ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:   
ОТ ИТЭР К ЭКСПЕРИМЕНТАМ СЛЕДУЮЩЕГО ШАГА

1Красильников А.В., 2Коновалов С.В.

1Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,   
 [a.krasilnikov@iterrf.ru](mailto:a.krasilnikov@iterrf.ru)  
2НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, [konovalov\_sv@nrcki.ru](mailto:konovalov_sv@nrcki.ru)

Концепция Токамак (**ТО**роидальная **КА**мера **МА**гнитная **К**атушка) была предложена советскими учёными И.Е. Таммом и А.Д. Сахаровым. Первые исследования на токамаках были проведены под руководством Л.А. Арцимовича в ИАЭ им И.В. Курчатова (1951 – 1973). В 1972 Л.Д. Арцимович и В.Д. Шафранов предложили концепцию вытянутого токамака с полоидальным дивертором. Первые сверхпроводящие токамаки Т-7 (NbTi) и Т-15 (Nb3Sn) были также созданы в ИАЭ им И.В. Курчатова. В 1985 году Е.П. Велихов предложил проект ИТЭР, сооружение которого в настоящее время ведётся полными темпами семью партнёрами.

На стадии промышленного изготовления находятся многие системы ИТЭР, и прежде всего вакуумная камера и сверхпроводящая электромагнитная система (ЭМС) (полоидальные катушки из NbTi, тороидальные катушки и центральный соленоид из Nb3Sn, токовводы из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). В ЭМС термоядерных установок на «следующем (после ИТЭР) шаге» партнёры наряду с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП) Nb3Sn и NbTi планируют использовать REBCO ВТСП (DEMO (EC), Helical Fusion Reactor (Япония) и ARC (США)). Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из Ве и W, соответственно. Однако в проектах дивертора «следующего шага» активно рассматриваются продвинутые магнитные топологии и жидкий литий. Соответствующие исследования ведутся на современных токамаках и запланированы в ближайших экспериментах на Т-15МД, NSTX, DDT и других.

В качестве систем дополнительного нагрева для ИТЭР создаются гиротроны (170 ГГц, 20 МВт), антенны ионного циклотронного нагрева (40 – 55 МГц, 20 МВт) и инжекторы атомов с газовой мишенью обдирки (0,7 – 1 МэВ, 33 МВт). Для экспериментов «следующего шага» начаты разработки гиротронов с частотой ~230 МГц, антенн бегущей волны, обеспечивающих внеосевую генерацию тока с использованием геликонов с частотой ~600 МГц и инжекторов атомов с оптической и плазменной мишенью обдирки.

Более 30 методов и комплексов аппаратуры диагностики плазмы создаются и будут применены и усовершенствованы в процессе исследований на ИТЭР. Многие из созданных методов, и особенно те, что продемонстрируют длительную работоспособность в радиационных потоках, будут в дальнейшем использованы на термоядерном реакторе. Это же в полной мере относится к роботизированным системам и системам управления плазменным разрядом (управление профилями параметров плазмы, система предотвращения срывов и другие) и дистанционного участия в экспериментах.

Несколько концепций экспериментальных модулей бридерного бланкета будут исследованы и отработаны на ИТЭР. Однако, в ряде стран в качестве «следующего шага» рассматривается возможность создания гибридного «синтез-деление» реактора, и в этой связи ведутся разработки бланкета, содержащего модули с делящимися материалами, которые должны будут обеспечить решение таких проблем ядерной энергетики как наработка топлива и трансмутация минорных актинидов.