

# ПРИРОДА

№ 12 - 1999 г.

С. В. Мирнов

## **Токамаки: триумф или поражение?**

**часть 2**

© Природа

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**  
<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

# Токамаки: триумф или поражение?

С. В. Мирнов

## НЕМНОГО ИСТОРИИ

Итак, в начале 50-х годов, вопреки предостережениям скептиков и всезнающих пессимистов, в нашей стране нашлись энтузиасты: ими стали Н.А.Явлинский, И.Н.Головин и их сотрудники. Опыты начали ставить с прямыми стеклянными и фарфоровыми трубами в сильных магнитных полях. Однако никаких шансов получить в них горячую плазму не было — вся энергия, как с помощью люминесцентной методики тогда же изящно показал В.Д.Кириллов, уходила из плазмы в излучение — огромное количество примесей поступало с электродов и стенок в плазму, и токамак превращался в газоразрядную лампу. Единственное, что было четко установлено, — развитие винтовой неустойчивости, предсказанной Шафрановым.

Чтобы устранить влияние электродов, Головин и Явлинский в 1956 г. соорудили первую кольцевую установку ТМП с тороидальной камерой и магнитным полем (до 1.5 Т). По предложению Головина ее сокращенно называли токамаком («т» заменили на «к»). Согласно легенде, окончание «маг» резало слух вышестоящим атеистически настроенным инстанциям. Позднее приходилось сочинять: «тороидальная камера с магнитной катушкой». Первый токамак был внушительным сооружением. Его фарфоровая камера ( $R=0.8$  м,  $a=13$  см) была окружена по совету Сахарова медным кожухом для противодействия радиальному расширению плазменного витка. Индуктор, тогда еще без железного сердечника, позволял создавать ток в плазме до 150 кА. То есть были предусмотрены все необходимые атрибуты токамака. И тем не менее плазма оказалась холодной и неустойчивой. Виною тому была фарфоровая стенка — могучий резервуар легко десорби-

руемых примесей! Несколько улучшила ситуацию стальная спираль, помещенная между стенкой и плазмой. Она указала путь — переход к металлической прогреваемой камере. Последующие пять лет стали годами тяжелого труда (переход на стальные, прогреваемые чуть ли не до 500°C камеры, развитие новых безмасляных средств откачки, небывало точное по тем временам изготовление и сборка элементов магнитной системы и т.д.). По ходу дела выяснилось<sup>8</sup>, что совсем незначительные перекосы магнитных катушек либо даже рассеянные поля трансформатора способны приводить к уходу плазмы на стенку. Потребовалась специальная корректировка конструкции. И все это безудержное усложнение эксперимента проходило на фоне очень скромных, почти незаметных новых физических результатов. Можно только восхищаться верой и терпением этих людей. И они были вознаграждены.

В начале 1962 г., через шесть лет после начала опытов на ТМП, на новом небольшом токамаке ТМ-2 ( $R=0.4$  м,  $a=10$  см) Е.П.Горбунов и К.А.Разумова впервые обнаружили невиданный доселе в термоядерных исследованиях режим разряда без каких-либо значительных колебаний плазменных параметров. Помнится, весной 62-го года худенькая черноволосая женщина с замашками социал-революционерки начала века спокойно и толково рассказывала эту невероятную новость на текущем семинаре отдела плазменных исследований Курчатковского института. Определенная по электропроводности температура электронов достигла в ее плазме чуть ли не ста электронвольт ( $10^6$  К). Начальник отдела — известный скептик Арцимович — тут же предположил, что речь идет о бетатронном эффекте, о группе ускоренных элект-

ронов. Тем более что такие электроны наблюдались<sup>9</sup> эпизодически на всех токамаках, начиная с ТМП. Величие момента было как-то стерто, потребовалось семь лет перекрестных измерений (мягкий рентген, диамагнетизм, лазерное рассеяние), чтобы убедиться окончательно: температура действительно такова. Английские измерения на Т-3 поставили в этом деле последнюю точку.

Оборачиваясь сегодня назад, мы с полным основанием исчисляем историю токамака с весны 1962 г., когда в ТМ-2 впервые удалось отчетливо наблюдать «эффект токамака» – образование устойчивого плазменного шнура, результат причудливой игры с участием электронного ускорения, столкновений, процессов переноса и различных плазменных неустойчивостей. Сегодня, когда пройден баснословный путь от тех 100 эВ на крошечном ТМ-2 до современных сверхгигантов с температурами 40 кэВ, становится очевидным, что токамак – один из уникальных физических объектов, рожденных наукой XX в., прибор, позволивший заглянуть в мир звездных температур. Но мир един, и можно надеяться, что дальнейшее доскональное изучение физики токамака позволит прояснить происходящее в звездных средах, прежде всего динамику их неустойчивостей, т.е. понять в конечном счете механизмы работы естественных термоядерных реакторов. Что же касается прямого энергетического использования токамака, то это, к сожалению, не нам решать. Вопрос переадресован XXI веку. Как бы то ни было, получение квазистационарной физической реакции синтеза на Т-3 и Т-4 спровоцировало мощное движение в этом направлении, и советская наука внесла здесь основополагающий вклад.

