма (напомним, что тритий - один из изотопов водорода), обуславливая опасное внутреннее облучение. В естественных земных экосистемах трития почти нет - его ничтожные количества образуются лишь при взаимодействии космического излучения с газами атмосферы. На всей Земле едва ли наберётся более 1 кг естественного трития. Между тем для обеспечения работы лишь одного упомянутого выше 1000-мегаваттного термоядерного реактора в течение года потребуется 150 кг трития. Однако количество трития, находящееся на термоядерной электростанции (ТЯЭС), может быть гораздо большим, поскольку термоядерный топливный цикл будет замкнут по тритию - он будет нарабатываться на той же ТЯЭС.

Возможность для этого открывает одна важная особенность термоядерных нейтронов. Их энергия более чем вдвое превышает энергию связи нейтронов в некоторых ядрах, поэтому при соответствующем выборе материала бланкета в нем будет протекать ядерная реакция ( $n, 2n$ ) - на один захваченный ядром быстрый нейтрон синтеза рождаются два, но меньшей энергии. Однако для наработки трития как раз и нужны медленные нейтроны - так он сейчас и получается в специальных промышленных реакторах при облучении лития. Таким образом, расходными материалами для работы ТЯЭС будут являться лишь дейтерий и литий, а тритий будет в непрерывном обороте - сами нарабатываем, сами и сжигаем. Равновесное количество трития на объекте – не менее **1 тонны**. А теперь вспомним про высокую радиотоксичность трития . (радиоактивный тритий легко усваивается организмом человека вместе с водой) и о том, что гарантировать полное отсутствие его утечек за защитные барьеры во внешнюю среду на всех

стадиях термоядерного топливного цикла не может никто - тем более, что радиационный мониторинг по тритию технически достаточно сложен и трудоёмок.

Отношения между термоядом и нераспространением ядерного оружия обещают стать не менее сложными. Производство ядерного оружия начинается с получения делящегося материала оружейной кондиции. Наиболее эффективный из этих материалов,  $^{239}\text{Pu}$ , нарабатывается путем облучения блочков из естественного урана в ядерных реакторах и последующим радиохимическим выделением. Но широко распространенные высказывания типа «не будет этих проклятых реакторов, чье место заменит термояд, - не будет и головной боли с оружейным плутонием» у специалистов вызывает лишь горькую усмешку. Ведь для наработки плутония нужны не реакторы как таковые, а интенсивные потоки нейтронов, которые в настоящее время только в реакторах и можно получить. А тут на сцене появляется термояд с его мощнейшими нейтронными потоками. На единицу тепловой мощности в термоядерном реакторе рождается в 5 - 7 раз больше быстрых нейтронов, чем медленных - в реакторе деления. Правда, для превращения  $^{238}\text{U}$  в  $^{239}\text{Pu}$  нужны именно медленные нейтроны, но, во-первых, быстрые нейтроны синтеза технически несложно замедлить. А, во-вторых, самое время вспомнить о размножении нейтронов в  $(n, 2n)$  - реакциях, о котором говорилось выше. При использовании этого эффекта фактор 5 - 7 можно довести до 10. Поэтому термоядерный реактор для наработки плутония ничуть не уступает реактору деления (и, соответственно, никак не менее опасен). Однако, анализ проблемы приводит к выводу, что слова «никак не менее» приходится заменить на «гораздо более».

Отвлечемся на некоторое время от термояда. Известно, что как оружейный материал  $^{239}\text{Pu}$  гораздо более эффективен, нежели  $^{235}\text{U}$ . Согласно критериям МАГАТЭ, так называемое значимое количество ядерного материала (т. е. потенциально опасное с точки зрения возможности создания ядерного взрывного устройства) для  $^{239}\text{Pu}$  составляет лишь 8 кг против 25 кг для  $^{235}\text{U}$ . И, тем не менее, «начинающие бомбоделы» создают именно урановые бомбы. Так было в Пакистане, ЮАР, а ранее - в КНР. Это вовсе не случайно. Ведь бомба на основе  $^{235}\text{U}$  может быть создана по простейшему (ствольному) принципу - две подкритические массы делящегося материала быстро соединяются в одну критическую. А вот высокую эффективность  $^{239}\text{Pu}$  удаётся реализовать лишь в относительно сложной (имплозионной) конструкции бомбы. Дело в том, что современный оружейный плутоний, помимо «полезного» изотопа с массой 239, содержит 5 - 6% «балластного» плутония-240, очень нелюбимого конструкторами оружия. Некоторые его ядерно-физические свойства (эмиссия так называемых нейтронов спонтанного деления) не позволяют создать ствольную бомбу на основе плутония.

