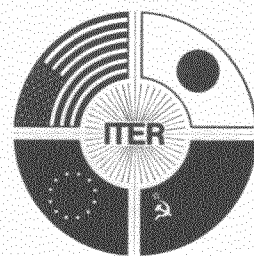


Управляемый термоядерный синтез: прогресс в реализации международного проекта под эгидой МАГАТЭ



*Научное сотрудничество в целях демонстрации
технических возможностей получения термоядерной
энергии продолжает развиваться*

У нас имеется только три альтернативных источника перспективного энергоснабжения: солнце, реакторы-размножители и термоядерный синтез". В своем кратком заявлении в 1989 г. д-р Хайнц Райзенхубер, федеральный министр Германии по научным исследованиям и технике, указал на необходимость стимулирования нынешнего международного сотрудничества в области развития термоядерной энергии.

В 1990 г. Международный совет по термоядерным исследованиям, консультативный орган МАГАТЭ, членами которого являются представители различных стран мира, провел переоценку современного состояния и перспектив успешного развития управляемого термоядерного синтеза. В отчет Совета было включено следующее заявление: „Благодаря современному опыту необходимость развития разнообразных и широко доступных долгосрочных источников энергии воспринимается все более и более остро. Получение энергии из этих источников должно быть не только технически возможным, но и приемлемым с точки зрения экономики, безопасности и охраны окружающей среды. Потенциально термоядерная энергия может стать одним из таких источников.

“ Развитие нового источника энергии, например, управляемого термоядерного синтеза, представляет собой сложнейшую научную и технологическую проблему, решение которой охватывает жизнь нескольких

поколений. Однако уже сейчас достигнуты впечатляющие результаты с точки зрения масштабов и непрерывности прогресса в создании термоядерного реактора, причем эта работа продолжает успешно продвигаться вперед. Природные запасы первичного топлива для дейтерий-тритиевых термоядерных реакторов (дейтерий и литий) настолько огромны, что практически дейтерий-тритиевый термоядерный синтез является неисчерпаемым источником энергии, способным удовлетворять глобальные энергетические потребности”.

В настоящее время реализуются два основных подхода к мирному использованию термоядерной энергии. Обычно их называют „магнитным удержанием” и „инерционным удержанием”. (См. тексты в рамках.)

Несмотря на проявляемый в последнее время интерес к возможности международного обмена информацией по инерционному удержанию плазмы, это направление в основном поддерживают Соединенные Штаты. В то же время в области магнитного удержания плазмы многие страны ведут научные исследования уже в течение многих лет, а общие годовые ассигнования на них приближаются к двум миллиардам долларов США. Основные усилия предпринимаются в рамках четырех крупных программ, реализуемых в Европейском Сообществе (ЕС), Японии, СССР и Соединенных Штатах. Несколько других стран оказывают поддержку менее масштабным, но тем не менее значительным программам научных исследований.

В течение свыше 30 лет для научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием

Давид Бэннер
и
Пауль Хаубенрах

Г-н Бэннер возглавляет Секцию физики Отдела физических и химических наук МАГАТЭ, а г-н Хаубенрах – бывший секретарь Совета ITER.

Внутренний вид токамака Объединенный Европейский Тор (JET), на котором проводится крупнейший в мире эксперимент по магнитному удержанию плазмы. Во время эксперимента в камере токамака создается водородная плазма, удерживаемая с помощью магнитного поля в условиях, необходимых для термоядерного синтеза, включая температуры, которые приближаются к 100 000 000 °С.