Следующим принципиальным этапом стало получение плазмы с реакторными ионными температурами (до 7 кэВ) на токамаке РЛТ (США, 1978). Это замечательное достижение явилось результатом двух нововведений – дополнительно нагрева плазмы мощными пучками ней-

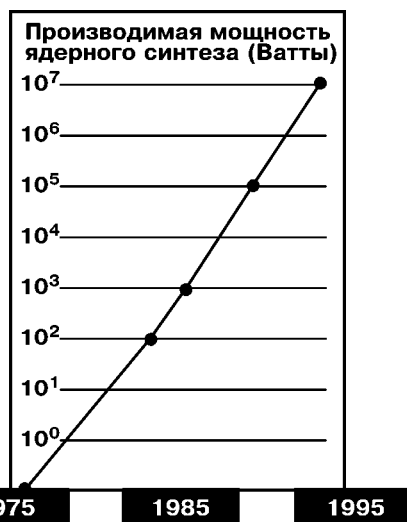


Рис. 4. Динамика роста мощности ядерного синтеза в 1975–1995 гг.

тральных атомов и перехода на новые материалы: поверхность камеры, непосредственно контактирующую с плазмой (ее называют лимитер, или у нас чаще – диафрагмой, подробнее речь о ней пойдет ниже), изготовили не из традиционных – вольфрама или нержавеющей стали, – а из графита. Успех РЛТ был трамплином для создания токамаков-гигантов: JET (Великобритания), JT-60 (Япония), TFTR (США), Т-15 (у нас). Размеры их оказались всего лишь в 2–3 раза меньше размеров предполагаемого реактора. Сегодня их исследовательские программы либо завершены, либо завершаются (Т-15 законсервирован из-за отсутствия средств).

Что они дали? Это показывает рис. 4, взятый из буклета Министерства энергетики США, где представлена динамика роста мощности ядерного синтеза, достигнутого на разных токамаках в 1975–1995 гг.: налицо подъем более чем в 100 млн раз за 20 лет!

Наконец, как уже упоминалось, 30 октября 1997 г. в заключительном эксперименте с DT-смесью 50/50% на токамаке JET была достигнута мощность ядерного энерговыделения более 16 МВт (эта точка на диаграмме рис. 4 еще не поставлена) при полной мощности дополнительного нагре-

<sup>9</sup> Стрелков В.С. Исследование излучений без-электродного разряда в дейтерии // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций / Под ред. М.А.Леонovichа. М., 1958. Т.IV. С.156.

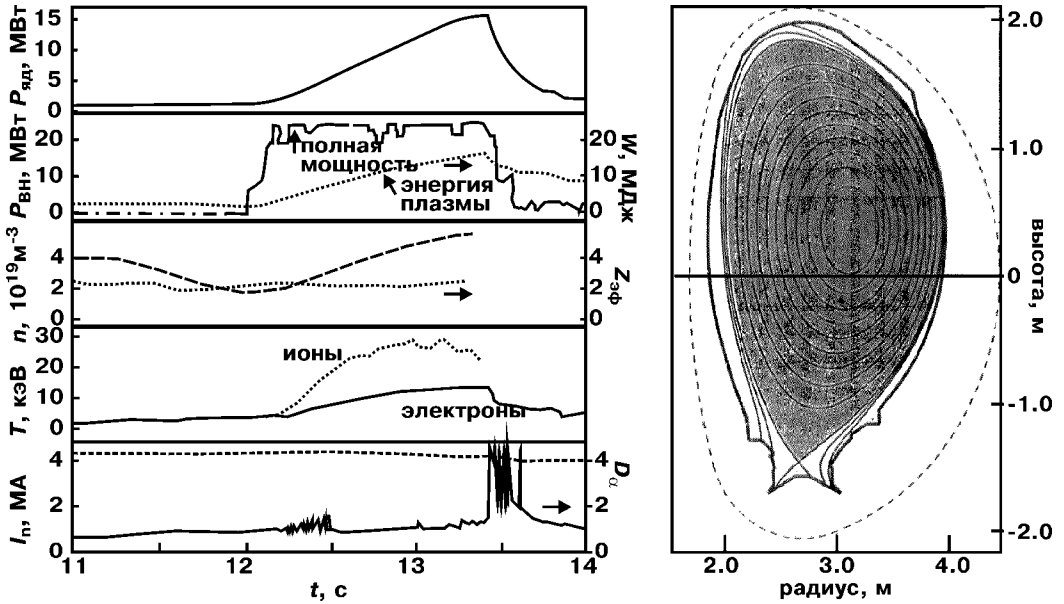


Рис.5. Слева: временной ход основных плазменных параметров в процессе рекордного DT-импульса JET с мощностью энерговыделения 16.1 МВт ( $D_\alpha(t)$  — свечение спектральной линии дейтерия вблизи стенки как индикатор взаимодействия плазма-стенка.) Справа: разрез магнитных поверхностей JET.