Как образуется плутоний из урана в реакторе? Ядро  $^{238}\text{U}$  в урановом блочке, захватив медленный нейтрон, превращается в  $^{239}\text{U}$ . Это ядро путем  $\beta$ -распада с периодом 23,5 минуты превращается в нептуний-239, а тот, также претерпев  $\beta$ -распад, с  $T=2,36$  дня переходит в плутоний-239 ( $T=24000$  лет). Для двух последних превращений нейтроны уже не нужны -  $\beta$ -распад происходит самопроизвольно. А после того, как в блочке начинают рождаться ядра  $^{239}\text{Pu}$ , нейтроны не просто бесполезны - они становятся вредными, поскольку балластный  $^{240}\text{Pu}$  как раз и образуется при захвате нейтронов вновь родившимися ядрами  $^{239}\text{Pu}$ . И, чем дольше облучается  $^{238}\text{U}$ , тем выше концентрация изотопа  $^{240}\text{Pu}$  фракции. Поэтому плутоний, содержащийся в облученном ядерном топливе энергетических реакторов на АЭС с их длительной (год и более) кампанией, содержит 30%  $^{240}\text{Pu}$  и для использования в ядерном оружии практически непригоден (в США оружейным считается плутоний с содержанием  $^{240}\text{Pu}$  менее 5,8%). Разумеется, последующая радиохимическая переработка облученных блочков ничего в изотопном составе плутония изменить не может - химия разделяет элементы, но не изотопы. В принципе, избежать нежелательного накопления  $^{240}\text{Pu}$  довольно просто - достаточно ограничить срок кампании для блочков временем, сравнимым с периодом полураспада наиболее долгоживущего из предшественников  $^{239}\text{Pu}$  (2 - 3 дня). При таком режиме наработки  $^{239}\text{Pu}$  из облученного урана все равно образуется, но вредного влияния захвата нейтронов избежит.

К сожалению (или к счастью), физика вступает в противоречие с техникой и экономикой. При плотностях нейтронных потоков, характерных для современных промышленных реакторов (около  $10^{14}$  нейтрон/см<sup>2</sup>•с) за 2-3 дня просто не удастся обеспечить необходимое с точки зрения реальной организации плутониевого цикла количество первичных нейтронных захватов ядрами <sup>238</sup>U в блочке. На радиохимический завод в этом случае поступал бы облученный полуфабрикат, где балластного <sup>240</sup>Pu не было бы, но почти не было бы и искомого <sup>239</sup>Pu. Поэтому время кампании при наработке оружейного плутония в промышленных реакторах составляет месяц - отсюда и 5-6% <sup>240</sup>Pu в конечном продукте. Но, если  $10^{14}$  превратить в  $10^{15}$  (т.е. увеличить плотность потока в 10 раз), то в 10 раз снизится время кампании - с 30 до 3 дней, и о <sup>240</sup>Pu в продукте можно будет забыть. А ведь как раз такой выигрыш по плотности потока и обеспечивает термояд! Достаточно на термоядерном реакторе мощностью 1000 Мвт(эл) оборудовать позицию для облучения урановых блочков - и, сохранив существующие темпы наработки плутония, можно обеспечить его «суперкондицию», снизив содержание <sup>240</sup>Pu в нём до столь малой величины, что реальностью станет «элементарная», но эффективная плутониевая бомба ствольного типа, мечта террориста. А если сохранить месячную кампанию? Тоже неплохо: хотя в этом случае полученный плутоний можно будет, как и в наши дни, использовать только в более сложной имплозионной бомбе, темпы его наработки пропорционально увеличатся в 10 раз.

