Последние достижения Европейской программы исследований в области термоядерного синтеза на пути к реализации термоядерного реактора

Онгена Дж.

Лаборатория физики плазмы, Королевская Военная Академия, г. Брюссель, Бельгия

На токамаке JET идет подготовка к экспериментам с D-T плазмой, в ходе которых планируется получить выделение 15 МВт термоядерной мощности в течение 5 сек и продемонстрировать эффекты, связанные с наличием в плазме альфа-частиц. Эта подготовка началась еще в 2016 г, когда в экспериментах с дейтериевой плазмой было получено существенное увеличение нейтронного выхода за счет увеличения ионной и электронной температур плазмы, а также со стабилизации ионной температурно-градиентной дрейфовой турбулентности (ITG). Учет при моделировании изотопных и нелинейных эффектов, например, стабилизации турбулентности при наличии быстрых ионов в плазме, является необходимым для объяснения текущих результатов и подготовки к будущим экспериментам. Экстраполяция результатов экспериментов с дейтериевой плазмой на JET показывает, что при использовании максимальной доступной мощности нагрева (*P*NBI = 32 МВт, *P*ICRH = 8 МВт) в D-T экспериментах может быть достигнута мощность термоядерного синтеза порядка 12-15 МВт. Кроме того, планируется демонстрация электронного нагрева центра плазмы альфа-частицами (~ 2-3 МВт). Расчеты показывают, что его уровень будет сопоставим с электронным нагревом плазмы от NBI. Новый метод ионного циклотронного нагрева (ИЦН) плазмы, основанный на наличии в плазме трех различных разновидностей ионов, является перспективным для оптимизации экспериментов с D-T плазмой, так как дает возможность ускорить D-NBI или T-NBI ионы с помощью ИЦН до тех энергий, при которых сечение D-T термоядерной реакции имеет максимум. ИЦН также играет большую роль в экспериментах на JET, поскольку позволяет контролировать уровень тяжелых примесей в центре плазмы.

Влияние изотопных эффектов на энергетическое время жизни плазмы **E изучалось в ходе недавних кампаний на JET. Эксперименты в режиме Н-моды при наличии ELMs выявили более сильную зависимость **E от изотопной массы основных ионов****E ∝ *A*0.4), чем предсказанная обычно используемым скейлингом ITER IPB98(y,2) (**E ∝ *A*0.19). Анализ данных, полученных на JET, показывает, что возникновение этого различия связано со свойствами пьедестала плазмы.

Эксперименты с плазмой на стеллараторе Wendelstein 7-X начались в 2015-2016 гг. с использованием лимитерной конфигурации. В ходе кампании 2017-2018 гг. использовался неохлаждаемый островной дивертор, что позволило повысить энергию, вводимую в плазму с 4 МДж до 80 МДж. Система нагрева плазмы с помощью инжекции нейтральных частиц (NBI) была введена в эксплуатацию в 2018 г. Рекордное значение тройного произведения температуры, плотности и времени удержания (6.5×1019 кэВ м-3 сек) для стеллараторов было получено в нестационарных условиях во время фазы разряда по окончании инжекции пеллет.

Работа над проектом сверхпроводящего токамака JT-60SA (*R* = 2.96 м, *a* = 1.18 м) была начата в 2007 г. в рамках соглашения по развитию термоядерной энергетики между Европейским Союзом и Японией. Данный токамак спроектирован для работы с дейтериевой плазмой с максимальным током плазмы *I*p = 5.5МА и центральным магнитным полем *B* = 2.25T. В качестве основных приоритетов будущих исследований выбраны возможность варьировать форму плазмы и демонстрация плазменных разрядов длительностью 100 сек с использованием систем нагрева с суммарной мощностью  41МВт. Началась завершающая стадия монтажа установки; ввод в эксплуатацию JT-60SA и демонстрация первой плазмы ожидаются в 2020 г.