ва около 25 МВт. Эксперимент закончился локальным сбросом энергии (малым периферийным срывом), внешне напоминающим солнечную вспышку — явлением более или менее понятным. Однако перед срывом энергия плазмы еще продолжала возрастать. Расчеты показали, что в этот момент ядерное энерговыделение примерно сравнялось с мощностью плазменных потерь. Тем самым произошло вполне историческое событие в исследованиях УТС — достижение режима «перевала»,  $Q=1$ . Правда, этот замечательный результат получен пока лишь в переходном импульсном режиме. К сожалению, это еще не устойчивое термоядерное горение, а, скорее, «чирканье» термоядерными спичками. На рис.5 для данного случая представлен временной ход основных параметров плазмы в процессе нагрева<sup>10</sup>: мощности DT-синтеза, энергии плазмы, электронной плотности, эффективного (среднего) заряда плазмы —  $Z_{\text{эф}}$ , температуры ионов, электронов и индикатора взаимодействия плазма-стенка — интен-

сивности свечения спектральной линии дейтерия  $D_\alpha$ . Этот импульс еще далек от стационарного или квазистационарного (с длительностью  $t \gg \tau_E \approx 1$  с), необходимого для реактора. В квазистационарных режимах  $Q$  пока не превосходит  $\approx 0.25$ . Однако достижение квазистационарного  $Q \approx 1$  кажется делом времени и скорее всего не потребует строительства новых дорогостоящих установок.

Чем выделен для нас режим с  $Q \approx 1$ ? Как уже упоминалось,  $Q=1$  мало для работы «чистого» реактора. Но, имея мощный источник быстрых (14 МэВ) нейтронов и поместив в бланкет природный или даже «отвалный» ( $^{238}\text{U}$ ) уран, мы могли бы удесятерить тепловую мощность, превратить ее затем в электричество (30%) и далее — использовать как источник дополнительного нагрева ( $\sim 30\%$ ), замкнув тем самым энергетический цикл реактора УТС. Схема эта чем-то напоминает схему первых водородных бомб. Фактически речь идет о глубоко подкритическом (т.е. безопасном) реакторе деления с независимым источником нейтронов. К сожалению, мы

<sup>10</sup> JET Joint Undertaking. Progress Report. Abingdon, 1997.

теряем таким образом важное преимущество DT-синтеза – отсутствие делящихся материалов в blankets реактора – и попадаем под град критики. И тем не менее это этап выхода экспериментальных устройств УТС на уровень первых, пусть символических, технических применений.

Следующим логическим шагом программы должно было стать создание токамака-реактора с зажиганием, т.е. системы, позволяющей вырабатывать квазистационарно по крайней мере 100–500 МВт тепловой мощности и компенсировать свои энергозатраты. Если вернуться к рис.4, можно ожидать, что это произойдет в 2000–2005 гг. К сожалению, не все так просто. Сегодня под угрозой оказался сам механизм, обеспечивающий рост термоядерных достижений.

В предыдущие годы основой подъема ядерного энерговыхода на токамаках был согласованный, напряженный труд нескольких тысяч наших современников в различных частях земного шара. Для стороннего наблюдателя следы этого труда выглядели как процесс прогрессивного увеличения размеров и мощностей экспериментальных устройств. На цветной вкладке в конце статьи изображены один из самых маленьких существующих токамаков – «Novillo» (Мексика) и самый большой из них – JET. А на правой странице вкладки – фрагменты разрядных камер самого большого для своего времени токамака T-2 (ИАЭ им.Курчатова, 1961) и JET. Что давало увеличение размеров? Прежде всего увеличение энергетического времени жизни  $\tau_E$  – с 0.1–0.3 мс в 1962 г. до 1–2 с сегодня. Для токамака с зажиганием необходимо  $\tau_E = 4–6$  с. Это означает примерное удвоение размеров JET. Здравый смысл подсказывал, что строительство такого сверхгиганта следовало бы осуществлять сообща, силами нескольких стран. Идея подобной кооперации от имени нашей страны была выдвинута Е.П. Велюховым в 1990 г. и поддержана в США, Японии и Европейском сообществе. Проект, как уже упоминалось выше, получил название «Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор» (ИТЭР). Разработка его велась объединенным многонациональным коллективом физиков и инженеров. Сегодня он завершен. Что получилось?