Атомные реакторы на быстрых нейтронах в некоторых странах запрещают из-за накопления плутония, противопоставляя им термоядерные реакторы, как не производящие плутоний и в этом смысле не представляющие интерес для террористов. Но, как мы убедились, в термоядерном реакторе производительность получения изотопов в десять раз выше, чем в реакторе деления. Достаточно 10% всех нейтронов термоядерного реактора «незаметно» направить в урановые блочки, как он превратится в могучий производитель плутония, притом кондиционного, в отличие от засоренного многими изотопами реакторного плутония АЭС (с производительностью 1 т на Гвт(э)).

Не следует забывать и о тонне трития на ТЯЭС. Ведь именно тритий лежит в основе конструкции наиболее опасных типов термоядерного оружия, а для их создания нужны весьма небольшие его количества. Всё это превращает ТЯЭС, с точки зрения ядерного нераспространения, в опаснейший объект, требующий, как минимум, строжайшего международного контроля.

Теперь попытаемся разобраться в главном вопросе: может ли реакция D-T, даже став управляемой, вообще использоваться в энергетике? Нет! – отвечают скептики. Мало добиться управляемого выделения энергии, ее еще нужно снять, превратить в тепло и электричество. В атомном реакторе 80% энерговыделения приходится на атомы отдачи продуктов деления. Их пробеги малы, и вся энергия отдачи идет на нагрев теплоносителя. В D-T – реакции 90% энергии уносится 14 МэВ-ными нейтронами. Чтобы утилизировать энергию их надо остановить. А как вы это сделаете? Побег таких нейтронов огромен, на их замедление и поглощение потребуются огромные толщи материала, и, следовательно, огромные тепловые потери. Многие полагают, что превращение энергии сверхбыстрых нейтронов в тепловую представляет собой практически не разрешимую задачу. Можно, конечно, на пути нейтронов поставить уран или какой-либо иной делящийся нуклид, но тогда вы получите гибридный реактор, (композицию из термоядерного и атомного реактора), сложив вредные экологические последствия двух устройств. К тому же, атомные реакторы и без всякого термояда прекрасно работают. Зачем на АЭС тащить огромные термоядерные системы, начиненные взрывоопасным водородом, токсичным тритием, криогенным и высоковольтным оборудованием и еще Бог знает чем? Повысится ли при этом эффективность работы атомного реактора – большой вопрос, а вот опасность его возрастет неимоверно. Так что атомной энергетике термояд даром не нужен....

Оптимисты верят в компромисс - сочетание в одном гибридном реакторе элементов с реакциями деления и синтеза с целью создания подкритического (физически безопасного) реактора, что может оказаться выгоднее, чем их раздельное использование. Ну, может быть....

До сих пор мы обсуждали штатную работу термоядерного реактора, рассмотрим теперь некоторые аварийные ситуации.

Термоядерный реактор-токамак и реактор с лазерным удержанием содержит ряд специфических элементов в своей конструкции, которые, по сравнению с реакторами деления, характеризуются другими принципами работы, что вносит свои особенности в причины возникновения, ход развития и последствия аварийных ситуаций. Эти особенности можно сформулировать следующим образом:

- большие вакуумные объёмы; - электромагнитная система большой мощности;
- наличие большого количества криожидкости и конструкционных материалов при криогенных температурах, если электромагнитная система сверхпроводящая (для магнитных ТЯР)
- наличие трития в количестве, значительно превышающем его содержание в любых известных реакторах деления;
- циклический характер работы.

Рассмотрим более подробно аварийные ситуации, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации термоядерного реактора.