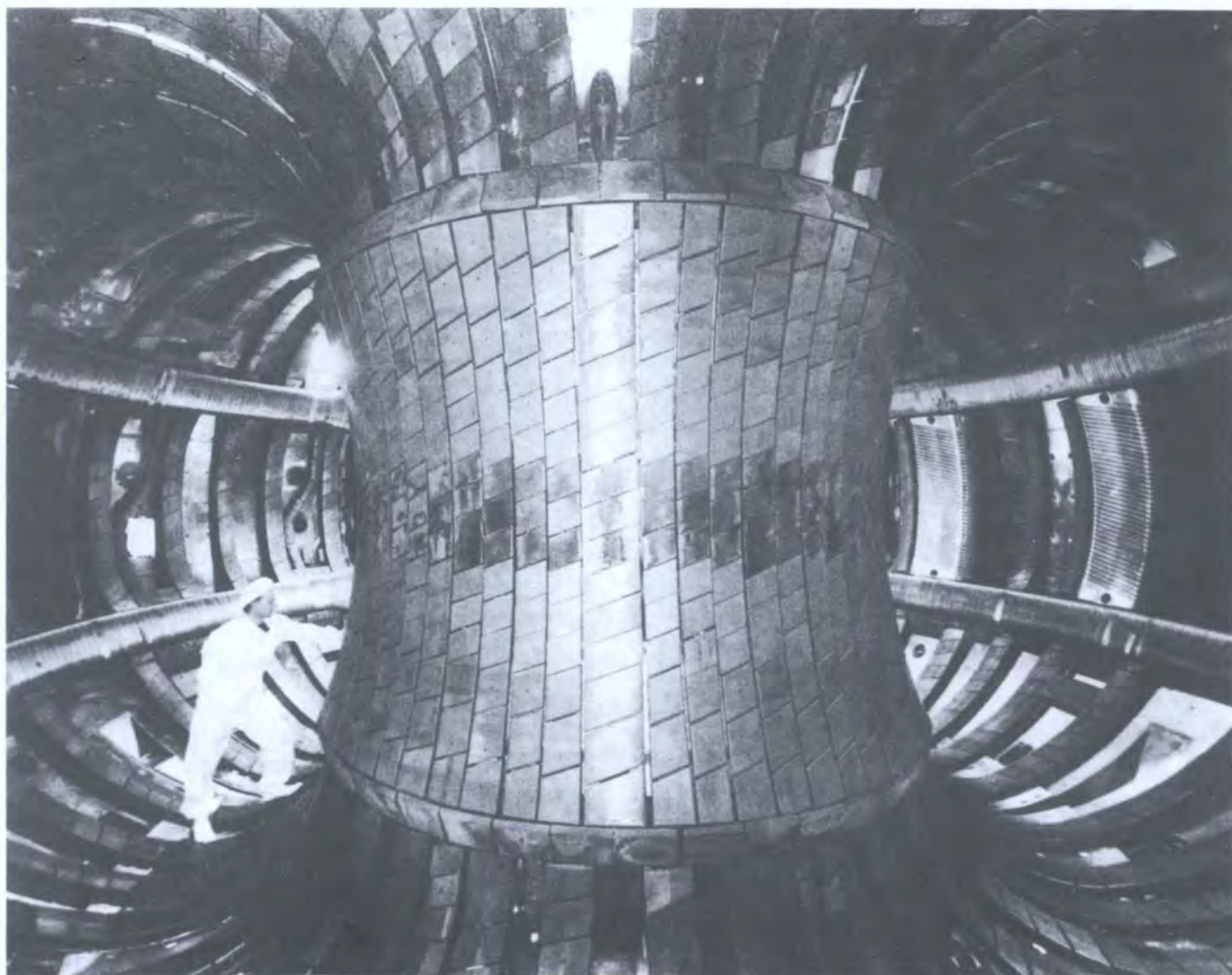
нием плазмы характерен чрезвычайно высокий уровень международного сотрудничества. МАГАТЭ с самого начала оказывает активную поддержку широкому международному обмену научной информацией по управляемому термоядерному синтезу. С 1987 г оно принимает активное участие в более конкретном широкомасштабном международном сотрудничестве в рамках проекта Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER).