## ИТЭР

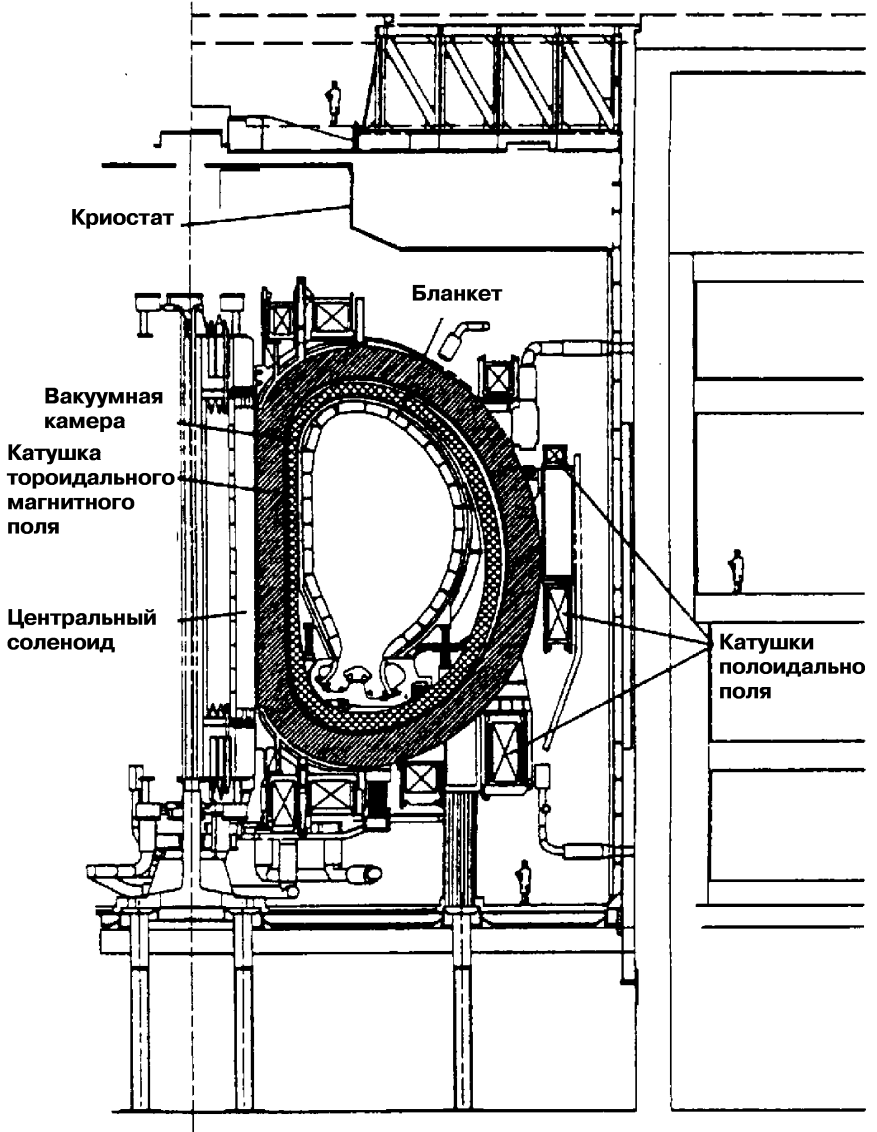
Впервые в человеческой практике удалось создать реальный проект квазистационарного термоядерного устройства с расчетной тепловой мощностью около 1.5 ГВт. И не только проект. В натуральном виде были сделаны и испытаны некоторые ключевые элементы конструкции. Все чертежи проекта выполнялись по нормам, действующим на Западе, и могут быть прямо переданы в производство. Во всяком случае, так утверждают авторы.

Создание проекта стоило странам-учредителям около 1.5 млрд амер. долл. и пяти лет работ. Работы велись главным образом внутри самих этих стран. России, с учетом ее трудностей, засчитан эквивалентный вклад около 200 млн долл. Но реально затрачено существенно меньше, в основном за счет зарплаты. На что пошли эти деньги? Главным образом на развитие новых и адаптацию известных уникальных технологий (в области сверхпроводимости, материалов, конструкций и т.д.). Это оказало серьезную поддержку нашим инженерам и технологам. Физики-плазменщики, к сожалению, почти не финансировались из этих средств – таково было условие.

Основной задачей ИТЭРа должно было бы стать получение квазистационарной (1000 с) DT-реакции синтеза, которая позволила бы испытать основные функциональные узлы энергетического реактора, в том числе различные варианты blanket-ных модулей для воспроизводства трития. В таблице приведены параметры ИТЭРа, а на рис.6 – его предполагаемая компоновка. Критерием выбора параметров стало обеспечение гарантированного зажигания и стабильного «горения» DT-реакции на протяжении всего разрядного импульса. Ключевым параметром, как уже обсуждалось выше, является  $\tau_E$ . Удастся ли в ИТЭРе получить необходимые 6 с? На рис.7

### Параметры ИТЭРа

$I_{pl}$ = 21 MA	$P_{\text{вн}}$ = 50–100 МВт
$R$ = 8.1 м	$P_{\text{зд}}$ = 1.5 ГВт
$a$ = 2.8 м	$\beta_{\text{зд}}$ = 3.2%
$\epsilon = a/R = 0.35$	$q(a) = 3$
$B_0$ = 5.7 Т	$\langle n_e \rangle = 1.1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$
$B_{\text{макс}}$ = 12.5 Т	$\langle T_e \rangle = 11 \text{ кэВ}$
$\tau_{\text{exp}}$ = 1000 с	$\langle T_i \rangle = 10 \text{ кэВ}$



Рисб. ИТЭР в разрезе.

представлены результаты тщательного анализа<sup>11</sup> всей имеющейся базы данных по термоизоляции плазмы в токамаках, геометрически подобных ИТЭРу. На основе его был получен некоторый закон подобия для  $\tau_E$ , учитывающий размеры, плазменный ток и другие параметры токамака.

Оказалось, что  $\tau_E$  растет почти пропорционально току, примерно пропорционально квадрату большого радиуса и несколько увеличивается (по степенному закону с показателем степени 0.4) с ростом плотности плазмы. Замечательно, что эти зависимости знакомы нам еще с 60–70-х годов, с начала работы первых советских токамаков. Приходится констатировать, что токамаки, от самых малых до гигантских,

<sup>11</sup> ITER Physics Basis. San Diego, Nov. 1997.

