

Энергия из воды. Ближайшие перспективы управляемого термоядерного синтеза

С.В.Мирнов

*Начальник Отдела Экспериментальной Физики Токамаков ТРИНИТИ,
Член Физического Комитета Проекта ИТЭР,
профессор, Лауреат Государственной премии СССР*

“...Там же я увидел другого ученого, занимавшегося пережиганием
льда в порох. Он показал мне написанное им исследование о ковкости
пламени, которое он собирался опубликовать...”

...Я предложил профессору несколько монет, которыми
предусмотрительно снабдил меня мой хозяин, хорошо знавший привычку
этих господ выпрашивать милостыню у каждого, кто посещает его.“

*Дж.Свифт 1726г. («Путешествие Гулливера в Лапуту»,
Посещение Великой Академии. М. ОГИЗ 1947 стр363)*

"Вторая половина XX в. будет веком термоядерной энергии"
Академик И.В.Курчатов ("Правда" от 27 февраля 1958 г.)

" Она (эта задача) обязательно будет решена, когда термоядерная
энергия будет совершенно необходима человечеству"
Академик Л.А.Арцимович (Будущее науки. М. "Знание" 1973г. с.53)

"Первой по важности задачей физики XXI столетия остается
решение проблемы управляемого термоядерного синтеза."
*Академик В.Л.Гинзбург (Задачи физики XXI столетия.
Выступление в Курчатовском институте 2002г.)*

Обратим внимание читателя на то, что Свифт «путешествовал в Лапуту» примерно за год до смерти Ньютона, то есть в те баснословные времена, когда рождалась Физика. Мало того, что он ярко описал финансовое состояние тогдашних «профессоров», удивительно похожее на современное, он же наметил и столбовой путь всех последующих пережигателей льда в порох – путемковки пламени. Или, как сказали бы сегодня, «путем сжатия высокотемпературной плазмы». Полагаю, он очень бы удивился, узнав, что через 230 лет, двигаясь в этом направлении, лед превратили-таки в мегатонны пороха, правда, путем кардинального изменения отношения к «профессорам». На волне того «нового отношения» оптимистам казалось, что превратить мегатонный взрыв в газовую термоядерную горелку - дело нескольких лет, ну пары десятков, от силы.

В 1973 году скептик – Арцимович фактически констатировал, что, увы, «новое отношение» к профессорам снова сменилось на традиционное, ибо острая нужда в «порохе» отпала. Если, однако, оно снова станет «новым», то есть, если термоядерная энергетика станет вдруг жизненно необходимой сильным мира сего, задача обязательно будет решена. Многие авторитеты полагают, что тут же, как станет «совершенно необходимой». Смеею не согласиться с такой интерпретацией Учителя (автор когда-то был аспирантом Арцимовича). Тут же не получится.

Жизнь приучила нас учитывать инерцию. И прежде всего, инерцию человеческого

мышления в ходе освоения нового. Если не вдаваться в детали, то дело в том, что столь эпохальное деяние, как создание принципиально новой энергетики, способной изменить лицо мира, потребует от ее создателей традиционных титанических усилий, соответствующих масштабу деяния. И в самых неожиданных областях. На примере создания термоядерных установок мы неоднократно убеждались, что бесплатный сыр бывает только в мышеловках. Речь идет прежде всего о сопутствующих технологиях. Как прост принцип бензинового двигателя! И как хитроумна система смазки и охлаждения современного западного автомобиля... А моторные масла? За всем этим стоит скрытый труд тысяч инженеров – исследователей, технологов и изобретателей - подводная часть видимого айсберга. Для окончательного формирования технологической базы экономически эффективной термоядерной энергетики потребуются годы, по разным оценкам, двадцать или более лет. И это притом, что на протяжении предыдущих пятидесяти шло неуклонное наращивание этой самой технологической базы, тесно сплетенной с ядерной, атомной физикой, с физикой твердого тела, магнитной гидродинамикой и т.д.

Говорят, что управляемый синтез опоздал. Согласится ли человечество ждать? Многополярное, может быть, и согласилось бы. Но сегодняшнее, однополярное, скорее всего, пойдет на передел энергетических ресурсов. То есть, нас ждет эпоха энергетических войн и коалиций. Не началась ли она уже? Но не будем о грустном. Что достигнуто в управляемом термоядерном синтезе на сегодняшний день и что на завтра могли бы предложить человечеству сегодняшние «профессора» ?

На Рис.1, взятом из буклета Министерства энергетики США, приведена временная диаграмма максимальной мощности управляемого ядерного синтеза, полученной в разных странах разными «профессорами» на разных исследовательских установках в период от 1975 до 1995 года. Диаграмму сопровождало резюме: “Прогресс в синтезе был постоянным и драматическим. Термоядерная мощность, произведенная в экспериментальных установках, возросла более чем в 100 миллионов раз: от 0,1 ватта в 1975 до более чем 10 миллионов ватт в 1995 году”. С гордостью можем сказать, что нижние, опорные точки этой диаграммы получены на наших отечественных термоядерных устройствах - токамаках в начале и середине семидесятых.

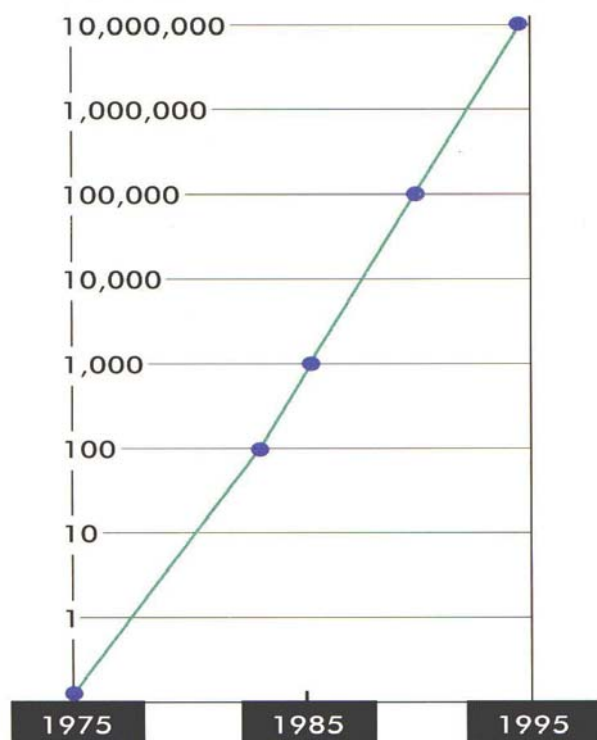


Рис.1 Динамика роста мощности термоядерного синтеза, произведенного в различных экспериментальных установках на протяжении 20 лет, с 1975 по 1995гг.

Наконец, 30 октября 1997 года в одном из экспериментов по синтезу ядер тяжелых изотопов водорода - дейтерия и трития (D и T) - на объединенном европейском токамак-реакторе JET (Joint European Torus, Англия) была достигнута рекордная мощность ядерного энерговыделения - более 16 мегаватт (соответствующая точка не попала на диаграмму). Вполне на уровне первой атомной электростанции. Расчеты показали, что эта мощность примерно сравнялась с мощностью энергопотерь нагретого вещества. Тем самым свершилось вполне историческое событие в исследованиях по управляемому синтезу - достижение режима "перевала" (breakeven) - равенства энергопотерь и энерговыделения. Через некоторое время рекорд был практически повторен на другом конце Земного шара - в Японии.

Правда, пока этот замечательный результат получен лишь в переходном импульсном режиме длительностью масштаба секунды. Пока это еще "чирканье" термоядерными спичками. Для энергетического реактора необходим режим стационарного или квазистационарного (многосекундного) горения. Для этого необходимы специальные термоядерные устройства, где магнитные поля, удерживающие «термоядерное пламя», создавались бы сверхпроводящими катушками, как известно, почти не потребляющими электроэнергию. И подобные устройства уже есть. «Горение» в них длится сотни секунд, но, к сожалению, это пока лишь сильно уменьшенные модели реакторов - энергопотери в них еще существенно превышают энерговыделение. Следующий шаг очевиден - увеличение размеров в 3-4 раза. Такое устройство уже спроектировано международной командой физиков («профессоров») и инженеров. Оно получило название ИТЭР - Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор.

Последняя версия проекта закончена в 2001 году. Закончена, принята Учредителями (Европа, Япония, Россия) и четвертый год лежит «на полке». Решается вопрос, где строить. Европа (Франция)? Или Япония? И Франция, и Япония - страны с мощно развитой атомной энергетикой (60-70% всей производимой в стране электроэнергии). Получить международный проект стоимостью \$3.5 млрд. означает для них дать мощный импульс высоким технологиям в своих странах. Очень соблазнительно. За время торга в Учредители вступили: КНР, Южная Корея и вдруг вернулись США. Ранее они вышли из проекта, посчитав, что он противоречит их государственным интересам (расползание высоких технологий в чужие страны). Сегодня установился ничейный баланс 3:3 - Европа, Россия, КНР против Японии, США и Южной Кореи. Кому-то эти качели выгодны. А время идет, все далее отодвигая возможный срок выхода управляемого термоядерного синтеза на арену промышленной энергетики.