Проект ITER: Международный термоядерный экспериментальный реактор

Примерно в 1986 г. прогресс в реализации каждой из четырех основных программ термоядерных исследований достиг точки, когда следующим логическим шагом стало строительство установки, которая объединила бы в себе технологии термоядерных реакторов, достаточно больших и мощных для осуществления „поджига” и „управля-

емого горения” термоядерного топлива. Всем заинтересованным сторонам было ясно, что на следующем этапе для строительства и эксплуатации реактора потребуются огромные ресурсы как технического персонала, так и финансовые. Учитывая огромный стимул для достижения дальнейшего прогресса в этой области, руководители правительств, оказывающих поддержку развитию термоядерной энергии, начали призывать к расширению сотрудничества в области термоядерных исследований.

В ответ на эти призывы Генеральный директор МАГАТЭ пригласил представителей четырех стран, осуществляющих крупные термоядерные программы, принять участие в течение 1987 г. в серии встреч в Вене, на которых они выработали детальную схему 3-летней совместной работы Группы по разработке эскизного проекта (СДА) Международного термоядерного экспериментального реактора. Цель создания группы заключалась в осуществлении первого конкретного шага по строительству установки, которая будет отвечать потребностям



всех четырех программ. Группа единогласно выбрала техническую концепцию „токамака” с магнитным удержанием плазмы, которая первоначально была разработана в СССР, а в последующем получила дальнейшее развитие и стала более сложной во многих странах мира. После этого Генеральный директор призвал всех заинтересованных Участников к сотрудничеству в рамках CDA под эгидой МАГАТЭ в соответствии с выработанными Полномочиями. Четыре Участника приняли приглашение и взяли на себя обязательства предпринять усилия, необходимые для разработки эскизного проекта, составления сметы расходов и определения требований к площадке до конца 1990 г.

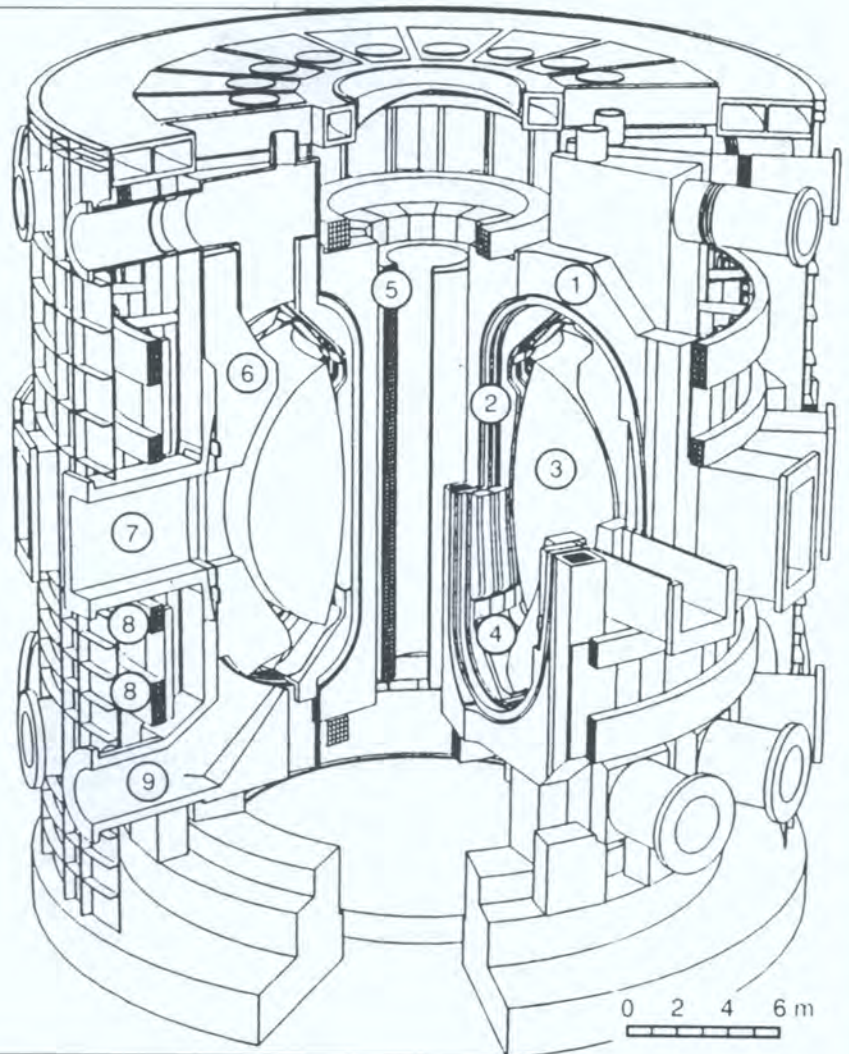
Совместная проектная работа началась в апреле 1988 г. и была успешно завершена в декабре 1990 г. Частично она выполнялась в странах-участницах и частично на площадке, предоставленной Европейским Сообществом в Гархинге под Мюнхеном. Во время совместной работы, длившейся около шести месяцев в каждом году, свыше 50 ученых и инженеров проживали на сов-