обнаруживают удивительную схожесть поведения, позволяющую говорить о единой физике протекающих в них процессов. Новым обстоятельством, проявившимся в токамаках с мощным дополнительным нагревом, стало снижение  $\tau_E$  по мере увеличения мощности нагрева (примерно  $\sim P_{\text{вн}}^{-0.6}$ ). Возможно, оно отражает процесс ухудшения теплоизоляции с ростом  $\beta$ . Есть несколько объяснений этому явлению, но их обсуждение слишком далеко увело бы нас от темы. Во всяком случае, пользуясь законом подобия для  $\tau_E$ , можно, подставив параметры ИТЭРа, получить для него необходимую оценку. Это и сделано на рис. 7, где по оси абсцисс отложены вычисленные значения  $\tau_E$ , а по оси ординат — экспериментально измеренные на разных токамаках. Естественно предположить, что  $\tau_E = 6$  с будет достигнуто в ИТЭРе с высокой степенью надежности, если не возникнут новые осложнения, связанные с увеличением размеров системы.

Не велик ли малый радиус плазмы — 2.8 м? По-видимому, нет. Дело в том, что толщина blankets и защиты должна быть масштаба 1 м. Это — абсолютная величина для всех реакторов УТС. Нерационально было бы помещать в сильное магнитное поле плазменный шнур, меньший по размеру, чем защита. В результате оказывается, что плазменные требования и техническая эффективность конструкции удачно согласуются в проекте.

Полная стоимость проекта высока — около 7.5 млрд амер. долл., она того же масштаба, что и стоимость зажигания в инерционном синтезе. С одной лишь разницей: ИТЭР не имеет отношения к оружию. Это, увы, сильно уменьшает его шансы на реализацию в ближайшее время. И действительно, учредители порекомендовали проектантам снизить стоимость ИТЭРа в два раза. Сегодня обсуждаются варианты, за счет чего это сделать: уменьшать длительность импульса, снижать гарантию зажигания?

Какие проблемы могли бы встретиться на пути реализации такого токамака?

#### ПРОБЛЕМЫ

Кажется, что прежде всего это будут проблемы примесей и большого срыва. Проблема срыва — проблема импуль-

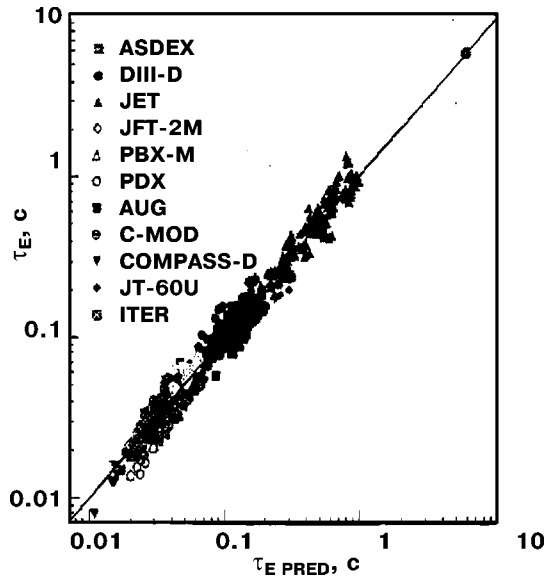


Рис. 7. Экспериментально измеренные значения  $\tau_E$  для десяти различных токамаков, геометрически подобных ИТЭРу, в зависимости от выбранного экстраполяционного параметра  $\tau_E^{\text{PRED}} = 3.65 \cdot 10^{-2} I_{\text{п}}^{0.97} V_{\text{т}}^{0.08} p^{-0.63} n^{0.41} M^{0.2} R^{1.93} a^{0.23} K^{0.67}$  с. Здесь  $M$  — средняя масса ионов, отнесенная к массе протона,  $K=1.6$  — вертикальное удлинение шнура (см. рис. 6). Для ИТЭРа  $\tau_E^{\text{PRED}}$  около 6 с.

сного (за 1–3 мс) выделения примерно 1 ГДж плазменной энергии на внутренних элементах реактора в виде тепла. Если в малых токамаках срыв всего лишь интересное физическое явление, то для больших систем он очень опасен. Его можно почти устранить рациональным управлением плазменным процессом. Но почти. Остается конечная вероятность ошибки. Возможно, потребуется специальная система защиты, которая в случае развития большого срыва быстро инжектирует в шнур некоторое число твердых крупинок Be, Li либо D<sub>2</sub>, чтобы те, испаряясь и переизлучая энергию у границы, защитили бы от плотного контакта с плазмой элементы конструкции. Подобные эксперименты по «тушению» разряда успешно ведутся на больших токамаках.

Проблема примесей является критической не только для токамаков, но и для всей программы УТС. Неупругие столкно-

веня электронов с атомами примесей, охлаждая электроны и в итоге ионы, способны за миллисекунды потушить реакцию. Проблема эта, заявившая о себе уже в первых опытах с фарфоровыми и стеклянными трубами, висит над токамаками дамкловым мечом. Наблюдая динамику их развития последние сорок лет, так сказать, изнутри, беру на себя смелость утверждать, что каждый раз успехи имели в качестве первоосновы тот или иной способ подавления потока примесей со стенки в плазму. Переход на новый уровень мощностей тут же обострял ситуацию. Успех первых токамаков был обеспечен новой технологией вакуумной подготовки стенок камер и введением ограничительного кольца шириной 2–5 см между стенкой и шнуром (лимитера), перекочевавшего на токамаки с американского стелларатора В-1 и получившего у нас название «диафрагма». Одна из первых стальных диафрагм хорошо видна на фотографии камеры Т-2 (цветная вкладка). На фотографии же камеры JET (цветная вкладка) можно видеть, во что трансформировалось сегодня это простое кольцо – в графито-бериллиевую кольчатку из отдельных плиток на внутренней поверхности тора. Диафрагма стала важным технологическим открытием. Такое кольцо, очищенное от поверхностных загрязнений интенсивной плазменной бомбардировкой, максимально ослабило взаимодействие плазмы со стенкой и сделало возможным существование устойчивого разряда.