Ситуация осложняется тем, что ИТЭР еще не прототип энергетического реактора управляемого синтеза. Это - экспериментальный реактор, построенный на сегодняшних (точнее вчерашних) апробированных технологиях. Его цель - продемонстрировать термоядерное зажигание и возможность стационарного горения, а не само стационарное горение с производством электроэнергии. Это цель следующего демонстрационного реактора - ДЕМО. Его контуры еще плохо различимы, они будут определены ИТЭРом. Но ключевые технологии уже обсуждаются и разрабатываются сегодня. Не исключено, что в итоге ДЕМО станет одним из разработок ИТЭРа. Это сэкономило бы время и средства. Но при всех даже самых благоприятных вариантах процесс создания первого энергетического реактора растянется не менее чем на 20-30 лет. Очевидно, что срок этот следует отсчитывать от начала реального строительства ИТЭРа.

Похоже, политикоэкономические соображения будут играть в этом вопросе решающую роль. То есть, соображения от нас («профессоров») не зависящие. Наша практическая роль в этом процессе в чем-то сродни роли саперов, которым поручили разминировать поле, где планируется наступление больших воинских масс. Задача - обнаружить и по возможности обезвредить скрытые препятствия на пути ИТЭРа.

Что же будет представлять из себя ИТЭР? Почему мы так убеждены в его успехе и

необходимости? Нет ли альтернативы? Можно ли, наконец, применить термоядерный реактор для других целей кроме кипячения воды и производства электричества? Это - естественные вопросы и мы сегодня в состоянии на них ответить. Для этого вернемся назад к «пережиганию льда», то есть к получению энергии из воды.

Основы наших надежд. В основе нашего оптимизма лежит факт, неизвестный в ньютоновские времена. А именно, что на 7000 атомов водорода, входящих в простую воду, приходится один атом его тяжелого изотопа – дейтерия (протон - p + нейтрон - n). Процедура извлечения дейтерия из воды сравнительно проста, а его свойства – необычны. Их уникальность состоит в том, что если два атома дейтерия сблизить почти вплотную, на расстояние масштаба 10^{-13} см, так, чтобы они оказались в зоне действия сил ядерного притяжения, может произойти слияние их ядер - синтез. В итоге, примерно с равной вероятностью возникнут: ядро трития T (протон и 2 нейтрона) плюс протон, либо ядро легкого изотопа гелия ^3He плюс нейтрон и плюс энергия – результат синтеза (здесь и далее энергию частиц будем исчислять в эВ – электронвольтах – $1\text{эВ} \approx 10^4 \text{ } ^\circ\text{K}$), таким образом:

$$\text{D}+\text{D}=\left\{ \begin{array}{l} T + p + 4 \text{ МэВ} \\ {}^3\text{He} + n + 3,3 \text{ МэВ} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Но ядерный синтез не закончится этим. Его продукты ^3T и ^3He способны вступить с дейтерием в новые реакции:

$$\text{D} + \text{T} = {}^4\text{He} + n + 17.6\text{МэВ} \quad (2)$$

и

$$\text{D} + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} + p + 18.4\text{МэВ} \quad (3)$$

$$\text{Иными словами: } 6\text{D} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + p + n + 45\text{МэВ} \quad (4)$$

Подставив числа, мы получим шокирующий результат: литр воды содержит скрытую энергию, эквивалентную четыремстам литрам нефти! Или трем тоннам пороха! Лапутский профессор был на правильном пути.

Но как сблизить ядра дейтерия на расстояние масштаба 10^{-13} см? Из школьной физики известно, положительно заряженные ядра должны отталкиваться, как простые одноименные электрические заряды. Преодолеть потенциальный барьер отталкивания можно было бы “по инерции”, разогнав частицы навстречу друг другу. Вспомнив закон Кулона, можно рассчитать высоту барьера, которую следует преодолеть. Она оказывается удручающе большой: масштаба 1МэВ. Если помножить на 6 (4), получим энергетический выигрыш всего в восьмерку. Эта восьмерка может упасть до единицы и ниже, если учесть потери неизбежные при ускорении и торможении ядер. Но природа преподнесла нам здесь неожиданный подарок – туннельный переход электростатического барьера! Это явление снизило на порядок необходимую энергию разгона дейтонов, до 0,1МэВ (1). Еще большим подарком оказался DT синтез (2). Выяснилось, что из-за специфического ядерного резонанса смесь DT начинает "гореть," если ее нагреть уже до 0,01МэВ, то есть всего до 100 миллионов градусов. Явление это, как известно, было успешно использовано в водородных бомбах. Оно и положено в основу современного управляемого синтеза. Справедливости ради следовало бы отметить, что и наш, простой водород – H – очень нехотя, но тоже может сливаться, выделяя энергию. Именно так создается 95% энергии излучаемой Солнцем. То есть, мы – потребители термоядерной энергии, как говорится, с рождения.

Достижения и проблемы. Нагрев DT смеси в лабораторных установках до сотен миллионов градусов был технически освоен в 70-80гг. И сегодня уже никого не изумляет квазистационарное существование таких горячих образований на протяжении 20-30сек.

Некоторую трудность привносит то, обстоятельство, что тритий – слабо радиоактивное вещество, распадающееся с характерным временем 12,35 лет, а потому отсутствующее в природе. Обычно его получают в атомных реакторах, облучая нейтронами изотоп лития - ${}^6\text{Li}$. Но лития в природе много, а нейтроны - один из продуктов и DD, и DT синтеза. Появляется возможность, используя нейтронные размножители, сконструировать реактор таким образом, чтобы он сам же и воспроизводил затраченное горючее. Этого добиваются, окружая горячую зону реактора специальной литийсодержащей оболочкой (бланкетом). Испытания конкретных конструкций бланкета - одна из важнейших технологических задач ИТЭРа.

Тревожной тучкой на горизонте маячит еще одна проблема, связанная с тритием – его утечка путем проникновения в конструкционные материалы реактора. Проблема эта не столько ИТЭРа (там она не так важна), сколько ДЕМО. Однако и она является сегодня предметом обсуждений. Существуют разные, в том числе нетрадиционные, способы решения этой задачи. Какой из них окажется наиболее приемлемым покажет будущее.

Примерная схема термоядерной электростанции (ДЕМО) представлена на Рис. 2. Горячая зона термоядерных реакций окружена литиевым бланкетом и мощной радиационной защитой от нейтронов. Вода, охлаждающая бланкет и защиту, нагревается, как в паровом котле, и далее реализуется схема обычной электростанции.

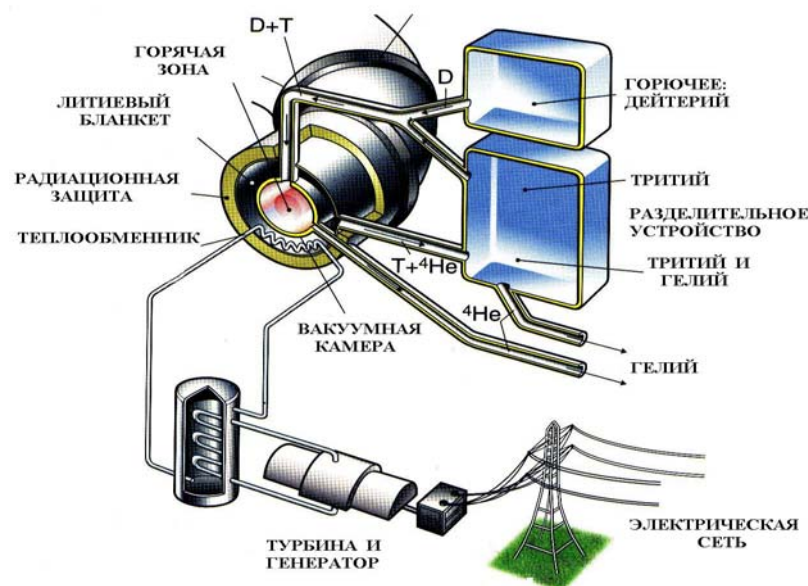


Рис.2 Принципиальная схема электростанции на основе DT-синтеза (EUR 18200-EN-C).

Требования к горячей зоне. Предположим теперь, что все технологические вопросы, связанные с DT-топливом и его нагревом успешно разрешены, зададимся вопросом, какими физическими качествами должно обладать техническое устройство, чтобы в нем стало возможно самоподдерживающееся термоядерное горение DT-смеси? Первое основное требование – в нем должно выполняться известное *условие Лоусона*:

$$n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с},$$

где n – плотность вещества в зоне горения (в м^{-3}), а τ_E – так называемое энергетическое время жизни DT-образования (в сек.), определяемое, как частное от деления полной тепловой энергии образования W на полную мощность его тепловых потерь P . При этом предполагается, что средняя температура DT-смеси равна 10 кэВ. (В диапазоне изменения T от 5 до 20 кэВ левую часть неравенства следует умножить на фактор $T/10$)

Условие Лоусона является основополагающим для всех устройств DT-синтеза, от водородных бомб до экспериментальных установок. Оно указывает нам два пути движения: увеличивая n , либо τ_E . В первом случае это фактическое копирование работы водородной бомбы, а именно, всесторонним обжатием DT-мишени. Это направление получило название “инерционного синтеза”.