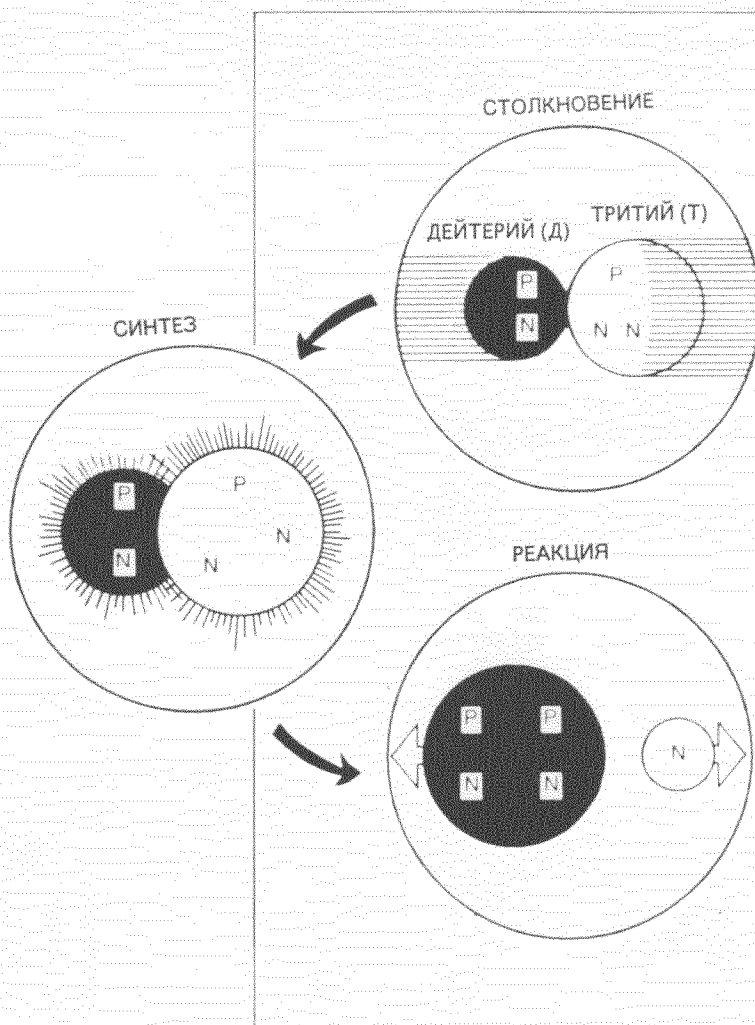
местной площадке, а еще большее число продолжало работу у себя дома. Комплексная организация совместной работы стимулировала тесное сотрудничество ученых и инженеров, представляющих четырех Участников. Общее руководство деятельностью в рамках проектов ITER осуществлял Совет ITER, в котором каждый Участник имел двух представителей.

