Динамика LH-перехода в токамаке при наличии гам и инжеции замороженных марочастиц

Белокуров А.А.1, Аскинази Л.Г.1, Буланин В.В.2, Гурченко А.Д.1, Гусаков Е.З.1,  
Жубр Н.А.1, Kiviniemi T.P.3, Корнев В.А.1, Korpilo T.3, Крикунов С.В.1, Лебедев С.В.1, Leerink S.3, Machielsen M.4, Niskala P.3, Петров А.В.2, Тукачинский А.С.1, Яшин А.Ю.2

1ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, [belokurov@mail.ioffe.ru](mailto:belokurov@mail.ioffe.ru)  
2Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
3Aalto University, Espoo, Finland  
4Eindhoven University of Technology, Netherlands

Н-мода (режим улучшенного удержания плазмы) является необходимым режимом работы для токамака-реактора. Согласно современным представлениям, для перехода в Н-моду (LH-перехода) необходимо создание самоподдерживающегося транспортного барьера – области, в которой подавлен аномальный перенос вследствие присутствия сильно неоднородного радиального электрического поля. В некоторых токамаках, несмотря на наличие такого поля, переход в Н-моду не развивается, поэтому важной задачей является анализ возможности (или невозможности) LH-перехода.

В экспериментах на токамаке ТУМАН-3М обнаружено, что LH-переходу в режиме с низкой плотностью всегда предшествует вспышка ГАМ, в то время как в ФТ-2 LH-переход не происходит, несмотря на наличие колебаний ГАМ значительной амплитуды. В токамаке ТУМАН-3М существует возможность инициирования LH-перехода возмущением периферийного градиента концентрации при инжекции макрочастицы.

При помощи гирокинетического моделирования были установлены качественные и количественные характеристики турбулентного переноса в плазме обоих токамаков, в частности обнаружена быстрая реакция коэффициента аномальной диффузии и потоков частиц и энергии на колебания электрического поля, сопровождающие ГАМ.

На основе экспериментальных данных и результатов гирокинетических расчетов было проведено моделирование эволюции концентрации плазмы в ТУМАН-3М и ФТ-2 при наличии колебаний ГАМ и периферийном испарении пеллеты. Для ТУМАН-3М происходит инициирование перехода при превышении порогового значения для длительности или амплитуды ГАМ; на фоне колебаний градиента плотности и радиального электрического поля обнаружено постепенное увеличение средних значений этих величин, приводящее к достижению порога для LH-перехода. При испарении пеллеты из-за сильного возмущения градиента плотности возникает способствующее переходу неоднородное радиальное электрическое поле, приводящее к улучшению удержания в том случае, если охлаждение ионной компоненты на периферии незначительно. Для ФТ-2 ни при экспериментальных параметрах ГАМ, ни при искусственно увеличенной длительности и амплитуде вспышки ГАМ промоделировать инициирование LH-перехода не удалось.

Анализ нелинейной зависимости потока частиц от градиента концентрации позволяет выявить вероятные причины наличия и отсутствия LH-перехода. Уравнение диффузии с коэффициентом диффузии, зависящим от шира электрического поля в стационарном случае имеет (в зависимости от источника заряженных частиц) либо два устойчивых решения (для L- и H-моды, соответственно), либо одно – только для одного из режимов удержания. Последний случай, когда второе устойчивое решение (Н-мода) не реализуется, соответствует параметрам разряда и характеристикам турбулентности в токамаке ФТ-2, что подтверждается результатами эксперимента и численного моделирования.

Авторы выражают благодарность РФФИ за частичную финансовую поддержку: гранты 16-32-00360 мол\_а (А.А. Белокуров), 16-02-00580 (А.Д. Гурченко) и 15-02-03766 (Е.З. Гусаков).