На Т-4, например, это кольцо уже представляло собой вольфрамовый «домик», с «крышей», обращенной в сторону плазмы. Плазма прогревала и очищала «крышу», а потому примесей было сравнительно мало. Это-то и обеспечило большие токи и большое количество нейтронов. Следующую диафрагму Т-4 для надежности сделали в виде массивного (24 кг) кольца из сплава вольфрама с рением. Прогреть ее не удалось, и затея провалилась. Зато последующая диафрагма оказалась абсолютно революционной: она была сделана из так называемого углесталла (УСБ-15) – специального графитового материала с большим (до 15%) содержанием бора. Идея применить графит как материал с малым зарядом ядра  $Z$  принадлежала Арцимовичу. Дело в том,

что в классической плазменной теории примеси с высоким  $Z$  должны собираться к оси шнура<sup>12</sup> – эффект, чем-то напоминающий собирание чаинок к оси стакана. А это чревато неприятностями: охлаждением центра за счет излучения, вытеснением тока, потерей устойчивости и т.д. Первые же опыты<sup>13</sup> по исследованию пространственного распределения примесей по сечению шнура в Т-4 показали, что так оно и есть: в наилучших устойчивых режимах они собираются к оси. И напротив, в слабо неустойчивых, где поступление примесей со стенок даже растет, их содержание в центре падает! И снова, как в случае с ускоренными электронами, мы в токамаке вынуждены балансировать на грани устойчивости – неустойчивости, чтобы подавить нежелательные для нас последствия некоторых «классических» процессов. Следуя этому пути и намеренно разрушая магнитные поверхности у границы (токамак «Tor Supra», Франция), удалось снизить поток тяжелых примесей в центр. Это – несомненный резерв токамаков.

Другой путь – уже упоминавшийся переход к малым  $Z$ , например к графиту от вольфрама. Но обычный реакторный графит обладает значительным химическим распылением при взаимодействии с водородом и вряд ли пригоден<sup>14</sup>. Однако небольшие добавки, например бора, снижают это распыление<sup>15</sup>. По совету Н.В.Плешивцева в качестве такого материала с подавленным распылением и был выбран углесталл. Действительность превзошла все ожидания. Была получена почти чистая плазма. Показателем плазменной чистоты служит ее средний, или эффективный, заряд  $Z_{эф}$ . В опытах, проведенных на Т-4, он упал с 5–6 (вольфрам) до 2. Еще более сенсационным оказались уже упомянутые опыты на РЛТ с достижением термоядерных температур.

<sup>12</sup> Брагинский С.И. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А.Леонтовича. М., 1963. Т.1. С.191.

<sup>13</sup> Вершков В.А., Мирнов С.В. // Nucl. Fus. 1974. V.14. №3. P.383.

<sup>14</sup> Bucharov N.P., Guseva M.I., Gusev V.M., Martynenko Y.V. // J. Nucl. Mat. 1976. V.63. P.230.

<sup>15</sup> Бушаров Н.П., Гусев В.М., Гусева М.И., Мирнов С.В. // Атомная энергия. 1977. Т.42. Вып.6. С.486.



Чтобы получить их, в плазму ввели нейтральные пучки невиданной до этого мощности в 4 МВт. Поверхность стоявшей в РЛТ диафрагмы из стали, похоже, взорвалась — температура плазмы упала! Ее заменили на графитовую и получили рост температуры в 5 раз — до уровня 5–7 кэВ (1978). С этого момента в токамаках уверенно воцарилась «графитовая» эра. Сегодня все внутренние поверхности крупных токамаков выкладывают графитовыми плитками. Для подавления химического распыления их покрывают с помощью газового разряда боросодержащими пленками. Исключение составляет JET, где графит частично заменен на бериллий ( $Z=4$ ). Последний обнаружил ряд явных преимуществ. Не исключено, что рекордные достижения JET — результат этого перехода. В сегодняшнем ИТЭРе пока принята графит-бериллиевая технология. Иное решение было предложено на TFTR. Там в дополнение к графитовой диафрагме стали вводить крупинки лития ( $Z=3$ ), испаряющиеся в процессе разряда, и тоже снизили поступление углерода. Литиевый путь только начат, и многие полагают, что он сулит большие перспективы. Несмотря на российские трудности, в прошлом году на малом токамаке T-11M удалось успешно испытать в плазме впервые предложенный нашими учеными вариант капиллярно-пористой литиевой диафрагмы.