Инерционный синтез. В бомбе сжатие осуществляется мягким рентгеновским излучением, возникающим «на факеле» взрыва обычной атомной бомбы. В миниатюрных лабораторных масштабах это можно сделать, например, сжимая мишень из DT-льда (почти по Свифту!) всесторонним лазерным облучением (Рис.3 а,б- «ковка пламени»). Какие здесь успехи и перспективы?

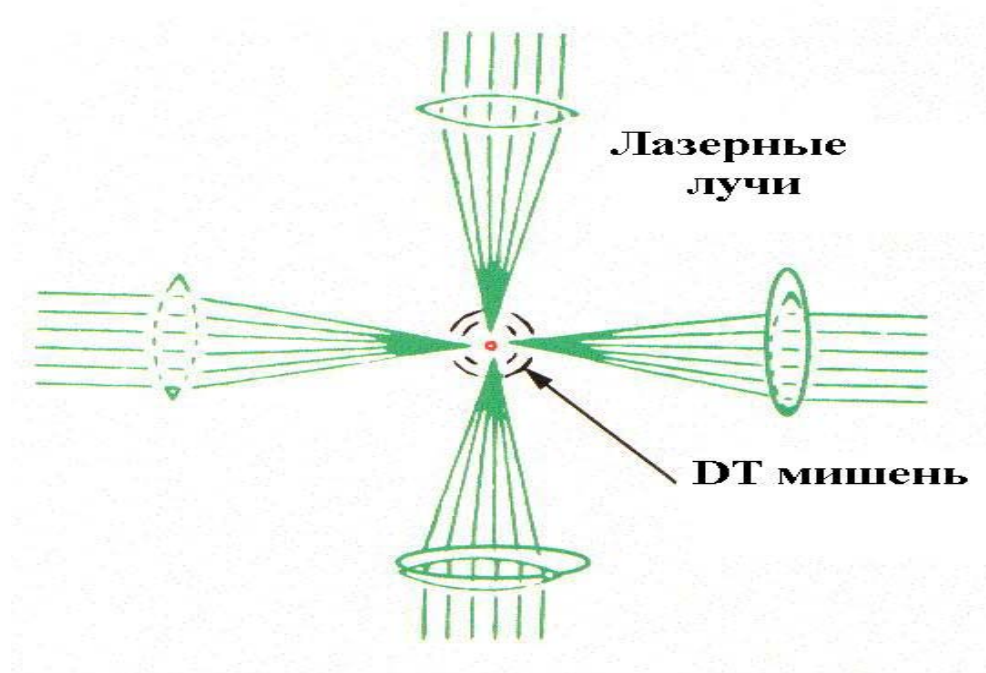


Рис.3 а- принципиальная схема лазерного синтеза,

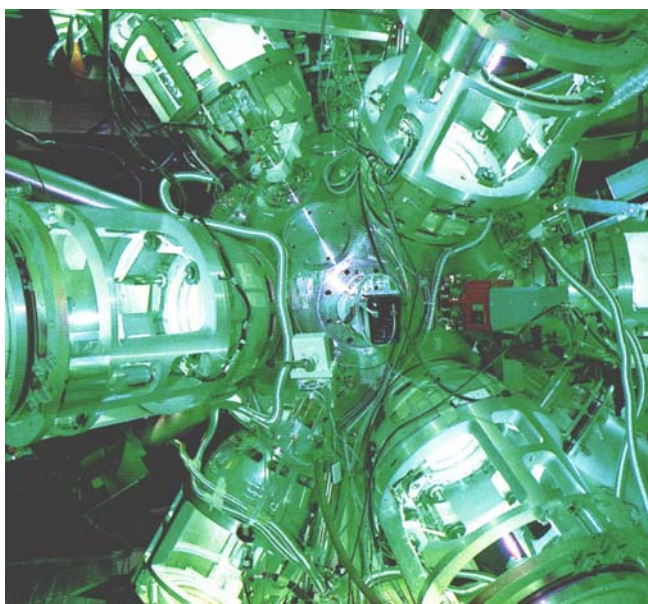


Рис.3б – камера лазерного синтеза Гекко-ХII (Япония)

Очевидно, сжатие будет тем более глубоким, чем большую энергию нам удастся передать на поверхность мишени. Чтобы плазменные неустойчивости не успели разрушить мишень, сжатие должно быть быстрым. Его характерные времена не должны существенно превышать 10^{-8} сек (10 наносекунд). Плотность вещества мишени должна при этом превзойти раз в 1000 плотность обычного твердого тела! Расчеты и некоторые опыты с атомными бомбами показывают, что стократное превышение выделившейся мощности над вложенной возможно, если энергия сжатия, переданная на мишень, превысит 10 мегаджоулей (Мдж). Сегодня удастся передать на мишень энергию раз в сто меньше. Правда, в США интенсивно разрабатывается проект NIF, цель которого - передача на мишень уже около 1,8 Мдж. Начальная стоимость проекта была около \$ 1,2 млрд. Он должен был быть закончен к 2002 году. К 2005 году оказались запущены только первые четыре из 192 лазерных пучков (Nd-стекло, 3 гармоника). Сметная стоимость проекта как будто бы возросла до \$4 млрд. Сегодня сроки пуска отодвигаются до 2007-09 года.

Но проект будет обязательно завершен. Будет ли он иметь отношение к энергетике? Отдаленное. Слишком мал коэффициент полезного действия современных лазеров. Сегодня уже никто не скрывает, что главное назначение таких проектов - уточнение механизма действия водородного оружия. В условиях запрещения ядерных испытаний это вполне легальный путь его технического совершенствования. А потому необходимые деньги будут обязательно выделены. Мир тратит сегодня «на порох» около 2^x млрд. в день! Лазерный проект, аналогичный американскому создается во Франции и существенно более скромные – в Японии и у нас (г.Саров, НИИЭФ «Искра-6»). На Рис.4 изображен экспериментальный зал одного из подобных устройств, Гекко -12 (Япония, энергия 30 кДж). Для повышения энергии необходимо увеличение мощности и числа подобных лазерных «линеек».



Рис.4 Общий вид установки лазерного синтеза Гекко-ХІІ (Япония)

Кроме лазерного существуют и другие потенциально возможные способы передачи энергии на мишень: с помощью мощного рентгеновского излучения, создаваемого электромагнитными методами, пучками ускоренных ионов, электронов и т.д. На Рис.5 приведен общий вид самой крупной российской установки инерционного синтеза «Ангара-5» (г.Троицк ГНЦ ТРИНИТИ, энергия, трансформируемая в рентген – около 100кДж). Сжатие мишени в ней осуществляется электродинамическим ускорением «тяжелых» оболочек.



Рис.5 Общий вид установки инерционного синтеза «Ангара-5» (Россия ГНЦ ТРИНИТИ)

Результатом успешного инерционного синтеза должны стать мощные термоядерные вспышки, представляющие собой взрывы водородных микробомб.

Магнитное удержание. Возможен ли второй путь – с низкой плотностью ДТ-смеси, но зато с высоким τ_E , то есть, стационарное термоядерное горение? Наиболее удачной оказалась идея магнитной термоизоляции зоны горения. Соответствующее предложение было впервые высказано у нас в 1950 г. будущими академиками А.Д. Сахаровым и его учителем - И.Е.Таммом, а в США - Л. Спитцером.

Суть идеи состоит в использовании электромагнитных свойств горячей зоны. Дело в том, что уже при температурах масштаба 100 тысяч градусов водород и его изотопы полностью ионизируются, теряют свой электрон и превращаются в, так называемую, плазму – смесь независимо существующих положительно заряженных ядер и отрицательных электронов – своеобразное четвертое состояние вещества.

Горячая плазма с температурой в миллионы градусов - хороший электрический проводник, намного лучший, чем известные нам медь и серебро. Еще раз вернемся к школьному курсу физики и вспомним, что замкнутое колечко из хорошего проводника всегда стремится сохранить («заморозить») проникший в него магнитный поток. Горячую плазму в сильном магнитном поле можно уподобить бесконечному набору таких колечек - ионных и электронных. Нагревая ее до высоких температур, мы свяжем всякое ее движение, способное вызвать изменение захваченного магнитного потока. В частности, запрещается расширение или разлет ее как целое поперек магнитного поля, что означало бы увеличение площади ее поперечного сечения и рост этого потока. Сильное магнитное поле оказывается по отношению к горячей плазме чем-то вроде водопроводной трубы, ограничивающей текущий внутри нее водяной поток: продольное движение возможно, поперечное - нет. Соответствующая наука так и называется: магнитная гидродинамика.

