

А.А. ЕКСАЕВА, Е.Д. МАРЕНКОВ, Д. БОРОДИН¹, А. KIRSCHNER¹,
М. LAENGNER¹, В.А. КУРНАЕВ, А. КРЕТЕР¹

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*¹Institut für Energie- und Klimaforschung – Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich,
Association EURATOM-FZJ, Trilateral Euregio Cluster, Jülich, Germany*

МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОДЕ ERO ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗАИ- МОДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ С ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНЬЮ НА УСТАНОВКЕ PSI-2

Открытые плазменные ловушки, такие как PSI-2 [1], широко используются для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью. Вместе с тем, из-за многообразия происходящих при таком взаимодействии процессов, интерпретация экспериментальных данных даже в таких относительно простых установках, часто требует численного моделирования.

Код ERO [2], является признанным инструментом для моделирования физических процессов в пристеночной плазме токамаков и рекомендован в качестве одного из инструментов расчета транспорта примесей в токамаке ITER. Этот код использует метод Монте-Карло для трехмерного моделирования поведения примесей в плазме, параметры которой считаются фиксированными и задаются извне. При расчете учитываются следующие процессы: распыление вещества мишени под действием плазменного облучения; транспорт распыленных нейтральных частиц и их ионизация в результате столкновений с электронами; транспорт получившихся ионов в электрическом и магнитном полях установки, с учетом их взаимодействия с поверхностью мишени и упругих столкновений с ионами и атомами нейтрального газа. Кроме того, производится расчет атомных процессов, приводящих к излучению примесей.

Хотя код ERO уже использовался для моделирования процессов в линейной плазменной установке PISCES [3], для моделирования экспериментов на PSI-2 требуется дальнейшая его модификация из-за отличающейся геометрии устройства установки и параметров плазмы. Соответствующие изменения были внесены в настоящей работе и включили в себя следующее:

1. Изменена геометрия мишени. Добавлена возможность использования квадратной мишени, сдвинутой относительно оси симметрии установки. Мишень может быть повернута под произвольным углом относительно нормали к ней.

2. Добавлена возможность задания произвольных радиальных профилей плотности и температуры плазмы.
3. Добавлена возможность получения двухмерной картины излучения примеси в плоскости, проходящей через одну из координатных осей.

Для тестирования этой новой версии были выбраны результаты экспериментов по взаимодействию плазмы с вольфрамом, состоявших в следующем. В камеру помещалась вольфрамовая мишень квадратной формы со стороной 10 мм. На мишень подавался потенциал -50 В относительно стенок камеры. Измерения электронной температуры и плотности, проведенные с помощью одиночного зонда Ленгмюра, показали, что радиальные профили этих величин имеют «провал» на оси установки (рис. 1), связанный с конструкцией источника. Соответственно, мишень помещалась в место с максимальной плотностью и температурой, то есть на расстоянии около 2 см от оси установки. Необходимо отметить, что зонд находился примерно в 20 см вдоль оси установки от того места, куда помещалась мишень, поэтому параметры плазмы в месте расположения мишени могут несколько отличаться от приведенных на рис. 1.

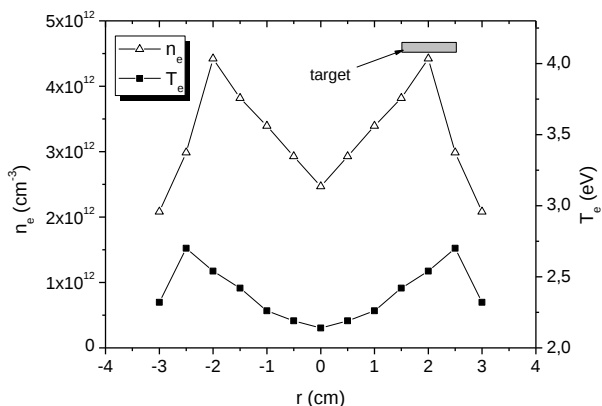


Рис. 1. Зависимость электронной плотности и температуры от радиуса. Показано также положение мишени (target)

В эксперименте с помощью спектрометра были получены зависимости интенсивности излучения линий нейтрального вольфрама от расстояния

до мишени. Эти интенсивности также моделировались в коде ERO. Результаты расчета и эксперимента для линии 4009 Å показаны на рис. 2.

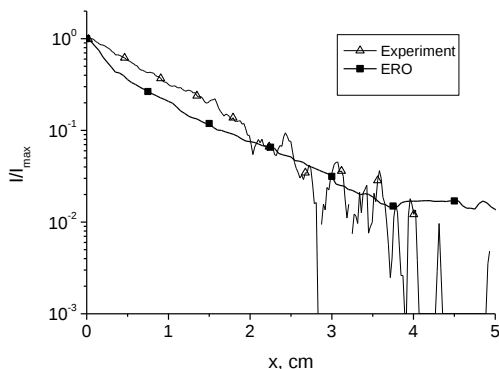


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная зависимости интенсивности излучения линии W1 от расстояния до мишени x

Видно, что моделирование дает качественно правильный экспоненциальный спад интенсивности с расстоянием от мишени. Уменьшение интенсивности связано с уменьшением плотности нейтральных атомов вольфрама, которое происходит из-за их ионизации электронным ударом и из-за ухода из объема наблюдения. Небольшое отличие между результатами расчета и эксперимента может быть связано со следующими факторами:

- 1) Не точное значение константы скорости ионизации, полученные с помощью моделирования в коде АТОМ [4];
- 2) Из-за модификации поверхности мишени, происходящей в процессе облучения, распределения распыленных частиц по энергиям и углам могут отличаться от общепринятых [5];
- 3) Значения плотности плазмы и температуры вблизи мишени могут отличаться от полученных с помощью зонда, который находился на значительном расстоянии от мишени. Заметим также, что константа ионизации экспоненциально зависит от электронной температуры, что делает результаты чувствительными даже к ее небольшим изменениям;

4) Так как значение плотности нейтралов вблизи мишени не известно, роль упругих столкновений может быть оценена неправильно при вычислениях в коде.

Хотя каждый из этих факторов не дает очень большого изменения наклона профиля, их совместное действие может объяснить наблюдаемую разницу между расчетом и экспериментом. Для того, чтобы сделать более конкретные выводы, необходимо проведение дополнительных экспериментов, которые позволили бы уточнить разброс хотя бы некоторых из упомянутых величин.

- [1] A. Pospieszczyk et al, J. Nucl. Mater. 438 (2013) S1249.
- [2] A. Kirschner et al, J. Nucl. Mater. 363-365 (2007) 91.
- [3] D. Borodin et al, Contrib. Plasma Phys. 50(3-5) (2010) 432.
- [4] D. Kondratyev et al, J. Nucl. Mater. 438 (2013) S351.
- [5] R. Behrisch, W. Eckstein. Sputtering by particle bombardment. Topics in Applied physics, V. 110. Springer, Berlin, 2007.