Несмотря на то, что все четыре программы имели аналогичные цели создания экспериментального реактора и полностью совпадали с точки зрения общего технического подхода на начальном этапе реализации проекта ITER, они имели расхождения в конкретных эскизных проектах, разработанных каждым из Участников. Таким образом, совсем немалым результатом совместной работы стало достигнутое в короткие сроки взаимопонимание и устранение этих расхождений. К концу 1988 г. Участники проекта ITER достигли соглашения относительно выбора параметров и эскизных проектов установки, магнитов, материалов и организации технического обслуживания.

Основные элементы токамака ITER:

- 1 – обмотка тороидального поля;
- 2 – вакуумная камера;
- 3 – плазма;
- 4 – дивертор;
- 5 – центральный соленоид;
- 6 – бланкет и защита;
- 7 – люк горизонтального канала;
- 8 – обмотки полоидального поля;
- 9 – вакуум-провод.





Термоядерный синтез

Термоядерный синтез и его эффекты носят всеобъемлющий характер. Данный процесс дает энергию звездам. Он является источником солнечной энергии, которая согревает Землю. Ядерный синтез – это результат столкновений ядер некоторых легких атомов, движущихся с огромной скоростью. В итоге получается одно новое ядро и высвобождается огромная энергия. Легче всего осуществить синтез дейтерия (D) и трития (T), которые являются изотопами водорода, поэтому наиболее вероятно, что он станет основным процессом по крайней мере в первых термоядерных энергетических реакторах. Скорости столкновения ядер D и T должны соответствовать тепловому движению при температурах порядка 100 млн. °C. Составное ядро незамедлительно испускает нейтрон, и образуется стабильное ядро гелия, идентичное ядрам природного гелия. Высвобожденная в этом процессе энергия первоначально представляет собой кинетическую энергию нейтрона и ядра гелия (называемого альфа-частицей), с большой скоростью разлетающихся в разные стороны.

В результате синтеза одного грамма D-T смеси высвобождается энергия, эквивалентная энергии, получаемой при сжигании 10 000 л бензина, однако при этом не выделяется никаких ядовитых газов.

В процессе проектирования Участники осуществляли вспомогательные широко-масштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). Каждый из них ежегодно затрачивал на технологические НИОКР около 10 млн. долл. США в дополнение к расходам, связанным с проведением физических экспериментов по удержанию плазмы, которые включали в себя решение многих задач, конкретно предусмотренных для проекта ITER. Результаты реализации проекта ITER были проанализированы и приняты в качестве основы для разработки надежной конструкции.

К концу 1990 г. совместная группа специалистов четырех Участников проекта создала эскизный проект всей установки и представила четкую картину возможного строительства и эксплуатации ITER. Она включала в себя описание требований к строительной площадке и предлагаемый план реализации проекта. Этот план содержит описание физических и технологических задач НИОКР, решаемых в рамках национальных программ, которые потребуются для детальной разработки проекта.

Кроме того, Участники проекта ITER разработали возможный календарный план и предварительную смету расходов на строительство и эксплуатацию реактора.

После завершения работы в рамках CDA ее результаты были тщательно проанализированы как совместно, так и на заседаниях специальных групп специалистов каждого из Участников. Во всех обзорах сделан одинаковый вывод: полученные результаты являются хорошей технической основой для следующего логического этапа проекта ITER.

По предварительным расчетам, сделанным группой ITER во время разработки эскизного проекта, на строительство ITER потребуется 7 лет и порядка 4,9 млрд. долл. США капиталовложений, которые должны быть разделены между участниками. До начала строительства ITER потребуется 6 лет на разработку технического проекта (EDA), который включает в себя детальную технологическую проработку, дальнейшую разработку компонентов и оценку предлагаемых строительных площадок.