Но что делать с продольным течением? История термояда заполнена множеством предложений, как его замедлить, отразить назад и т.д. За ними годы озарений, напряженной

работы, трагедии идей, иногда людей...

Наиболее простым казалось: замкнуть бесконечно длинную магнитную “трубу” в магнитный бублик, то есть в тор. Однако заранее было ясно: простым тором не обойдешься. Дело в том, что согласно фундаментальным законам физики магнитное поле в торе должно быть неоднородным, спадать наружу по большому радиусу R . Элементарные токовые колечки – ионные и электронные – из которых складывается замагниченная плазма, оказываются при этом чуть-чуть не замкнуты. Следствием этого становится их вертикальный дрейф (одних вверх – других вниз) поперек магнитного поля – сравнительное медленное вытекание плазмы из горячей зоны на стенку реактора. Если бы на базе простого тора взялись соорудить такой реактор, удовлетворяющий условию Лоусона, поперечный размер магнитного бублика оказался бы поистине циклопическим – масштаба 100 метров!

Предложения Сахарова, Тамма и Спитцера касались собственно одного – как “обмануть” плазму, заставить ее “спутать” верх и низ бублика. Спитцер поступил прямолинейно – он скрутил бублик в “восьмерку”, положив тем самым начало целому классу плазменных ловушек – стеллараторов (stellar – по-английски “звездный”), в основе которых лежит идея деформация (сплющивания) сечения магнитной “трубы” и закручивание ее в винт. Почти так, как это делают умелые дачники, раскручивая ржавые водопроводные трубы. Сахаров обошелся без сплющивания, предложив для закрутки в винт пустить вдоль магнитного поля кольцевой ток, что явилось основой концепции токамака, примером которого является ИТЭР. Рис.6 а,б иллюстрирует эти два подхода.

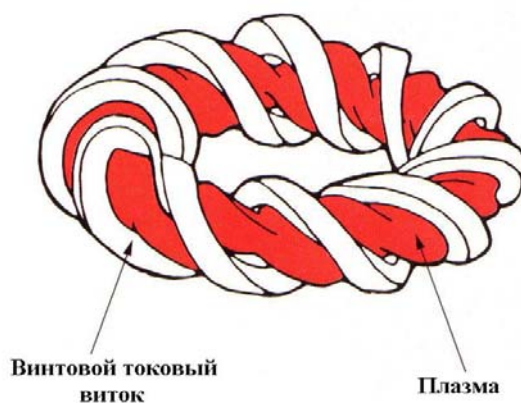


Рис.6 а -принципиальная схема стелларатора,

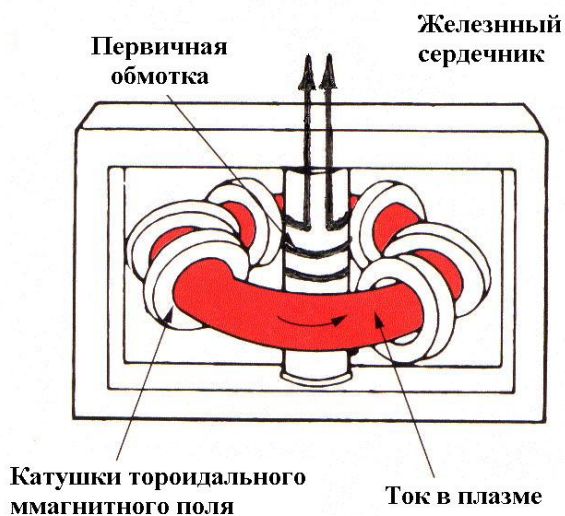


Рис.6 б – принципиальная схема токамака.

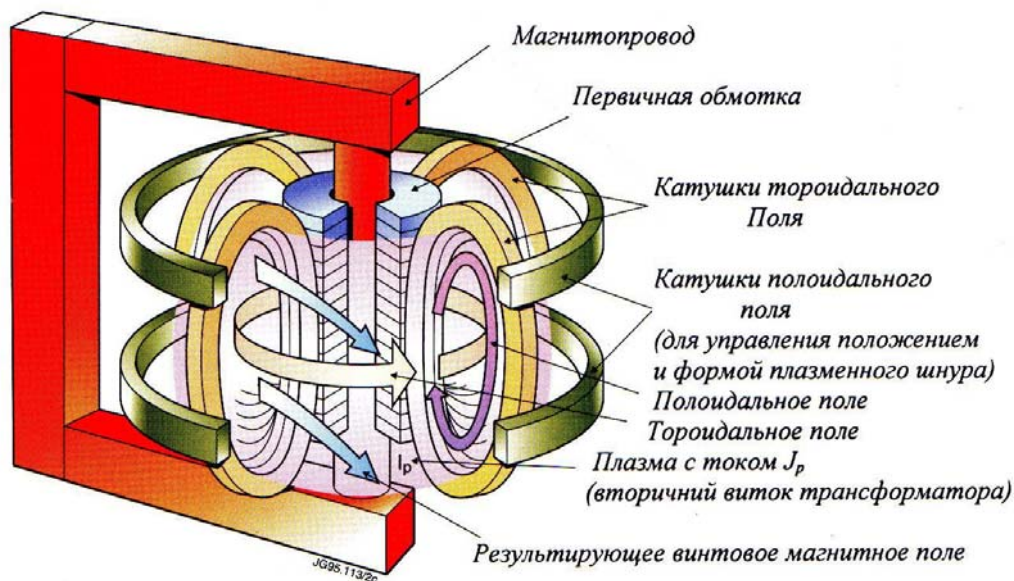


Рис.7а Электромагнитная схема современного токамака (EUR 18200-EN-C).

Конкуренция между стелларатором и токамаком составляла основную драматическую интригу в магнитном термояде, пока в конце шестидесятых токамак не воцарился единолично и, казалось, навечно. Лишь в последнее десятилетие после пуска японского сверхпроводящего стелларатора LHD намечилось их возрождение.

Токamak. Рождение и выход на «орбиту». В начальной же фазе этого противостояния работы шли абсолютно независимо в обстановке глубочайшей секретности и за рубежом и у нас. Однако неудачи заставляют объединяться. Сенсационная речь академика И.В. Курчатова в Харуэлле в 1956 году положила начало всеобщему снятию секретности и активному международному сотрудничеству в управляемом синтезе.

В том же 1956 году в Институте атомной энергии - он назывался тогда для конспирации "Лаборатория измерительных приборов" - в отделе академика Л.А. Арцимовича коллектив физиков и инженеров, руководимый И.Н.Головиным и Н.А.Явлинским (кстати, родным дядей известного политика), соорудил первую тороидальную плазменную установку сахаровского типа с сильным продольным магнитным полем и текущим вдоль него электрическим током. Ток в плазменном витке возбуждался индукционно с помощью первичной обмотки. Все устройство напоминало обычный понижающий трансформатор (Рис.6б) с той лишь разницей, что вокруг вторичного витка была намотана дополнительная магнитная обмотка, создающая тороидальное магнитное поле. Чтобы плазменный виток не разорвался по Р.А.Д. Сахаров предложил окружить его проводящим кожухом. Все последующие токамаки (Тороидальная Камера с Магнитным полем) повторяют эту схему за исключением ряда деталей: проводящий кожух позднее заменили специальной обмоткой с обратной связью, контролирующей большой радиус плазменного витка, сечение витка из круглого превратили в эллиптическое. Чтобы управлять потоками тепла и частиц на стенку ввели так называемую диверторную обмотку, отклоняющую периферийные магнитные силовые линии в специальную диверторную камеру. Еще одним полезным дополнением к традиционной схеме стали системы вспомогательного нагрева плазмы: мощные пучки нейтральных атомов больших энергий (до 500кэВ), высокочастотные и сверхвысокочастотные генераторы электромагнитного излучения. Именно они позволили получить плазму с температурой 10-30кэВ. Мощность их, как правило, существенно превышает мощность первичного омического нагрева плазмы протекающим по ней током, тем не менее, иногда шутят, что все токамаки как собаки – на вид разные, а существо одно и то же. На Рис.7а приведена электромагнитная схема токамака JET и его компьютерная

модель (б), а на Рис.8 – его внешний вид после физического пуска.

