удержание ионов высокой энергии в токамаках глобус-м и глобус-м2

Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, А.Д. Ибляминова, Г.С. Курскиев, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, М.И. Миронов, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, С.Ю. Толстяков, С.А. Хитров, Ф.В. Чернышев, П.Б. Щеголев, О.Н. Щербинин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, bakharev@mail.ioffe.ru

В представленной работе проанализированы результаты экспериментов по ионно-циклотронному нагреву (ИЦН) и нейтральной инжекции (НИ) на токамаке Глобус-М (при токе плазмы 200 кА и тороидальное магнитном поле 0.4 Тл). Также с помощью моделирования получены потери быстрых ионов в токамаке Глобус-М2 [1] (ток плазмы будет увеличен до 500 кА, а тороидальное магнитное поле - до 1 Тл).

 Ранее на токамаке Глобус-М был проведен единственный в мире эксперимент по ИЦН плазмы сферического токамака [2]. Мощность ИЦН составляла 100 кВт. Установлено, что реализуется схема нагрева на легкой (водородной) добавке. При применении ИЦН наблюдался рост ионной температуры со 180 до 320 эВ. Обнаружены экспериментальные факты, свидетельствующие о потерях ионов высокой энергии. В эксперименте выяснено, что в плазме удерживаются запертые частицы с энергиями до 15±5 кэВ. Моделирование орбит водорода высокой энергии показало, что энергия ускоренных ионов не может превышать 16 кэВ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. На токамаке Глобус-М2 магнитное поле и ток плазмы будут повышены в 2.5 раза, в результате чего будут удерживаться запертые ионы с энергией до 100 кэВ.

Выяснены основные механизмы потерь, быстрых ионов при НИ. Оценки потерь для основных компонентов пучка водорода и дейтерия с энергией 18 кэВ, полученные экспериментально и с помощью моделирования, находятся в хорошем соответствии друг с другом [3]. Основная причина потерь – попадание на неудерживаемые орбиты. Полные потери мощности составляют 40% для водорода и 65% для дейтерия. При инжекции водорода с энергией 26 кэВ полные потери увеличиваются до 70%. При инжекции дейтерия экспериментальная оценка орбитальных потерь невозможна из-за неклассического характера спектров. Моделирование показало, что полные потери мощности возрастают до 90%. Неклассический характер спектров возникает из-за наличия пилообразных колебаний, приводящих к 20% потерям быстрых ионов. При отсутствии пилообразных колебаний наблюдались альфвеновские моды, потери при которых сравнимы с потерями из-за пилообразных колебаний. Был обнаружен способ снижения орбитальных потерь и потерь из-за пилообразных колебаний в существующих условиях, который заключается в изменении расстояния между стенкой камерой и границей плазмы на внешнем обходе токамака. Увеличение этого расстояния с 3.5 до 7 см при инжекции дейтерия с энергией 26 кэВ уменьшает орбитальные потери в 2 раза, а полные потери падают до 65%. Моделирование показало, что увеличение магнитного поля и тока плазмы позволит снизить орбитальные потери более чем на порядок. Потери из-за пилообразных колебаний и альфвеновских мод также будут существенно снижены.

Таким образом, на токамаке Глобус-М2 проблема плохого удержания быстрых ионов будет полностью решена и мы ожидаем существенный рост температуры и нейтронного выхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00370.

Литература

1. V.K. Gusev et al. Nucl. Fusion, 53, (2013), 9, #093013
2. Ф.В. Чернышев и др. Физика плазмы, 35, (2009), №11, 979-988.
3. Ф.В. Чернышев и др. Физика плазмы, 37, (2011), №7, с. 595–615.