**Аварийные ситуации, в электромагнитной системе.** Большие магнитные системы являются неотъемлемым элементом токамака. Магнитная система может быть как сверхпроводящей, так и несверхпроводящей. Остановимся подробнее на первой из них, поскольку это наиболее перспективная электромагнитная система. В сверхпроводящей электромагнитной системе реактора ИТЭР запасена следующая электромагнитная энергия: - в катушках тороидального поля -  $4 \cdot 10^{10}$  Дж; - в катушках полоидального поля -  $1,5 \cdot 10^{10}$  Дж; - энергия криогенной жидкости (гелий) -  $1,3 \cdot 10^{10}$  Дж (потенциальная энергия, выделяющаяся при полном испарении жидкого гелия). К возникновению аварийной ситуации может привести появление локального перегрева обмоток, потеря сверхпроводимости, короткие замыкания между обмотками, разрушение тоководов, потеря вакуума в криостате, аварии в системе вывода катушек. Наиболее тяжёлой, по своим последствиям, аварией является образование дуг между катушками или катушкой и "землёй". Пока нет ясности по поводу условий возникновения дуг и последствий их горения. Тем не менее, если дуга возникла, её горение будет сопровождаться выделением большого количества энергии, а так как поверхность, подверженная воздействию дуг ограничена, то плотность теплового потока может достигать несколько мегаватт на квадратный метр. В этих условиях будет происходить быстрый прогрев конструкции, плавление и испарение конструкционного материала. Большие тепловые потоки могут служить причиной разрушения конструкций катушки вследствие больших термических напряжений. Не исключён прожог криостата, выход хладагентов и их испарение.

**Аварийные ситуации в тритиевой системе.** Проблема безопасности, связанная с наличием в реакторе трития, в основном обусловлена его использованием как компонента топлива в плазменной камере и воспроизводством в бланкете реактора. Это подразумевает наличие сложной системы оборудования для транспортировки, извлечения, очистки трития и т.п. с общим количеством трития в системе порядка нескольких килограмм. Предполагается, что в различных элементах тритиевой системы будут содержаться следующие количества  $^3H$ :

- система выделения трития из  $D-T$  -смеси -100-500 г;
- системы, связанные с работой плазменной камеры - 50-1500 г;
- крионасосы -40-400г; - топливная система -20-120 г; - бланкет и его системы-50-100г;
- суммарное количество -260-1270г; - хранилище-1000-2000г.

Основные исходные события, вызывающие развитие аварийной ситуации в тритиевой системе - разрушение компонентов системы, горение и денотация водорода. При максимальной проектной аварии практически весь тритий может выйти в реакторное помещение.

\*\_\*\_\*

К настоящему времени (2004), несмотря на все усилия ученых и инженеров, несмотря на огромные финансовые затраты, несмотря на объединение усилий разных стран, несмотря на принципиально разные подходы к методам синтеза, несмотря на длительный период усилий (более полувека) достигнуть управляемого термоядерного синтеза с положительным энергетическим эффектом на Земле не удалось. Более того – перспективы термояда весьма туманны. Сейчас вся надежда на достижения параметров плазмы, удовлетворяющих критерию Лоусона. Но этот критерий – вовсе не истина в последней инстанции. Это всего лишь оценка, причем очень грубая. Не исключено, что даже после достижения параметров плазмы, намного превышающих требуемой температуры и длительности импульса, возникнет УТС. Не исключено, что истинный порог реакции на несколько порядков превышает критерий Лоусона. Тогда установки типа токамака будут полностью бессильны.

Никто не гарантирует, что международный реактор ИТЭР – последняя установка перед созданием энергетического термоядерного реактора. Судя по всему, на ней даже не будет достигнут УТС! Понадобится еще много усилий, много новых установок (скорее всего – абсолютно другого типа), чтобы добить желаемой цели. Но достигнуть УТС – это полдела, нужно еще научиться снимать с него энергию, превращая ее в тепло и электричество. Причем – в дешевое тепло и электричество.

Уже сейчас ясно, что установки по УТС ни в коей мере нельзя отнести к экологически чистым и безопасным источникам энергии. Здесь – непочатый край работы радиохимиков. Опасен УТС и с точки зрения распространения оружия массового уничтожения и внедрения его в ряды террористов.

Конечно, возможность получения неограниченного источника энергии в руки человечества – большой соблазн. Не удивительно, что в России и в мире в целом существует такое мощное термоядерное лобби. Но не удивительно также, что среди лиц, знакомых с проблемой интенсивно растет число противников термояда. Не удивительно, что США, не привыкшие кидать деньги на ветер, периодически выходят из проектов типа ИТЭР. Не удивительны требования немедленно закрыть все работы по термояду, особенно выполняемые на токамаках, а в качестве компенсации внести имена авторов проектов по УТС в книгу рекордов Гинесса. В конце концов, еще никому не удавалось потратить такие огромные деньги на получение нулевого результата!