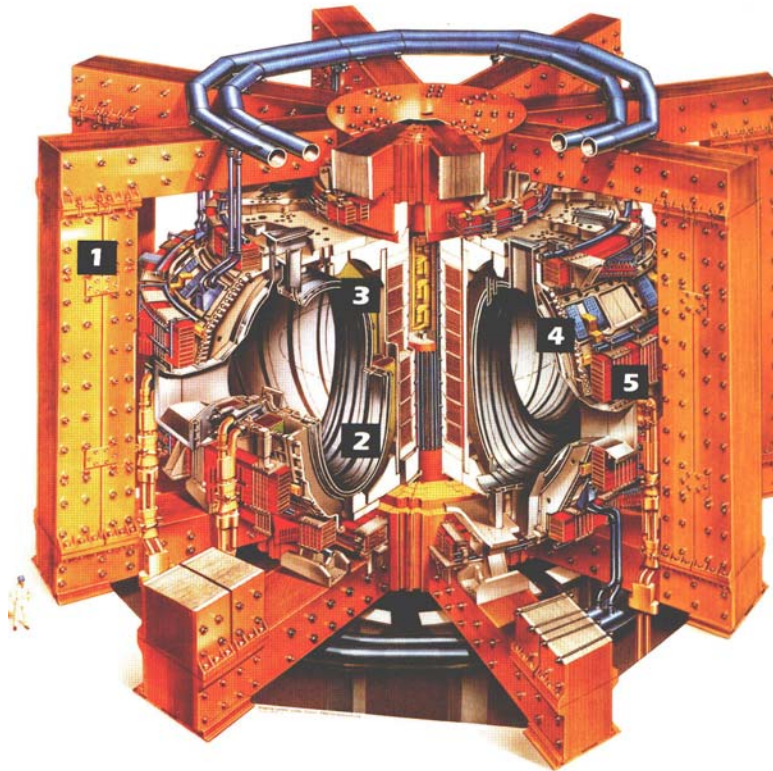


Рис.7б JET – компьютерный разрез: 1- сердечник трансформатора, 2- разрядная камера (без защиты), 3-первичная обмотка трансформатора, 4 – механические структуры камеры, 5- полоидальные витки, обеспечивающие равновесие и удлиненную форму плазменного шнура (EUR 15290).

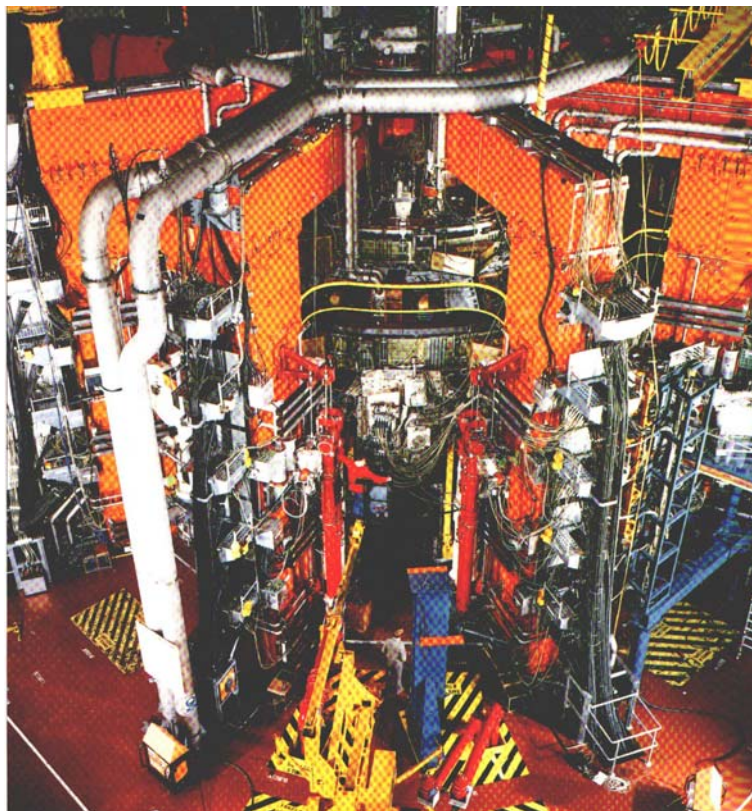


Рис.8 JET – общий вид.

К сожалению, сколько-нибудь значительного успеха первый токамак не имел, впрочем, он тогда не носил еще это громкое имя, а назывался скромно – ТМП. Однако одно стало ясно - дальнейшее движение вперед потребует серьезнейшего развития технологии: прежде всего вакуумной и магнитной. Позже, подводя итоги первого этапа термоядерных исследований, Арцимович скажет: “Сейчас всем ясно, что первоначальные предположения о том, что двери в желанную область сверхвысоких температур откроются без скрипа при первом же мощном импульсе творческой энергии физиков, оказались столь же необоснованными, как и надежда грешника войти в царствие небесное, минуя чистилище. И все же вряд ли могут быть какие-нибудь сомнения в том, что проблема управляемого термоядерного синтеза будет решена. Неизвестно только, насколько затянется наше пребывание в чистилище. Из него мы должны будем выйти с идеальной вакуумной технологией, отработанными магнитными конфигурациями с точно заданной геометрией силовых линий, с программированными режимами электрических контуров, неся в руках спокойную, устойчивую высокотемпературную плазму, чистую, как мысль физика-теоретика. когда она еще не запятнана соприкосновением с экспериментальными фактами”.

Потребовалось шесть долгих лет, строительство целой серии подобных установок прежде чем в 1962 году удалось получить оторванный от стенок плазменный шнур с невероятной по тем временам температурой в один миллион градусов. Случилось это незадолго до гибели Явлинского в авиационной катастрофе. Ему удалось увидеть первые результаты своих трудов. После его смерти токамаки возглавил сам Арцимович.

Отношение к ним в термоядерном научном мире было в то время, мягко говоря, снисходительным. Во всех тогдашних магнитных ловушках плазма оказывалась совершенно неустойчивой. Ее поверхность, подобно солнечной, кипела протуберанцами, выбрасывающимися на стенку камеры, как если бы никакого магнитного поля не было. Дополнительный электрический ток в таких условиях давал плазме дополнительные степени свободы, то есть мог только усугубить ее бесчинства. Предпочтение дружно отдавалось стеллараторам. Однако неожиданно выяснилось, что сплющенное и закрученное в винт стеллараторное магнитное поле требует к себе сверхделикатного отношения. Малейшие неточности в изготовлении или в расстановке создающих его магнитных катушек безнадежно портят ловушку – магнитные силовые линии, а с ними и плазма “утекают” на стенку. В середине шестидесятых стеллараторы наткнулись на это препятствие и явно замедлили продвижение.

Токамаки между тем продолжали расширять достигнутый успех – температура получаемой в них плазмы постепенно росла. За счет чего? Прежде всего за счет совершенствования той самой плазменной технологии, о которой говорил Арцимович. Мы просто больше узнавали о плазме, о ее вкусах, привычках, часто обнаруживая, что сами провоцировали ее на “бесчинства”. Процесс этот был долгим и мучительным, но типичным для нормальной науки.

В конце шестидесятых температура плазмы в токамаках уже достигла уровня десяти миллионов градусов и, похоже, на Западе, на фоне стеллараторного застоя, кое-кто нам просто перестал верить. 1969 год стал для токамаков триумфальным. Той осенью в Дубне на Международном совещании по замкнутым ловушкам произошло событие, объявленное позднее зарубежными газетчиками ни много ни мало, как “признание Западом лидирующей роли советского токамака в исследованиях по управляемому синтезу”. История эта многократно описана и обросла легендами.

Суть ее состояла в том, что весной 1969 года к нам на токамак Т-3А в Курчатовский институт атомной энергии прибыла группа английских физиков и инженеров с несколькими тоннами научной аппаратуры, чтобы новейшим тогда методом лазерного зондирования проверить наши измерения электронной температуры, в которые они отказывались верить. Акция эта явилась результатом договоренности между Л.А. Арцимовичем и директором Калэмской лаборатории доктором Р.Пизом - явление незаурядное даже по современным меркам.

К осени, с честью преодолев различные трудности, дружная советско-английская группа успешно завершила лазерные измерения и, как с шумом было объявлено в западных газетах, “получила результаты даже более высокие, чем сообщалось русскими”. (Русские измеряли среднюю температуру, а лазер давал локальную. В таких случаях говорят: “совпадение оказалось глубоко в классе точности”).

Убедительное доказательство существования в токамаках электронной температуры масштаба десяти миллионов градусов оказалось для многих сенсацией.

Второй, хотя и не такой яркой сенсацией, представленной в Дубне, стали наши измерения температуры ионов. Для синтеза важна именно она. Измеряли ее страшно скрупулезно - тремя независимыми методами. Она, как и следовало ожидать для плазмы, где ионы нагреваются от электронов, оказалась несколько ниже электронной – около трех миллионов градусов. Но при этом раза в три выше, чем во всех существовавших тогда плазменных магнитных ловушках. В ходе этих опытов (на дейтерии) были зарегистрированы пуск еще редкие, но уже первые термоядерные нейтроны - свидетельства DD синтеза (1).

В итоге США решительно свернули свою стеллараторную программу. Самый большой в мире стелларатор С был переделан в токамак ST. И уже через год на нем были повторены основные результаты Т-3А. Началась токамачная гонка.

