Энергичные ионы в плазме компактного токамака:
роль магнитного поля в удержании ЭИ

С.В. Лебедев, Л.Г. Аскинази, М.И. Вильджюнас, Н.А. Жубр, С.В. Крикунов, В.А. Корнев, А.Д. Мельник, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский, Ф.В. Чернышев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ, sergei.lebedev@mail.ioffe.ru

Энергичные ионы (ЭИ) играют важную роль в физике горячей плазмы, поскольку, во-первых, наиболее эффективные методы нагрева (NBI, ICRH) основаны на создании в плазме пучков ЭИ и последующем их торможении с передачей энергии основной плазме; во-вторых, ЭИ образуются в результате термоядерных реакций и обеспечивают саморазогрев плазмы. В связи с этим, оптимизация удержания ЭИ является одной из центральных задач в физике высокотемпературной плазмы и УТС.

Дополнительный интерес к удержанию ЭИ обусловлен планами сооружения компактных источников нейтронов на основе реакций ядерного синтеза в установках с магнитным удержанием. Естественным и, по-видимому, единственным путем улучшения удержания ЭИ при сохранении компактности является увеличение магнитного поля и плазменного тока в таких установках. По этому пути начинают свое движение три сферических токамака: NSTX (Принстон), MAST (Калем) и Глобус-М (ФТИ). Для получения представления о влиянии Bt и Ip на параметры плазмы и возможность улучшения удержания ЭИ на ТУМАНе-3М в последнее время были осуществлены эксперименты с увеличенными полем и током. Для обеспечения возможности работы с увеличенными полями и током была проведена модернизация системы питания обмотки тороидального магнитного поля, позволившая увеличить Bt в стадии NBI нагрева на 30-40%, до величины 1 Тл [1] – проектной величины поля в токамаках Глобус-М2 и NSTX-U (в токамаке MAST-U поле будет ограничено величиной 0,84 Тл). Плазменный ток удалось увеличить на 20%, до 190 кА.

Наиболее чувствительным методом слежения за поведением ЭИ является регистрация потоков нейтронов, возникающих в реакциях ядерного синтеза. Это обусловлено сильной зависимостью сечения таких реакций от относительной скорости взаимодействующих частиц. В нашем случае нейтроны (2,45 МэВ) возникают в DD реакциях между ЭИ, появляющимися при ионизации пучка NBI, и ионами фоновой плазмы. В результате исследования поведения потоков нейтронов In при различных магнитных полях, плазменных токах и плотностях плазмы установлены зависимости In от Bt, Ip и n\_e [2]. При увеличении магнитного поля и тока обнаружено 2-кратное увеличение потока DD нейтронов. При анализе накопленной базы данных получен скейлинг зависимости In от «инженерных» параметров плазмы:

In ∝ (n^0,36)×(Ip^2,63)×(q\_cyl^1,29)×(E\_b0^4,67).

В серии экспериментов с различным положением плазмы по большому радиусу обнаружены 20% рост потока нейтронов и 2-кратный рост потоков высокоэнергичных атомов перезарядки при смещении плазмы на 1 см внутрь (при малом радиусе 22 см). Анализ полученных данных показал, что причиной наблюдаемого роста потоков является увеличение количества ЭИ [3]. Измерения ионной температуры показали увеличение Ti(0) от 250 до 350 эВ, что согласуется с ростом количества ЭИ при внутреннем смещении. Улучшение захвата ЭИ при ионизации нейтрального пучка NBI в смещенном по большому радиусу разряде подтверждается также численными расчетами траекторий [4].

Литература

1. Л.Г. Аскинази и др., Приборы и техника эксперимента, 2011, №6, с.66
2. В.А. Корнев и др., Письма в ЖТФ, т.39(2013), вып.6, стр.41
3. В.А. Корнев и др., Письма в ЖТФ, т.39(2013), вып.22, стр.64
4. М.И. Вильджюнас и др., Письма в ЖТФ, т.39(2013), вып.22, стр.80