Предполагаемые Участники EDA разработали логическую схему организации ра-

Инициирование термоядерной реакции и удержание плазмы

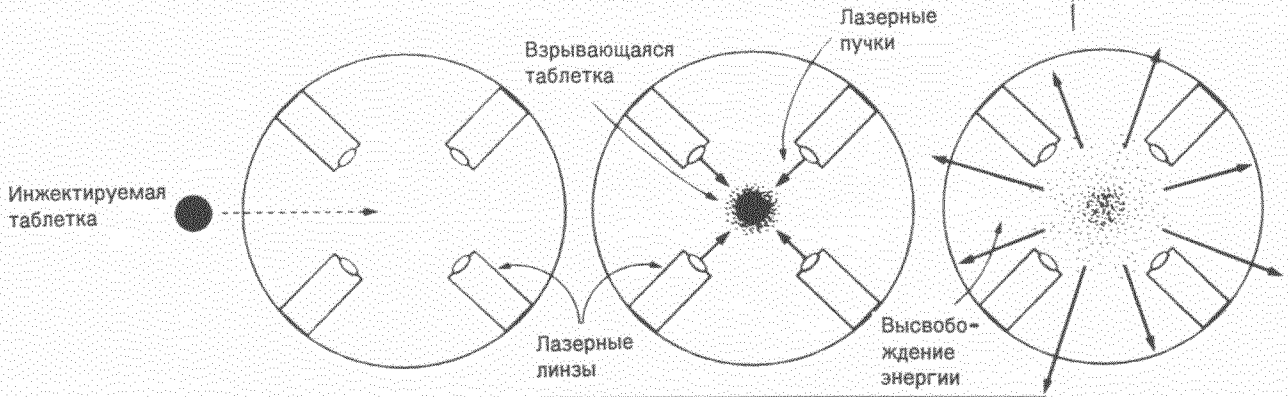
По концепции магнитного удержания плазмы топливо, которое первоначально находится в форме разреженного холодного газа, нагревается с помощью целого ряда средств до состояния плазмы. „Четвертое состояние вещества“ достигается, когда интенсивное тепловое движение атомных частиц приводит к разделению ядер и электронов.

В силу того, что любая частица плазмы несет электрический заряд, она при прохождении магнитного поля подвергается воздействию магнитных сил. Задача магнитного удержания заключается в создании такой конфигурации магнитных полей, которая заставит большинство заряженных частиц двигаться по искривленным траекториям, чтобы не вступать во взаимодействие со стенками камеры, в которой образуется плазма. Нагрев плазмы должен продолжаться до тех пор, пока тепловое движение частиц не достигнет диапазона скоростей, при которых в результате их столкновения происходит термоядерный синтез.

Научное понимание проблемы достигло такой высокой степени, которая позволяет определять методы нагрева и эффективность удержания плазмы, необходимые для практической термоядерной энергетики. На эффективность удержания в основном можно

влиять путем создания большой плазменной камеры и сильных магнитных полей.

Основной принцип инерционного удержания плазмы заключается в исключительно быстром нагреве термоядерного топлива, приводящем к возникновению активных термоядерных реакций с выделением энергии до того, как силы, действующие на атомные и элементарные частицы, заставят участвующую в реакции массу разлететься на части. Данный подход к решению проблемы возможного практического применения этого метода на термоядерных электростанциях предполагает инъекцию небольшой топливной таблетки замороженного водорода в камеру, где она подвергается резкому воздействию лазерного импульса, сфокусированного на таблетке с нескольких направлений. (См. рисунок.) В результате быстрого нагрева поверхности таблетки образуется имплозивная ударная волна, которая нагревает и уплотняет центр таблетки до параметров термоядерного синтеза. За ничтожные доли секунды до взрыва таблетки производится термоядерная энергия. Для использования этого метода в качестве источника энергии требуется целая серия таких актов, следующих один за другим через небольшие интервалы времени.



