Исследование энергетических распределений быстрых ионов при нагреве плазмы нейтральным пучком на токамаке ТУМАН-3М

А.Д. Мельник1, Л.Г. Аскинази1, А.А. Белокуров1, П.Р. Гончаров2, В.А. Корнев1, С.В. Крикунов1, С.В. Лебедев1, М.И. Миронов1, А.С. Тукачинский1, Ф.В. Чернышев1

1Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт‑Петербург, Россия,   
 [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)  
2Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,   
 г. Санкт‑Петербург, Россия, [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)

На токамаке ТУМАН-3М, начиная с 2005 года, проводятся эксперименты по нагреву плазмы с помощью инжекции пучка атомов. За это время был получен ряд важных результатов, среди которых наиболее существенными являются:

- Инициация *LH* перехода при необычно низкой плотности *<ne>* ~ 0,5⋅1019 м–3, что оказалось возможным при инжекции пучка навстречу току плазмы [1].

- Получение режима со значительным нагревом ионного компонента плазмы (*Ti* = 360 эВ) и высоким выходом *D-D* нейтронов (*Sn* ~ 1,2⋅1011 c–1), что было реализовано при увеличенном тороидальном магнитном поле *Bt* = 1 Тл [2].

Однако, наряду с этими достижениями, имеются факты, свидетельствующие о низкой эффективности пучкового нагрева плазмы в некоторых режимах токамака ТУМАН-3М. Так, наблюдалось насыщение роста ионной температуры и выхода нейтронов при увеличении энергии инжекции. Было высказано предположение о том, что эти явления связаны с потерями быстрых ионов — частиц, возникающих во время нейтральной инжекции и передающих свою энергию основной плазме. В качестве возможного механизма потерь было названо два основных кандидата: орбитальные потери и потери в результате перезарядки. Оба из перечисленных механизмов потерь быстрых ионов характерны для малых установок. Это обусловлено, во-первых, большим ларморовским радиусом этих частиц, сравнимым с характерными размерами установки, и, во-вторых, большой областью периферийной плазмы на этих установках с высокой концентрацией остаточных нейтральных атомов.

Целью недавней серии экспериментов являлась проверка гипотезы о наличии значительных потерь быстрых ионов, а также идентификация механизмов потерь. Был проведен анализ энергетических функций распределения быстрых ионов при различной энергии нейтральной инжекции. Информация об этих распределениях была получена с помощью анализатора атомов перезарядки АКОРД-12 [3]. Причем, анализатор был направлен под тем же тангенциальным углом по отношению к плазменному шнуру, что и нейтральный инжектор. Это позволяло получать информацию об энергетических распределениях частиц, не искаженных фактором рассеяния на большие питч-углы. В дополнение к экспериментальным исследованиям было использовано компьютерное моделирование поведения быстрых ионов, включающее их образование, захват и торможение. В частности, для моделирования торможения быстрых ионов применялся код, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана [4]. В результате исследований был подтвержден рост потерь быстрых ионов при увеличении энергии инжекции на токамаке ТУМАН-3М. Было проведено сравнение данных эксперимента с результатами моделирования, и на этом основании были сделаны выводы о механизмах потерь частиц.

Литература

1. Lebedev S.V., et.al. 35th EPS CPP, Hersonissos, 2008, Vol. 32D, P-1.080.
2. Лебедев С.В. и др. XXXVШ Звенигородская конф. по ФП и УТС, 2011 г., стр. 31.
3. Извозчиков А.Б. и др. ЖТФ, 1992, т. 62, вып. 2, стр. 157.
4. Goncharov P.R., et.al. Phys. Plasmas, 2010, vol. 17, p. 112313.