Наконец, эффективным средством борьбы с поступающими в разряд примесями стали полоидальные магнитные диверторы (отклонители). Идея их состоит в том, чтобы с помощью дополнительных токовых витков отклонить и увести периферийные магнитные силовые линии в специальную диверторную камеру, удаленную от горячей зоны шнура. Поток заряженных частиц и тепла из плазмы вытекает тогда вдоль линий на приемные (диверторные) пластины — аналог диафрагмы. Магнитная конфигурация такого токамака принимает характерную форму, удлиненную по вертикали (рис.6), с диверторной камерой в нижней части шнура. Ее графитовую «канаву» хорошо видно на фотографии камеры JET.

Главное преимущество дивертора перед диафрагмой в том, что десорбируемые с диверторных пластин примеси

вынуждены преодолевать значительное расстояние, двигаясь против водородного потока, прежде чем достигнут горячей плазмы. В результате возникает дополнительное движение назад к пластине. Такая схема показала свою эффективность, она принята для ИТЭРа и действует на большинстве из современных токамаков. К сожалению, и она пока не дает гарантированного решения проблемы примесей. Уже сегодня для лучших режимов JET (бериллий)  $Z_{эф}$  оказывается около 2 (рис.5), для JT-60U (графит + бор) — около 3. Для ИТЭРа необходимо иметь 1.5–1.8 в почти стационарном режиме. Это, безусловно, проблема, которую мы должны решить по пути к зажиганию и стационарному горению.

И тем не менее данное препятствие, по-видимому, преодолимо. Во всяком случае, на фоне уже преодоленных. Предпринимая экскурсии в историю токамаков, автор пытался передать читателю одно из самых общих ощущений участников «токамачной» эпопеи — ощущение справедливости простой истины, что даже без особых гениальных озарений, а, как говорится, «методом проб и ошибок» упорным людям удается решать самые на первый взгляд головоломные задачи. Основное условие успеха — целенаправленная, согласованная работа достаточно большого числа участников и, конечно, время. В этом смысле проблемы управляемого синтеза ничем не отличаются, скажем, от проблем сверхзвуковой авиации с ее флаттером, звуковыми, тепловыми и прочими барьерами. Непреодолимые барьеры ставятся либо физикой, либо материалами. Со стороны физики сегодня не видно каких-либо непроходимых препятствий на пути к зажиганию, скорее напротив, для прошедших путь от миллисекундных времен удержания до 1 с, переход к 5 с не кажется чем-то эпохальным. Другое дело — материалы, например, их чрезвычайная проницаемость по отношению к тритию. Но эти проблемы возникнут после того, как реактор будет запущен.

Все сказанное — логика участника процесса. Но есть еще и логика наблюдающих со стороны — логика большинства. Ожидание многих утомило. Трудно было

предугадать заранее, что характерное время реализации токамака как реактора существенно превысит характерное время деловой активности одного человеческого поколения. Истории такой пассаж безразличен, но «деловые люди», похоже, почувствовали себя обманутыми — они надеялись, что все произойдет еще «при них». В итоге, сегодня, несмотря на все свои успехи, токамаки оказались в состоянии определенного психологического поражения.

#### ЧТО ЖДЕТ ТОКАМАКИ?

Завершение проекта ИТЭР и, главное, цифра предполагаемых затрат на его реализацию вызвали шумную волну критики и за рубежом, и у нас. В Штатах дело дошло до того, что Конгресс не продлил (т.е. реально приостановил) участие страны в проекте ИТЭР. Четверка учредителей превратилась в тройку. Рассказывают, что в пылу баталий один из влиятельных конгрессменов высказался примерно так: «Сколько я себя помню, они (токамачники) все время просили денег. Если давать им и дальше, деньги будут уходить, как уходили, — в черную дыру». Это очень откровенное мнение человека со стороны, уставшего ждать обещанного полубесплатного чуда, готового платить за сегодняшние киловатт-часы, но не за те, что будут через 20 лет. И он прав. В своей системе координат. Тут мы были бы бессильны, даже достигнув зажигания. Правы по-своему и те профессора, которые заявляют, что столь большие деньги, будучи разделены между теми или иными науками, могли бы принести пользу скорее. Автор и сам присоединился бы к ним, если бы речь шла о том, что деньги на будущую энергетику нужно отбирать у науки. По 200–300 млн долл. с каждой из четырех сторон за год! Но речь идет о тратах на энергетику, на ту отрасль, где расслачиваются человеческими жизнями (если верить газетам, 1000 т угля стоят жизни 2–4 горнякам). Эти траты следовало бы приравнять к расходам на оборону. Тем более что будучи произведены, они в значительной мере пошли бы на развитие высоких технологий, укрепляя тем самым инфраструктуру той же самой науки.

Да, говорят, так было бы, живи мы в тисках энергетического кризиса. Но сейчас, когда в США простаивают до 40% энергетических мощностей, а у нас и того больше, нелепо изводить себя мыслями о будущем дефиците. Нарастающий дефицит энергии предсказывают лишь после 2020 г. Да и то в Азии, Африке... Не следует ли прекратить форсировать именно токамаки? Остановить и подождать, пока с ними не сравняются стеллараторы или амбиполярные ловушки? А затем уже выбирать?

XXI век сулит нам вал экологических проблем<sup>16</sup>. Основная состоит в том, что развивающиеся страны, где сегодня проживает большинство населения Земли, должны будут перейти с первобытно-общинного уровня энергопотребления на современный. Сжигание соответствующей органики либо мощный старт энергетики деления резко обострят экологические и прочие проблемы, которые мир ощущает уже сегодня. Именно здесь может стать уместной менее опасная и экологически более «чистая» термоядерная энергетика. Но реальная ли?

