ОБЗОР НОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЕВРОПЕ, ДОСТИГНУТЫХ НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ ITER И DEMO

Дж. Онгена

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

Достижение режимов улучшенного удержания при высокой плотности плазмы необходимо для осуществления одной из основных целей создания установки ITER: демонстрации сценария работы с плазмой с *Q* = 10 (*H*98= 1, *β*N= 1,8, *n*e/*n*GW= 0,85). Как показали результаты экспериментальных исследований в 2012 – 2014 г., установка новой ITER-подобной стенки (JET-ILW) на томакаке JET привела к 10– 30% ухудшению удержания плазмы по сравнению с аналогичными разрядами с углеродной стенкой. Данный эффект вызван высоким уровнем напуска газа, необходимым для поддержания приемлемого уровня вольфрама в центре плазмы. Анализ результатов экспериментов с JET-ILW показал, что ухудшение удержания плазмы связано с ухудшением свойств пьедестала плазмы. Последующие результаты показали, что ключевыми факторами, которые позволяют улучшить удержание плазмы в экспериментах с JET-ILW, являются оптимизация магнитной конфигурации в области дивертора и использование плазмы с высокой треугольностью δav = 0.39.

В 2015 - 2016 г. на токамаках JET и Alcator C-Mod был успешно опробован новый метод высокочастотного нагрева плазмы в диапазоне ионных циклотронных частот. При данном методе нагрева необходимо наличие в плазме по крайней мере трех различных сортов ионов. При определенных условиях это позволяет добиться эффективного поглощения ВЧ волн при очень низкой концентрации резонансных ионов. Эксперименты на JET убедительно продемонстрировали эффективность нагрева водород — дейтериевой плазмы при использовании очень низкой концентрации ионов 3He (~0.2%). Сценарий ВЧ нагрева с тремя сортами ионов D-(3He)-H также позволил создать значительную популяцию быстрых ионов 3He с энергиями порядка нескольких МэВ. Новые сценарии нагрева при наличии трех сортов ионов в плазме открывают дополнительные возможности для использования ВЧ систем нагрева плазмы в термоядерных установках. Например, для токамаков JET и ITER данный метод позволяет использовать примесные ионы 9Ве для нагрева дейтерий-тритиевой плазмы.

Ввод в эксплуатацию и тестирование различных систем стелларатора W7‑X оказались очень успешными. Это позволило посвятить значительную часть первой экспериментальной кампании OP1.1 физическим исследованиям. Пробой плазмы легко осуществлялся с помощью системы ЭЦР нагрева плазмы при доступных уровнях мощности. Подготовка плазменной стенки с помощью ЭЦРН и тлеющего разряда позволила увеличить длительность плазменных разрядов до значений, позволяющих достичь максимального уровня вводимой энергии 4 МДж, приемлемого для первой стенки. Плазменные разряды во время кампании OP1.1 были осуществлены при сравнительно низкой плотности плазмы (значительно ниже, чем 1020 м−3). На стеллараторе W7‑X была получена электронная температура в центре плазмы до ~10 кэВ, что примерно в 5 раз превышало температуру ионов.

Во время будущей кампании OP1.2 планируется проводить плазменные разряды с энергосодержанием до 80 МДж и длительностью ~10 c. По окончании OP1.2 будут установлены охладительные системы и дивертор, что позволит во время кампании OP.2 увеличить длительность разрядов до 30 мин и изучать стационарные режимы работы плазмы при высоком уровне введенной мощности нагрева (10 МВт).