Путь к «перевалу». Следующий наш ход - токамак Т-4 (1971) - позволил поднять ионную температуру уже до восьми миллионов градусов, а электронную почти до тридцати. Нейтронные счетчики из режима отдельных “щелчков” перешли в сплошную лавину - “токовый режим”. “По нейтронам” - прямым свидетелям реакции синтеза - стало возможным контролировать поведение ионов в ходе разряда. Это имело большой психологический резонанс. Дело в том, что все предшествующие годы термоядерных исследований были наполнены эпизодами драматических заблуждений именно по поводу якобы наблюдаемых термоядерных нейтронов. Время от времени газеты приносили из разных мест известия о “зажигании термоядерного солнца”. При ближайшем рассмотрении, однако, оказывалось, что наблюдавшиеся единичные нейтроны имели отнюдь не термоядерную природу, а либо являлись результатом ускорения отдельных групп дейтронов, либо были просто на уровне космического фона. Настоящие термоядерные нейтроны снимали последние сомнения. Токамаки получили мощнейшую международную рекламу. Скепсис по отношению к ним сменился восторгом и ощущением легкой победы. Процесс их строительства за рубежом принял обвальный характер. Их было создано более ста на всех континентах кроме Антарктиды.

Они не подвели. Рекорды сыпались, как из рога изобилия (Рис.1). Где-то в конце семидесятых мы оказались в аутсайдерах. Все решали Большие деньги. По оценкам не менее 10 миллиардов долларов – примерная стоимость 10 атомных подлодок! Почему их давали? С середины семидесятых в мире разразился энергетический кризис. Каждый решал его по-своему – одни развивали новые технологии, другие – производство энергоносителей, некоторые – и то и другое. Что же удалось совершить в эти годы?

Рис.1 суммирует полученные результаты. В токамаках удалось достичь термоядерных температур 10-30кэВ (100-300 миллионов градусов) и уровня ядерного энерговыделения, сравнимого с мощностью тепловых плазменных потерь ($P = W / \tau_E$). Этот рубеж, как уже упоминалось, и называют режимом «перевала». Благодаря чему удалось это сделать? Прежде всего, благодаря дальнейшему развитию технологии термоядерного эксперимента. На Рис. 9а изображен современный вид плазменной камеры JETa в процессе подготовки одного из них. Видны решетчатые антенны высокочастотного нагрева плазмы, внизу – диверторный канал – приемник горячих ионов и электронов, вытекающих из горячей зоны на стенку. Стенки камеры и канала защищены графитовыми панелями. На их поверхность нанесен тонкий слой бериллия. Рис. 9,б – JET в действии. Плазма с температурой 100 миллионов градусов прозрачна в кадре видеокамеры – спектр ее теплового излучения далеко смещен из видимого света в область ультрафиолета и рентгена. Лишь яркий белый свет в районе диверторного

канала и защитных экранов выдает места контакта невидимки с предметами реального мира.

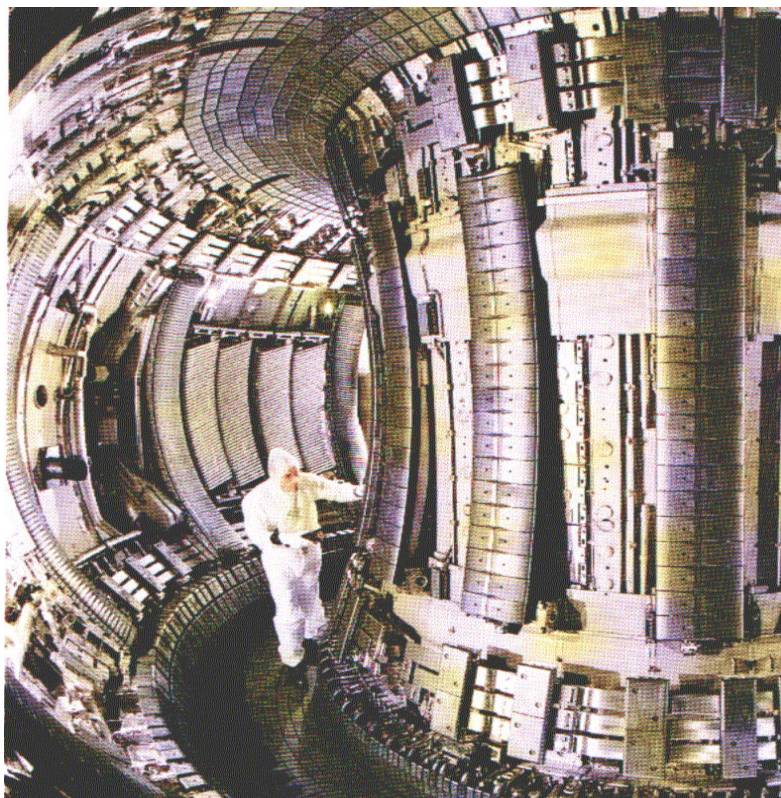


Рис.9а JET изнутри, подготовка к эксперименту



Рис.9б- вид на «термоядерное пламя»

ИТЭР- путь к «зажиганию». Следующим логическим шагом программы управляемого синтеза должно было бы стать создание, так называемого, токамака - реактора с зажиганием. Дело в том, что гелий – продукт синтеза – рождается в виде положительно заряженного иона и в отличие от “свободного” нейтрона не может свободно покинуть замагниченную плазму. Его энергия (1/5 от полной энергии синтеза) идет на нагрев плазмы как бы изнутри. Как только этот внутренний нагрев скомпенсирует тепловые плазменные потери, начнется самоподдерживающееся термоядерное горение. Системы внешнего подогрева плазмы – пучки нейтральных атомов высоких энергий, ВЧ и СВЧ-генераторы - можно тогда отключить, что, несомненно, упростит и удешевит реактор. Этот момент и называют зажиганием. Можно ожидать, что это произойдет, когда полная тепловая мощность ядерного синтеза превысит 300 – 500 МВт. Если вернуться к Рис 1, можно было бы прогнозировать, что это произойдет на уровне 2000-2005 года. К сожалению, не произошло. Энергетический кризис отступил. А с ним и «совершенная необходимость» в новой энергетике. Иными словами, денег на следующий шаг не нашлось. Здесь и возникла идея объединить усилия.

Уже и JET, где впервые был достигнут режим «перевала», сооружался в кооперации стран Европейского содружества. Идея новой кооперации была выдвинута нашей страной (Е.П.Велихов 1990г) и поддержана США, Японией и Объединенной Европой. При этом не последнюю роль сыграло то обстоятельство, что именно наша страна – родина токамаков. Этот проект и получил название ИТЭР. Разработка проекта велась объединенным коллективом физиков и инженеров России, Европы, Америки и Японии. Он был завершен в 1998г.

Впервые в инженерной практике удалось создать реальный проект квазистационарного (1000сек) термоядерного энергетического устройства с расчетной тепловой мощностью около 1.5 ГВт. И не только проект. В натуральном виде были сделаны и испытаны некоторые ключевые элементы конструкции. Все чертежи проекта выполнялись по нормам, действующим на Западе. Это означает, что они могли быть прямо переданы в производство. Во всяком случае, так утверждали авторы.

Создание проекта стоило странам – учредителям около \$1.5 млрд. и пяти лет напряженных работ. Работы велись, главным образом, внутри самих стран – учредителей. С учетом наших трудностей эквивалентный вклад, зачтенный России, составил около \$200 млн. Реально, к сожалению, нами было истрачено намного меньше. В основном, за счет зарплаты. На что пошли эти деньги? Главным образом, на развитие новых и адаптацию известных высоких технологий (сверхпроводимость, материалы, конструкции и т.д.). Это оказало серьезную поддержку нашим инженерам и технологам.

Основной задачей ИТЭРа должно было бы стать получение самоподдерживающейся реакции DT синтеза, которая позволила бы проверить физику термоядерного горения и испытать основные функциональные узлы энергетического реактора, в их числе, различные варианты бланкетных модулей для воспроизводства трития.

На Рис.10 ИТЭР представлен в разрезе. Поперечник камеры – около 5.6м. Многочисленные кольцевые витки с током создают каплевидную в сечении тороидальную плазменную конфигурацию с дивертором, обеспечивая поддержание в плазме тока масштаба 20 мегаампер на протяжении 1000сек. ИТЭР геометрически подобен JETу, однако, есть и серьезные отличия. Его камера окружена радиационной защитой толщиной около метра, магнитные катушки, создающие кольцевое (тороидальное) поле 5.6Тл предполагалось изготовить из сверхпроводящего ниобий-оловянного сплава. Заметим, что наша страна имеет приоритет в создании больших токамаков, использующих сверхпроводник такого типа. Соответствующий отечественный токамак Т-15 (он всего лишь в 1.5 раза меньше JETа) вступил в строй еще в 1988 году в Москве, в Курчатовском институте. К сожалению, последние шесть лет он стоит без движения. Парадокс современной России в духе Свифта – физики, создающие энергетику будущего, не в силах сегодня заплатить за необходимое им электричество.



Рис.10 ИТЭР – компьютерный разрез. Основные функциональные решения аналогичны использованным в JETe. Все магнитные обмотки (1,2) сделаны сверхпроводящими, охлаждаемыми жидким гелием, что допускает стационарную работу реактора. Это заставило окружить конструкцию единым криостатом. Стенки камеры, глядящие в плазму (4) защищены пластинами бериллия, диверторный канал (6) – графитом и вольфрамом.

