ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В ЕВРОПЕ

Дж. Онгена

Лаборатория физики плазмы, Брюссель, Бельгия

В предыдущих экспериментах на JETе с ИТЭРоподобной основными были эксперименты по удержанию плазмы и распылению материала стенки. В недавних кампаниях на JETе в экспериментах отрабатывались интегрированные сценарии разрядов в плазме с током, доходящим до 4 мА, с магнитными полями до 3,7 Т и с мощностями дополнительного нагрева вплоть до PNBI  ~ 27 MВт, PИЦР ~ 7MВт, PLHCD ~ 3MВт.

Целью экспериментов было (i) получение низких тепловых нагрузок на компоненты стенки обращенные к плазме и (ii) избежание накопления вольфрама с целью получения плазмы с высокими характеристиками. Роль магнитной геометрии, положения сепаратрисы по отношению к диверторной пластине и откачки дивертора в достижении хорошего удержания в Н-моде при приемлемом уровне накопления вольфрама были исследованы в условиях центрального ИЦР нагрева при наличии напуска газа. Существенная роль была уделена сценариям с большим пристеночным излучением, которые важны для ИТЭРа.

Н-мода и гибридные сценарии плазмы были реализованы с фактором удержания энергии (Η98) в интервале от 0,9 – 1,2, если сравнивать со скейлингом IPB98 (y, 2). Раннее удавалось получить стационарные режимы с Н-модой в камере с ИТЭРоподобной стенкой без аккумуляции примесей вольфрама благодаря инициированию ELMов высокой частоты с помощью напуска газа. При этом удержание ухудшалось, по всей видимости, из-за охлаждения пьедестала при напуске газа. В течение последних двух лет были получены стационарные Н-режимы с удержанием, соответствующим предсказанному для ИТЕРа (H98 = 1). Положения пересечения сепаратрисы с пластиной подбиралось таким образом, чтобы максимизировать откачку. Таким образом, были получены стационарные режимы в Н-моде с большой длительностью импульса (~9 секунд) и с малым значением Zeff.

По запросу ИТЭРа на JETе был проведён эксперимент по проверке прогнозов о быстром оплавлении поверхности вольфрама под воздействием ELMов. Горизонтальная пластина дивертора JET сделана из цельного вольфрама окружённого четырьмя сборками из пластин для минимизации электромагнитных нагрузок при срывах. Повторяющиеся ELMы на JETе могут достигать энергий достаточных для плавления вольфрама (~300 кДж на ELM). В разрядах при положении точки пересечения сепаратрисы на внешнем обводе было получено некоторое поверхностное оплавление вольфрама на одной из выступающих наружу пластин, которая была специально сконструирована и установлена на диверторном модуле на внутреннем обводе. Была проведена серия из семи идентичных разрядов с током в 3 мA и мощностью нагрева 23 MВт. Результаты проведенного эксперимента согласуются с результатами расчётов по плавлению вольфрама и движению расплава. Это вселяет уверенность, что быстрое поверхностное оплавление элементов конструкции из-за ELMов является сравнительно безобидным по сравнению с объёмным плавлением вольфрама.

Работы на стеллараторе Wendelstein 7-X (W7-X) (со средними значениями малого и большого радиуса a = 0,55м и R0 = 5,5м, соответственно, объёмом плазмы около 30 м3) с мая 2014 года перешли в фазу ввода установки в эксплуатацию. Магнитное поле (B=2,5Т) с пятизаходной симметрией создаётся с помощью 50 сверхпроводящих модульных катушек, что позволяет существенно менять магнитную конфигурацию. Установлены также и дополнительные катушки (меняющие положение плазмы), чтобы непосредственно влиять на плазму SOL. Магнитные острова на резонансных поверхностях 5/4, 5/5 and 5/6 используются для дивертора. На W7-X для нагрева плазмы планируется использовать ЭЦР и ИЦР нагрев, а также инжекцию нейтральных пучков. Система нагрева будет модернизоваться по ходу выполнения работ. Планируется, что ЭЦРН будет стационарным источником нагрева большой мощности (~10 МВт при 140 ГГц; X2, O2 нагреве). Первая плазма планируется на конец 2015 года.

Одной из главных задач W7-X является демонстрация хорошего удержания быстрых ионов в условиях соответствующих термоядерным условиям, когда β около 4%. Для имитации поведения α-частиц в будущем стеллараторе-реакторе необходим источник достаточно энергичных ионов с энергиями в пределах 50 – 100 кэВ. В качества источника предполагается установление системы ИЦР нагрева для создания таких ионов. Планируется реализовать также и новейший сценарий нагрева, основанный на трехионной плазме для эффективного генерирования быстрых частиц высоких энергий, даже в условиях самых высоких плотностей, прогнозируемых для W7-X (> 2 1020 м–3).