бот, которая позволит равномерно распределить расходы и усилия. По их расчетам, на проектную работу придется затратить около 250 млн. долл. США и 750 млн. долл. на прямую поддержку инженерных и технологических НИОКР. Половину проектных работ будет непрерывно в течение года выполнять на совместной площадке Центральная группа, состоящая из 180 ученых и инженеров, представляющих всех Участников, которым будут оказывать поддержку местные специалисты. Конкретные проектные задачи будут выполняться в лабораториях и промышленных фирмах, расположенных на территории государств четырех Участников. Программы физических исследований, осуществляемые четырьмя

Участниками и другими странами, будут продолжены для получения информации, подтверждающей конструкцию ITER и необходимой для планирования его экспериментальной программы.

Все задачи технологических НИОКР, конкретно связанные с проектом ITER, будут решаться одним или несколькими Участниками на площадках, расположенных на территории соответствующих государств. Руководство проектом будет осуществлять директор и штат его сотрудников за счет общего фонда. В силу того, что четыре Участника рассматривают проект ITER не только как демонстрацию технических возможностей получения термоядерной энергии, но и как демонстрацию его

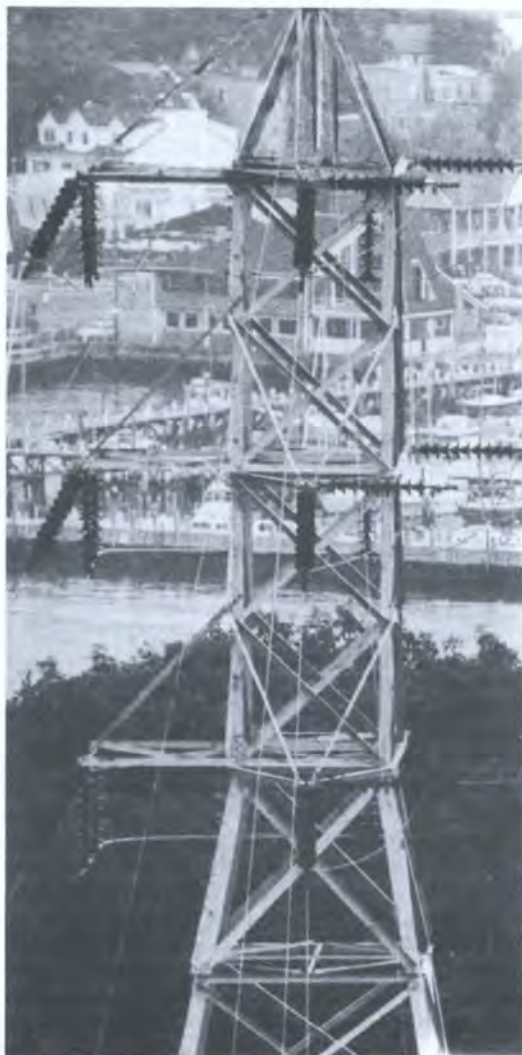
преимуществ с точки зрения безопасности и охраны окружающей среды, в основе руководящих принципов разработки технического проекта по-прежнему будут находиться аспекты безопасности и охраны окружающей среды.

Результаты разработки эскизного проекта позволили не только вселить уверенность в техническое сообщество, но и убедить правительства в желательности продолжения проекта ITER, учитывая огромную потенциальную отдачу в случае успешной разработки источника термоядерной энергии. Несмотря на то, что международное сотрудничество может столкнуться с рядом трудностей, Участники признали, что такие совместные усилия открывают выгодные перспективы благодаря объединению и совместному использованию скудных научных и технологических ресурсов, а также благодаря разделению расходов на приоритетное развитие перспективного источника энергии.