Напомню, что следуя концепции Кау, на этот вопрос нужно дать ответ в ближайшие 25 лет, затратив примерно 20 млрд амер. долл. Сегодня у нас за спиной опыт развития малых, средних и больших токамаков. И вряд ли развитие других проектов УТС будет идти по другим законам. В своем последнем интервью журналистам, которое часто цитируют, Лев Андреевич Ардимович на вопрос: «Когда же будет термояд?» — ответил: «Как только он понадобится». Что бы это могло означать? Как только дадут деньги, тут и сделают? Не совсем так. Первый, наиболее ответственный этап работы — создание коллектива, команды, порядка тысячи человек, способной коррелированным образом (т.е. помогая, а не мешая друг другу) преодолевать препятствия. Это — самая тонкая, непредсказуемо сложная часть проекта. Тут трудно обойтись только деньгами. Для постороннего человека такой коллектив складывается как бы сам, в процессе решения все более сложных и

<sup>16</sup> Путвинский С.В. Возможна ли будущая мировая энергетическая система без ядерного синтеза? // Успехи физ. наук. 1998. Т.168. №11. С.1235.

сложных задач, как некий самовоспроизводящийся организм, для роста которого необходимы нарастающая сложность препятствий и время. Показатель его роста — достижения. Остановка для него — смерть с временем распада один-два года. Автору посчастливилось наблюдать вблизи согласованную работу команды первого DT токамака-реактора — TFTR. Это одно из самых ярких жизненных впечатлений — видеть результат согласной работы сотен электронных и механических систем, за каждой из которых — человек. Характерное время становления такой команды лет 10. Характерное время создания и пуска реактора тоже не менее 10 лет. Иными словами, от начала работ и до первых оценок коммерческой эффективности реактора пройдет при всех благоприятных условиях не менее четверти века. Правда, процесс можно ускорить, воспользовавшись уже сложившимися коллективами (на токамаках JET, JT60U) и результатами проекта ИТЭР. Но на то необходима решимость мирового сообщества, решимость сохранить и расширить с таким трудом завоеванный плацдарм. А оно сегодня обеспокоено отнюдь не энергетикой. Не исключено, правда, что Япония и Европейское сообщество создадут по собственному сверхтокамаку уменьшенного, по сравнению с ИТЭРом, размера. Пока принято решение продолжить совместные работы еще на два года с

целью снизить вдвое стоимость проекта. В таком случае отказ от строительства ИТЭРа не выглядел бы как поражение токамаков, скорее как маневр. Время покажет...

Несколько лет назад в Японии автору случилось оказаться поздним вечером в пультовой второго по величине токамака JT60U. Полубезлюдный зал, заставленный дисплеями, в углу, у доски, небольшая группа — человек тридцать — усталых молодых людей, видимо, инженеров и физиков. У доски кто-то из лидеров. Оперативка. Что-то не ладится — видно по лицам. Вошедших не замечают. Как же все у нас одинаково! Через день, два, а может, через месяц кто-то из них найдет решение, препятствие преодолет и снова пойдут дальше. Когда эта статья уже писалась, с JT60U было получено известие — достигнуто  $Q=1.25$ ! Токамаки продолжают движение. До конца века еще целый год.

Автор приносит благодарность своим товарищам по работе из Института ядерного синтеза (ИЯС РНЦ «Курчатовский институт»), ТРИНИТИ, объединенной команды ИТЭРа, и прежде всего В.Д.Шафранову, сделавшим по ходу статьи ряд ценных критических замечаний и дополнений. Некоторые из ее принципиальных положений неоднократно обсуждались автором с Борисом Борисовичем Кадомцевым. Летом 1998 г. Борис Борисович ушел от нас. Автор посвящает эту статью его памяти.

## КОРОТКО

Неукротимое любопытство горных попугаев Новой Зеландии — кеа (*Nestor notabilis*) — заставило администрацию национальных парков поставить щиты с предупреждениями о вполне вероятной агрессии со стороны этих птиц: они крайне энергично долбят клювами резину автомобильных дверей и покрышек, «дворники» ветровых стекол, сиденья, портят антенны салонных приемников... Зоолог Д.Даймонд (*D.Diamond*), исследующая био-

логию кеа, говорит, что они истребляют почти все, сопровождая этот процесс дикими играми и тщательным «изучением» объекта.

Кеа получили название убийц овец: известны случаи, когда попугай садится на спину овцы и выклевывает кусочки подкожного жира, что ведет к гибели животного.

Полагают, что некогда кеа стаями преследовали гигантских нелетающих птиц моа, выклеывая глубокие раны. Поэтому

этих попугаев считают виновниками исчезновения моа, во всяком случае, к 40-м годам XIX в., когда фермеры стали активно разводить овец, моа уже не встречались.

Защищая овец, фермеры стали охотиться на попугаев и к 1986 г. истребили до 150 тыс. «хищных кловов». Подобная статистика заставила взять под защиту уже кеа — сейчас их осталось около 3 тыс.

National Geographic. 1999. V.196. №2. P.135 (США).