

УДК 533.916

Д.С.Никандров (5 курс, каф. ФП), В.Ю.Сергеев, к.ф.-м.н.

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ МЕТОДОМ ПЕЛЛЕТ ИНЖЕКЦИИ НА ГЕЛИОТРОНЕ LHD

В настоящий момент человечество достигло ряда успехов в области изучения возможности осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС). Наиболее перспективными для этих целей являются устройства с магнитным удержанием плазмы и тороидальной симметрией магнитного поля. Это, прежде всего, установки типа токамак, стелларатор и гелиотрон [1]. Однако остается нерешенным еще ряд вопросов, связанных с исследованием свойств высокотемпературной плазмы. В частности, крайне важным представляется изучение свойств быстрых ионов, как участвующих в синтезе, так и образующихся после него [2]. От этого зависит скорость реакции синтеза, а также возможность осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции.

Для определения функций распределения быстрых ионов в опытах на гелиотроне LHD применялась диагностика РСХ (Pellet Charge eXchange). Принцип действия этой диагностики состоит в следующем. Быстрые ионы плазмы нейтрализуются в облаке нейтрального и слабоионизованного газа. Такое облако получается во время испарения легкой примеси, внесенной в плазму методом пеллет-инжекции [2]. После нейтрализации поток атомов попадает в детектор, и таким образом регистрируется искомая функция распределения. Установка LHD представляет собой гелиотрон с $l=2/m=10$ непрерывными винтовыми сверхпроводящими обмотками. Основные ее параметры следующие. Большой и малый радиусы установки равны 3.9 м и 0.6 м, соответственно. Магнитное поле в сверхпроводящих катушках достигает 3 Т. Диапазон основных параметров плазмы: электронная температура $T_e = 1 \div 10$ кэВ, плотность $n_e = (0.4 \div 15) \times 10^{13}$ см⁻³. Типичные времена удержания энергии в установке составляют порядка 50 ÷ 300 мс. Рабочий газ этой установки – гелий, но для исследований возможности удержания быстрых частиц рабочий газ имел малую добавку водорода ($n_H/n_{He} \sim 0.01-0.2$ [3]), разогреваемую ионно-циклотронным нагревом до высоких энергий (~ 100 keV). В качестве детектора нейтральных атомов в проведенных экспериментах использовался полупроводниковый детектор. Нейтральный атом, попадая в кристаллическую решетку такого детектора, рассеивался, образуя электронно-дырочные пары (энергия образования одной пары ~ 5 эВ). Неравновесная концентрация носителей заряда фиксировалась измерением проводимости всего кристалла. Система из полупроводникового детектора и усилительного тракта в широком диапазоне измеряемых энергий имела линейные характеристики.

Сложность анализа зафиксированных в экспериментах сигналов состояла в том, что собственные шумы полупроводникового детектора и усилительного тракта соответствовали уровню сигнала от частиц с энергией ~ 400 кэВ. Стоит отметить также то, что поток нейтральных атомов в направлении детектора был не велик и реально нельзя надеется на большое количество атомов с энергией, превышающей 400 кэВ. Определенную сложность составлял и шаг оцифровки АЦП, который не позволял различать частицы с энергиями различающимися менее чем на ~ 200 кэВ. Важным является и то, что отклик измерительной системы на единичное воздействие частицы являлся продолжительным (~ 50 мкс) по сравнению со средней частотой появления частиц (~ 3 мкс). Для решения проблемы построения по исходным данным функции распределения была поставлена задача о

нахождении ядра линейного интегрального преобразования $f(t) \xrightarrow{V} \int_{-\infty}^{\infty} f(t')K[t',t]dt = \xi_t$,

где $f(t)$ – экспериментально измеренный сигнал. Причем, ядро K должно быть таким, чтобы функция ξ_t имела вид суммы дельта-функций, умноженных на коэффициенты пропорциональные энергиям частиц, а носители дельта-функций соответствовали временам прихода частиц в детектор. Было получено аналитическое выражение для такого ядра (не приведенное здесь из-за громоздкости) для случая отсутствия как шумов, так и дискретной записи информации на АЦП. Как показали первые расчеты, даже зашумленное представление ξ_t оказывается много удобней для расчета функции распределения быстрых частиц. Пример полученного таким образом хвоста функции распределения, показан на рис. 1.

Приведенная гистограмма соответствует экспериментальным данным, а гладкая кривая соответствует аппроксимация этой гистограммы максвелловским распределением по энергиям, с выбором оптимальной температуры равной (~60-70 кэВ).

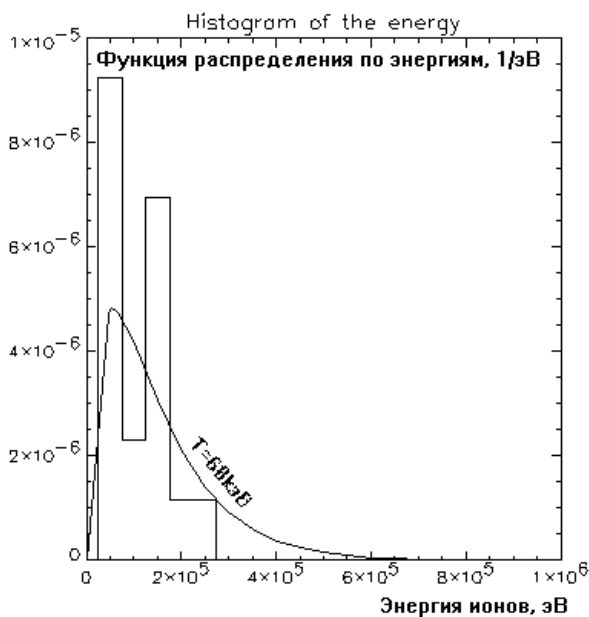


Рис. 1. Экспериментальная функция распределения быстрых ионов

Видно, что в этом случае мы можем различать частицы с малой разницей энергий и строить функции распределения для частиц с малыми скоростями. В проведенных опытах апертура детектора из-за своей малости не позволяла фиксировать большие потоки частиц, поэтому все экспериментальные данные, касающиеся функции распределения, можно считать только оценочными.

Таким образом, в работе предложен новый метод обработки данных РСХ диагностики. Оценена функция распределения быстрых частиц в гелиотроне LHD по первым данным РСХ диагностики. Наблюдены значения эффективной температуры быстрых частиц (~60-70 кэВ).

ЛИТЕРАТУРА:

1. ITER Physics Basis Editors *et al.* ITER Physics Basis.// Nucl. Fusion Vol 39 No 12.
2. V.Yu. Sergeev *et al.* IPP Report 10/20, Jan 2002.
3. V.Yu. Sergeev *et al.* Evaluations of optimal pellet Injection Parameters and Expect Detector Signal for the PCX Diagnostics on LHD.