После того, как в ходе предварительных обсуждений была выявлена высокая схожесть мнений Участников проекта ITER относительно возможной организации со-

трудничества по разработке технического проекта ITER, правительства всех Участников санкционировали проведение официальных переговоров. Генеральный директор МАГАТЭ пригласил Участников встретиться в Вене для проведения таких переговоров и заверил их в готовности Агентства предоставить свои услуги в создании (и оказании поддержки) предусмотренной проектом Центральной группы по разработке технического проекта. Первые переговоры были проведены в Венском международном центре с 11 по 12 февраля 1991 г.

Типичную точку зрения Участников высказал министр энергетики США, который в отношении переговоров по достижению соглашения о разработке технического проекта ITER сказал следующее: „Вполне уместно, что мы в качестве международных партнеров по проведению научных исследований продолжаем наше сотрудничество по совместному проектированию реактора, который может продемонстрировать технические возможности производства термоядерной энергии как нового источника энергии. Наука и налогоплательщики уже



Термоядерная энергетика с точки зрения безопасности и охраны окружающей среды

Термоядерный реактор чем-то напоминает газовую плиту: если выключить газ, „пламя“ (термоядерная реакция) немедленно погаснет. Полностью отсутствует вероятность „убегающей“ реакции или крупного ущерба в результате неуправляемой термоядерной реакции.

Первичные частицы, получаемые в процессе термоядерных реакций, не радиоактивны. В результате неизбежной абсорбции термоядерных нейтронов конструкционными или другими материалами получают радиоактивные нуклиды, однако последние не являются мобильными, а время их жизни — слишком длительным, что облегчает их удержание и захоронение. „Остаточное тепловыделение“ за счет радиоактивного распада после прекращения реакции носит относительно мягкий характер и легко поддается контролю с помощью простых и надежных систем.

Один из компонентов термоядерного топлива, а именно тритий, является радиоактивным, поэтому при проектировании и эксплуатации установки нужно принять меры предосторожности в целях предупреждения распространения радиоактивности. Подобные меры хорошо известны и доказали свою эффективность и практичность.

Анализ эскизного проекта ITER показал, что это: термоядерный реактор может отвечать всем требованиям существующих нормативов, регулирующих безопасность и охрану окружающей среды.

получили выгоду от совместных исследований, которые велись буквально круглосуточно во всех уголках земного шара”.

Три Участника предложили разместить у себя в стране группу по разработке технического проекта: ЕС – на площадке в Гархинге в Германии, где проводилась работа по разработке эскизного проекта; Япония – в исследовательском центре Нака; и Соединенные Штаты – в университете и центре термоядерных исследований в Сан-Диего. Каждый из Участников предложил предоставить здания, позволяющие разместить 180 ученых и инженеров и 120 человек вспомогательного персонала вместе с компьютерной техникой, которая будет использоваться в процессе проектирования. Системы связи будут содействовать эффективному сотрудничеству Центральной группы и рабочих ITER в государствах-участниках.

Решения относительно выбора площадки для проведения работ по разработке технического проекта, а также набора ключевого персонала будут приняты во время переговоров. Принимая во внимание прогресс, достигнутый на ранних этапах, Участники ожидают, что при отсутствии непредвиденных трудностей соглашение будет достигнуто в середине 1991 г.

Потенциал термоядерного синтеза

В природе имеются практически неисчерпаемые запасы топлива, которое можно использовать для получения термоядерной энергии. Благодаря научным исследованиям, проводившимся в течение десятилетий в различных лабораториях мира, удалось успешно определить физические параметры получения и управления термоядерным синтезом. Данный процесс производства энергии аналогичен процессу производства тепла на солнце и звездах. Таким образом, можно сказать, что конечная цель термоядерного синтеза заключается в создании и сохранении „миниатюрного солнца”, энергию которого необходимо обуздать для производства электричества.

Более того, с точки зрения безопасности и охраны окружающей среды термоядерная энергетика обещает быть вполне приемлемой для общества. Если практически удастся построить, эксплуатировать и осуществлять техническое обслуживание требуемого оборудования, что участники проекта ITER считают вполне возможным, термоядерный синтез может сыграть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей мира в следующем веке.