ИТЭР. Превратности судьбы. Судьба ИТЭРа тоже оказалась в некотором роде парадоксальной. Его предполагаемая стоимость - \$7.5 млрд. за десять лет – вызвала волну критики и за рубежом, и у нас – очень дорого. Штаты предложили уменьшить стоимость в 2 раза. Остальным Учредителям идея понравилась и проектировщики взялись за удешевление. Однако это не спасло четырехсторонний альянс. Конгресс США не продлил участие страны в Проекте. Причина – несоответствие Проекта государственным интересам. Четверка Учредителей превратилась в тройку. Детали этой пикантной истории читатель сможет найти в недавно опубликованной книжке Л.Г.Голубчикова «ИТЭР. Решающий шаг» (МИФИ. М. 2004).

Альянс, между тем, не распался. Проект нового удешевленного ИТЭРа (\$3.5 млрд.) был завершен в 2001г. Как и следовало ожидать, уменьшились размеры и ожидаемые параметры. Поперечный размер горячей зоны 2а сократился до 4м, плазменный ток снизился до 15МА, предполагаемая длительность горения упала в 2.5 раза, до 400сек., а мощность до 500 МВт. Тем не менее, основные цели остались, практически, теми же.

На чем основана наша уверенность, что, несмотря на снижение «надежности» Проекта, в ИТЭРе(2001) будет выполнено условие Лоусона и достигнуто зажигание?

Запланированная в новом ИТЭРе плотность плазмы - n -должна составить 10^{20} м^{-3} , что для современных токамаков не является рекордом (рекорд 10^{21} м^{-3}). Рекордным должно стать энергетическое время жизни - τ_E – ключевой параметр, характеризующий степень термоизоляции горячей плазмы. Оно должно достичь 3-5сек вместо 1сек сегодня. (Не путать его со временем существования самого горячего плазменного образования, оно может быть при этом сколь угодно большим, сегодня, например, до 600сек).

Параметрический анализ основного массива экспериментальных данных, полученных на разных токамаках с геометрией, подобной ИТЭРу, позволил вывести некоторый закон подобия для τ_E , связывающий его с основными плазменными и геометрическими параметрами горячей зоны. А именно, с поперечным размером $2a$, большим радиусом тора R (м), током, текущим по плазме J_p (МА), плотностью n (10^{19} м^{-3}), тороидальным магнитным полем B_T (Тл), мощностью нагрева P_H (МВт, - в стационаре она же мощность плазменных потерь P), массой ионов в протонных единицах M и удлинением плазменного шнура по вертикали k . Результат компьютерного анализа, выглядит очень громоздким:

$$\tau_{E,98} = 0,0365 I_p^{0,97} \cdot B_T^{0,08} \cdot P_H^{-0,63} \cdot n^{0,41} \cdot M^{0,20} \cdot R^{1,93} \cdot (a/R)^{0,23} \cdot k^{0,67} \text{ сек}$$

Если сюда подставить параметры ИТЭРа(2001), получается около 4сек. Условие Лоусона выполняется с запасом 2. Масштаб отклонения реальных данных, получаемых на разных токамаках, от этого закона можно оценить, взглянув на Рис.11. Он невелик. Ничуть не иронизируя, можно сказать, что этот универсальный закон подобия для τ_E стоил человечеству около 10 миллиардов долларов.

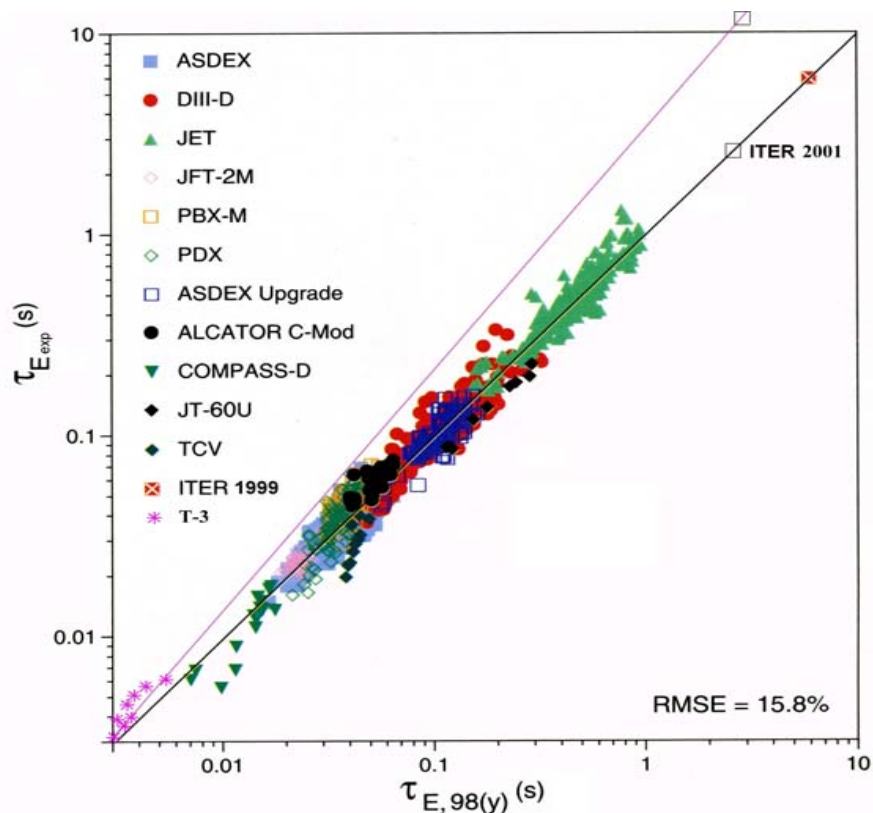


Рис.11 Экспериментально найденные значения τ_E и экстраполяции $\tau_{E,98}$ и $\tau_{E,68}$.

Округляя сложные компьютерные степени и пренебрегая степенями меньшими 0.2 можно записать его в упрощенном и более понятном виде:

$$\tau_{E,98} \sim I_p n^{0,4} \cdot R^{1,7} \cdot a^{0,2} \cdot P_H^{-0,6} k^{0,7}$$

Удивительно, но в таком виде он оказывается очень похож на закон подобия, представленный нашими физиками в далеком 1968 году на Новосибирскую конференцию МАГАТЭ по управляемому синтезу (Л.А.Арцимович и др.):

$$\tau_{E,68} \sim B_p a^2 n^{1/3} \text{ или } \sim I_p n^{0,33} a, \text{ т.к. магнитное поле тока - } B_p \sim I_p/a.$$

Подставив в это выражение предполагаемые параметры ИТЭРа(2001), тогдашний физик – токамачник (абсолютные значения τ_E составляли тогда 1-6 мсек) получил бы значение 12сек, всего лишь в три раза выше, чем аналогичный физик тридцатью годами позже. Экстраполяция 1968 года представлена верхним лучом на Рис.11. Таким образом, можно констатировать, что даже при экстраполяции в 1000 раз токамак, как физический объект, демонстрирует окружающим удивительно стабильное подобие. Снова напрашивается аналогия с собаками. Экстраполяция от уровня сегодняшних токамаков до ИТЭРа предполагает увеличение τ_E только в 4 раза, а потому кажется вполне надежной.

Серьезностораживает одна особенность выражения для $\tau_{E,98}$ – падающая зависимость от мощности нагрева P_H ($\sim P_H^{-0,6}$). Закон подобия $\tau_{E,68}$ ее не обнаруживал, видимо из-за того, что был получен в условиях одного омического нагрева плазмы, при котором P_H меняется незначительно в широком диапазоне изменения разрядных параметров. Эта падающая зависимость допускает, однако, простую физическую интерпретацию. Вспомним, что в стационаре $\tau_E = W/P$. Исключив $P_H=P$ из правой части выражения для $\tau_{E,98}$, и воспользовавшись экспериментально обнаруженным фактом, что $n_{max} \sim I_p/a^2$, мы без труда получим:

$$\tau_{E,98}' \sim (1/\beta_T)^{1,7} V^{1/2} B_T^{0,6}$$

где: V - полный объем плазмы, а β_T – отношение давления плазмы nkT к давлению тороидального магнитного поля $B_T^2/8\pi$ – второй важнейший параметр, характеризующий удержание горячей плазмы в токамаке. Скорее всего, рост именно этого параметра, то есть энергии нагреваемой плазмы, является ответственным за деградацию $\tau_{E,98}$ по мере роста P_H .

Полученное нами выражение, очевидно, не носит универсального характера, так как основано на сравнительно узкой экспериментальной базе (Рис.11), а именно, на базе токамаков геометрически «подобных ИТЭРу» с $k=1.5-1.8$ и $R/a = 3-4$. Правда, эта геометрия достаточно жестко определена вертикальной устойчивостью и толщиной радиационной защиты (1м). Оставаясь в ее рамках и полагая β_T величиной приблизительно постоянной, следовало бы заключить, что основные возможные пути повышения τ_E – увеличение объема горячей зоны (V) и магнитного поля B_T . По сравнению с сегодняшними большими токамаками (JET, JT60U) объем ИТЭРа предполагается увеличить примерно на порядок, а магнитное поле примерно в 1.5 раза. Это и должно обеспечить необходимое увеличение τ_E .

