

# Проект ИТЭР: международный термоядерный экспериментальный реактор

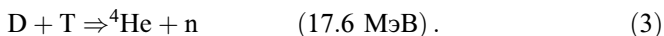
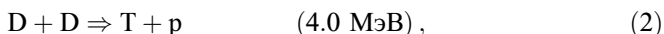
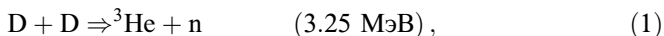
М. П. Петров

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Получение управляемого термоядерного синтеза (УТС) в лабораторных условиях, способное обеспечить человечество неиссякаемой и экологически чистой энергией, вылилось в сложнейшую научно-техническую проблему, может быть, самую сложную в истории науки и техники. Для создания термоядерного реактора потребовалось одновременное решение большого комплекса сложнейших технических и технологических задач. К концу 80-х годов весь этот комплекс проблем был обозначен, часть проблем уже была близка к завершению, многочисленные эксперименты на установках типа токамак [1, 2] позволили сделать вывод, что физическая осуществимость УТС не вызывает сомнений. На повестку дня встала техническая и экономическая необходимость проверки работоспособности реактора. В ведущих странах — США, ЕС, Японии и России — велось независимое проектирование реакторатокамака. В процессе работ российские и зарубежные ученые пришли к выводу, что проектирование и создание первого реактора-токамака целесообразнее и дешевле вести вместе, максимально используя имеющиеся наработки каждой из стран-участниц. В то время это было важно и с политической точки зрения, так как открывало возможности для масштабного мирного международного сотрудничества стран, находившихся ранее в состоянии «холодной» войны. Было предложено назвать новую установку International Thermonuclear Experimental Reactor — ITER. Аббревиатура ITER (произносимая как ИТЭР) по латыни означает «путь». В начале проекта международная рабочая группа состояла из представителей ЕС, СССР, США и Японии. В настоящее время проект включает семь партнеров: Евросоюз, Индию, КНР, Корею, Россию, США, Японию. К концу 2005 года проектирование завершено, все готово к сооружению ИТЭРа. Начало его активной работы ожидается в 2016 году. Принято решение соорудить ИТЭР в ядерном центре Кадараш на юге Франции. Общая стоимость проектирования и сооружения ИТЭРа оценивается в 6–8 млрд. долларов. Главная цель создания ИТЭР — демонстрация научной и технической осуществимости получения энергии термоядерного синтеза, получения управляемого поджига и длительного горения дейтериево-тритиевой плазмы с положительным выходом энергии. ИТЭР это решающий шаг от современных исследований по управляемому термоядерному синтезу к термоядерной электростанции будущего. Проект представляет из себя большой

токамак (плазменный тороид в магнитном поле) с малым радиусом 2.2 м, большим радиусом 6 м, со сверхпроводящими катушками тороидального поля (5 Тесла на оси тороида), с системами нагрева плазмы пучками атомов дейтерия и высокочастотными излучениями общей мощностью в 70 МВт. ИТЭР будет работать при температуре плазмы более 100 млн град С и производить 500 МВт термоядерной мощности при вложенной мощности 40 МВт.

Важнейшие реакции ядерного синтеза, используемые в водородной бомбе для взрыва и в лабораториях для получения управляемого термоядерного синтеза, выглядят так:



В ИТЭРе будет использоваться реакция (3) в дейтерий-тритиевой плазме. Эта реакция осуществляется при наиболее низкой температуре плазмы — около 100 млн.град (10 кэВ). При этом воспроизводство трития, которого нет в природе, будет осуществляться за счет реакции ( $n + {}^6\text{Li} \Rightarrow {}^4\text{He} + T$ ) и происходить вне плазмы в оболочке (бланкете), содержащем литий.

Опыт работ на токамаках и теоретический анализ показывают, что осуществление термоядерной реакции (3) с положительным выходом энергии в ИТЭРе возможно при концентрации плазмы  $10^{20}$  1/м<sup>3</sup>, температуре 10 кэВ и времени удержания энергии в плазме 3–5 с. Законы подобия позволяют ожидать, что получение этих параметров в ИТЭРе вполне возможно [3–5].

Проект ИТЭР — это уникальный пример международного сотрудничества, выходящий за рамки проблемы УТС. В результате работы над проектом для первого экспериментального реактора создана достаточная физическая и инженерная база и отработаны основные технологии. ИТЭР — это самый быстрый путь для изучения термоядерного горения плазмы в ближайшем будущем. Для перехода к следующему логическому шагу — проекту ДЕМО (демонстрационному реактору с преобразованием термоядерной энергии в электрическую) требуется активное продолжение физических исследований и разработка новых диагностик и материалов.

Отделение физики плазмы ФТИ им. Иоффе РАН принимает активное участие в работах по проекту ИТЭР. В ФТИ проводятся работы по созданию систем диагностики плазмы ИТЭРа. Диагностическая система ИТЭРа включает в себя около 50-ти систем, из которых 10–15 имеют первостепенное значение для формирования режима ИТЭРа и исследований плазмы в состоянии термоядерного горения [6]. В ФТИ создаются три таких системы. Это,

во-первых, анализаторы нейтральных атомов, испускаемых плазмой, которые позволят измерять соотношение дейтерия и трития в плазме, что необходимо для оптимизации термоядерного горения [7]. Во-вторых, это аппаратура томсоновского рассеяния света лазера на электронах плазмы в диверторе ИТЭРа, позволяющая измерять температуру и плотность плазмы в диверторе [8]. В-третьих это аппаратура для измерения спектральных гамма-линий при ядерных реакциях в плазме ИТЭРа, позволяющая изучать поведение термоядерных альфа-частиц [9].

Кроме работ по диагностике плазмы для ИТЭРа в лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ ведутся работы в поддержку ИТЭРа по инжекции топлива в плазму и пучковому нагреву (токамак ГЛОБУС-М), а также по исследованию электрических полей в плазме и их влиянию на удержание плазмы (токамак ТУМАН-3М).

## Литература

- [1] L. A. Artsimovich, *Nuclear Fusion*, **12**, 212 (1972).
- [2] H. P. Furth, *Nuclear Fusion* **15**, 457 (1975).
- [3] ITER Physic Basis, Chapter 5, Section 4, *Nuclear Fusion* **39**, 2478 (1999).
- [4] M. N. Rosenbluth, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **41**, A99 (1999).
- [5] D. R. Sweetman, *Nucl. Fus.* **13**, 157 (1973).
- [6] A. E. Costley, in *Advanced diagnostics for next step burning plasma experiments for magnetic and inertial fusion*, edited by P. E. Stott, (Plenum Press, New York 2002), 1–10.
- [7] A. I. Kislyakov, M. P. Petrov and E. V. Suvorkin. *Plasma Phys. Control Fusion* **43**, 1775 (2001).
- [8] M. M. Kochergin, E. E. Mukhin, G. T. Razdobarin *et al.*, *Plasma Devices and Operations*, **11**, Issue 1, 1–6 (2003).
- [9] V. G. Kiptily *et al.*, *Nuclear Fusion*, **45**, L21 (2005).