ИТЭР. Предвидимое будущее. Существуют ли альтернативы ИТЭРу? Несомненно. Как следует из вышеизложенного, зажигание могло бы быть получено в токамаке меньшего объема, но при большем магнитном поле. К сожалению, для таких магнитных полей отсутствуют промышленные сверхпроводники. Применение обычных теплых означало бы отказ от квазистационарных режимов, то есть, потерю практически всей технологической части научной программы. Могли бы стеллараторы составить конкуренцию ИТЭРу? Пока нет. Сложна физика, технология. Требуется время. Два года назад в Европе и США были проведены независимые экспертизы на тему: Каков кратчайший путь к термоядерному

зажиганию? Ответ различных экспертов был однозначен: ИТЭР. Что в таком случае тормозит проект? Выбор места строительства.

Как уже упоминалось, за последнее время в Проект влились: КНР, Южная Корея, вернулись США. С выбором места сложилась патовая ситуация. Циркулируют слухи: против Японии – землетрясения и цунами, за – она участник иракской коалиции. Против Франции – она не участник! Рассерженная Франция готова браться за Проект без США и Японии, но почему-то медлит, не берется. Какова роль России? Она – за Францию: мы ведь тоже не участники коалиции... Но, представим себе, что наступят победные дни и во Франции начнется строительство ИТЭРа.

ИТЭР и мы. Согласованное участие России в сооружении ИТЭРа \$50 млн. в год на протяжении 10 лет строительства. Деньги для нашей науки большие, на уровне годовых расходов серьезной лаборатории большого американского университета. Правда, тратиться они будут, в основном, внутри нашей страны и наверняка опять будет система зачетов. Но какова выгода России в строительстве реактора во Франции? Главная выгода - мы почувствовали это уже в процессе проектирования - выход на высокие технологии и импульс к их развитию в нашей стране. Один из примеров высоких российских технологий, получивших широкое развитие в мировой практике термоядерных исследований, можно видеть на Рис. 12, где изображен гиротронный комплекс сверхвысокочастотного (140ГГц) нагрева плазмы российского токамака Т-10 (ИЯС, РНЦ «Курчатовский институт»). Правда, процесс «расползания» высоких технологий, кажется, раздражает некоторых наших союзников.

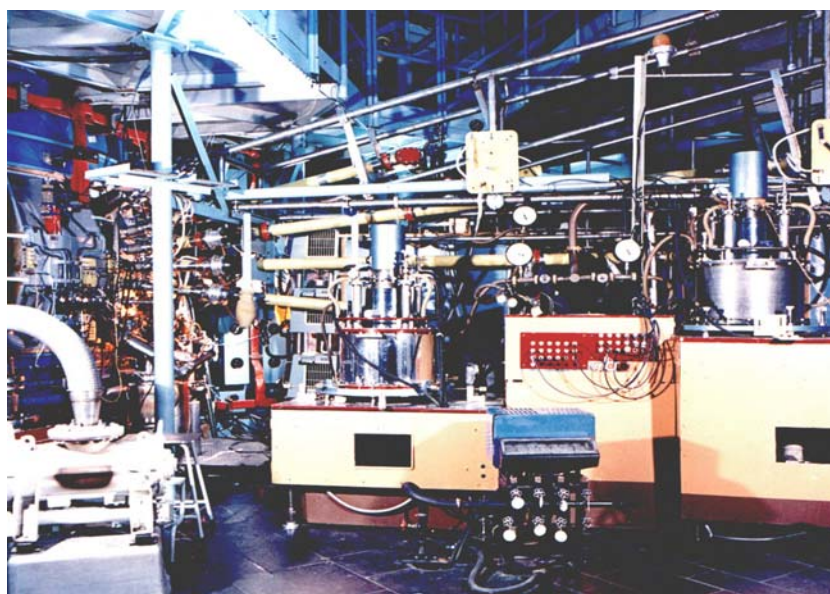


Рис.12 Комплекс СВЧ нагрева Т-10. На первом плане 2 гиротрона (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород) и желтые трубы – каналы ввода СВЧ-мощности в плазму.

Термоядерная ДТ-энергетика естественная часть атомной. Их роднит быстрый 14 МэВный нейтрон и неизбежная активация реакторных конструкций. Более того, обсуждается перспектива его использования для «дожигания» радиоактивных отходов реакторов деления. Для этого даже не потребуется ИТЭР. Удивительно, но то, что требуется, уже есть, только в разных странах и разных лабораториях. Когда экологически чистая энергетика деления станет «совершенно необходима», собрать все элементы воедино не составит большого труда.

Что касается электроэнергетики, ДТ- энергетика по оценкам экспертов будет безопасней примерно на два порядка энергетике деления урана. Главным образом за счет

того, что в ней должны отсутствовать газообразные и жидкие радиоактивные отходы. Твердые по мнению экспертов не представляют большой опасности. Термоядерная энергетика в отличие от деления практически безынерционна. Ситуации типа чернобольской исключены в ней по определению. И, наконец, она не требует урана. Соединение ее с урановой (гибридные реакторы) сулит последней большие перспективы в области реакторной безопасности, но эти вопросы уже выходят за рамки нашей статьи.

Иногда термоядерную энергетику пытаются противопоставить атомной, как якобы безнейтронную. Действительно, есть реакция синтеза (3) $D + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} + p + 18,3 \text{ МэВ}$, которая протекает без нейтрона. Но для ее осуществления нужен ${}^3\text{He}$ с Луны (на Земле его почти нет) и температуры на порядок выше предполагаемых в ИТЭРе. При таких температурах почти равновероятным становится сопутствующий DD- синтез (1) со всем своим нейтронным сопровождением. Можно спорить, в 10 или 20 раз снизится активность, наведенная в реакторе, но очевидно одно - все реально мыслимые сегодня токамаки не пригодны для этой цели. Идеи некоторых новых магнитных конфигураций небезынтересны, однако жизнь научила нас, что между идеей и проектом реактора лежит полоса активности стоимостью примерно \$10 млрд. Пока она не пройдена, шумные разговоры о безнейтронном $D^3\text{He}$ -синтезе и полетах на Луну выглядят, как благовидный предлог некоторых хитрецов для получения дополнительных субсидий на развитие ракетной техники.

Может ли ДТ- энергетика быть использована для производства оружия? Может. Как любая, где фигурируют нейтроны. Потребуется международный контроль.

Сегодня ни для кого не секрет, что окружающий нас мир разделен на две разные технологические цивилизации – высокую (создающую новую технику) и низкую (по существу, копирующую бытовые достижения первой). Граница между ними проведена более чем резко: по уровню суммарного энергопотребления на душу населения. Эти уровни различаются в десятки раз. Высокая цивилизация позволяет себе без потерь и оглядок на ООН наносить точечные удары, если вторая не ведет себя правильно. Роль второй - содействовать первой, в частности, обеспечивать ее ресурсами. Сложившуюся ситуацию иногда определяют как “энергетический империализм”. Стремление развивающихся стран перейти в первую группу очевидно – атомные амбиции, запуски баллистических ракет салютуют об этих стремлениях и успехах. Но возможно и другое движение - из первых во вторые. Оно будет только приветствоваться окружающими. Наше сегодняшнее активное участие в такой международной программе как ИТЭР - один из эпизодов борьбы за сохранение места России в первой группе.

Сайты мировых центров термоядерных исследований:

Центры проектирования ИТЭР:

США: <http://www.iterus.org/>

Евросоюз: <http://www.iter.eu.de>

Япония: <http://www.jaeri.go.jp/~intro/H8/FUSION/fusion.html>

Крупнейшие исследовательские центры:

Россия

ИЯС (Институт Ядерного Синтеза, РНЦ «Курчатовский институт») <http://www.kiae.ru>

ГНЦ ТРИНИТИ (Троицкий институт Инновационных и Термоядерных Исследований) <http://www.trinit.ru>

ФТИАН им А.Ф.Иоффе: http://www.ioffe.rssi.ru/pti_ppap.html

США

US Fusion Energy Science Programs: www.foe.er.doe.gov

MIT (Plasma Science & Fusion Center): <http://lost.pfc.mit.edu>

PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory): www.pppl.gov

GA (General Atomics): <http://FusionEd.gat.com>

ORNL (Oak Ridge National Laboratory): <http://www.ornl.gov>

Япония

JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute): <http://www-jt60.naka.jaeri.go.jp>

NIFS (National Institute for Fusion Science): <http://www.nifs.ac.jp>

Евросоюз

АНГЛИЯ (JET): <http://www.fusion.org.uk>

ГЕРМАНИЯ: Институт Макса Планка: <http://www.ipp.mpg.de>

ФРАНЦИЯ: Центр «Кадараш»: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr>