

Р.И. ХУСНУТДИНОВ<sup>1,2\*</sup>, А.Г. АЛЕКСЕЕВ<sup>2</sup>, Е.Н. АНДРЕЕНКО<sup>2</sup>,  
К.Ю. ВУКОЛОВ<sup>2,3</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, А.В. ГОРШКОВ<sup>2</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>,  
А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>, И.А. НИКИТИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>2</sup>*НИИЦ «Курчатовский институт», Москва*

<sup>3</sup>*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*\*RIKhusnutdinov@mephi.ru*

## **ЗАВИСИМОСТЬ РАСПЫЛЕНИЯ ПЕРЕЗАРЯДОЧНЫМИ НЕЙТРАЛАМИ БОРНОГО ПОКРЫТИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ИТЭР ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СОЛ**

Задача оценки эрозии первой стенки является критической при управлении термоядерной установкой. Для прогноза процессов эрозии важно создание быстрого кода расчета рециклинга изотопов водорода в пристеночной плазме, который был бы протестирован путем сравнения с сложными численными кодами, наиболее успешным примером такого рода является код EIRENE [1]. В настоящей работе приведены результаты использования такого быстрого численного кода VM1D2V [2], основанного на полуаналитической баллистической модели [3, 4], соответствующей быстрому коду VM1D1V [5]. Код VM1D2V дополнен модулем, позволяющим оценить распыление материала первой стенки атомами водорода в пристеночной плазме.

В настоящей работе представлены результаты расчетов модифицированным кодом VM1D2V для задачи эрозии бора как материала покрытия вольфрамовой первой стенки токамака. Расчет рециклинга водорода в пристеночной плазме и распыления бора производился в четырех сценариях. Два из них — это сценарии с высокой и низкой плотностью плазмы в пристеночном слое на стороне сильного магнитного поля в токамаке ИТЭР. Профили параметров плазмы (температура и плотность ионов и электронов) были взяты, как и в [5], из расчета кодом SOLPS4.3 [7] сценария №2252 работы дивертора ИТЭР. Результат расчета для атомов водорода вблизи стенки показан на рис. 1. На графиках ось абсцисс соответствует энергии частиц, летящих на стенку, а ось ординат – дифференциальной по энергии и углу плотности потока. Используя эти данные, была рассчитана эрозия бора. Результат расчета распыления бора вблизи стенки показан на рис. 2.

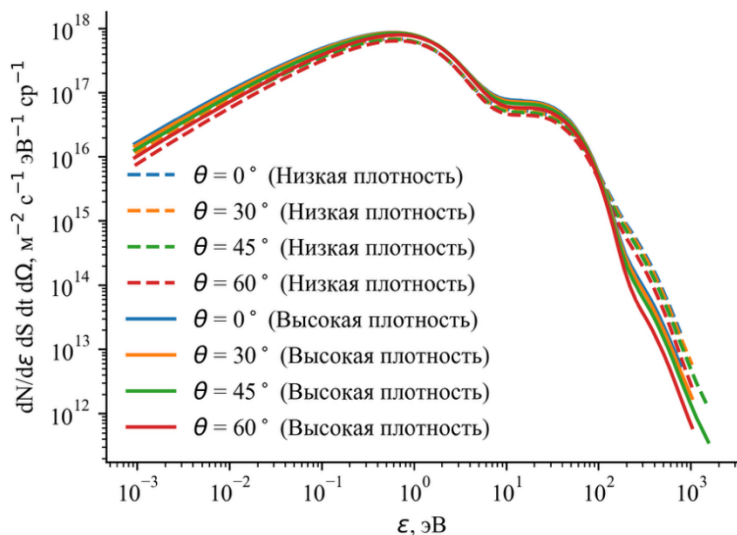


Рисунок 1 – Дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку в сценариях с низкой и высокой плотностью плазмы в пристеночном слое плазмы

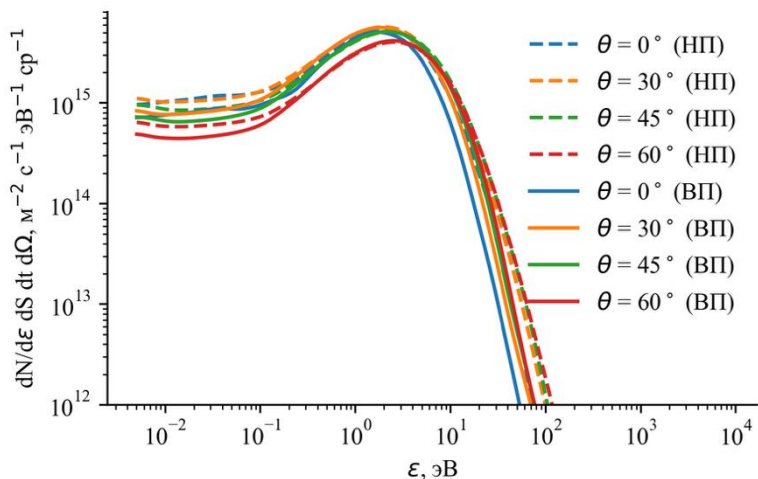


Рисунок 2 – Аналогичное рис. 1 распределение уходящих со стенки распыленных атомов бора

Еще два сценария с низкой и высокой плотностью плазмы, но уже на стороне слабого магнитного поля были взяты из расчетов кодом OEDGE [8]. Для наглядности были взяты сценарии «d» и «i», отличающиеся по плотности плазмы на несколько порядков, при этом температуры как ионов, так и электронов в обоих сценариях близки. Полученная в результате расчета дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку, для данных сценариев показана на рисунке 3. Данные профили, в отличие от представленных на рисунке 1, отличаются на два порядка, что показывает существенное влияние пристеночной плотности плазмы на поток атомов перезарядки, летящих на стенку.

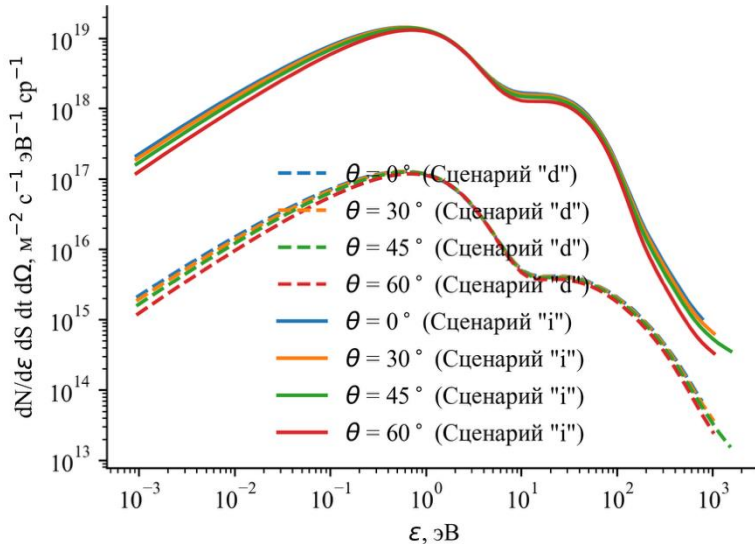


Рисунок 3 – Дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку в сценариях «d» и «i»

Аналогично описанному ранее, была рассчитана эрозия бора в данном случае. Результаты расчетов представлены на рисунке 4. Эрозионные потоки также различаются на два порядка.

Отметим, что данная модель не учитывает поток атомов перезарядки, летящих из центральной области плазмы [9]. Данные атомы могут давать сравнимый вклад с распылением пристеночной плазмой, поскольку при меньшем количестве они обладают кинетической энергией, на порядок превосходящий атомы перезарядки из пристеночной плазмы.

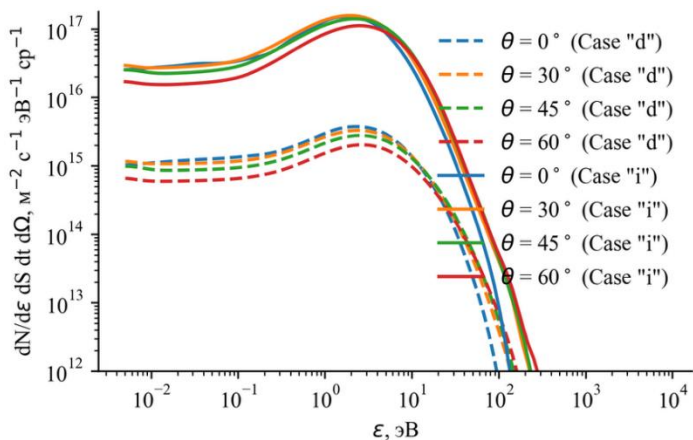


Рисунок 4 – То же, что на рис. 2, но для условий рис. 3.

## Литература

- [1] Reiter D., Baelmans M. and Börner P. 2005 *Fusion Sci. Tech.* **47** 172 (<https://doi.org/10.13182/FST47-172>), [www.eirene.de](http://www.eirene.de)
- [2] Р.И. Хуснутдинов, Н.Е. Ефимов, И.А. Никитин, Ю.М. Гаспарян и А.Б. Кукушкин. 2024 *ВАИТ (Сер. Терм. Сун.)* Т. 47, №3, С. 117-128.
- [3] Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S. and Shurygin V.A. 2012 *Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012)* p P4.093 (<http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P4.093.pdf>)
- [4] Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S. and Shurygin V.A. 2014 *Atoms* **2** 195 (<https://doi.org/10.3390/atoms2020195>)
- [5] Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A. *Plasma Phys. Contr. Fusion* 2021 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/abd97f/pdf>)
- [6] A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein, R. Dohmen, K. Schmid, U. von Toussaint, G. Badelow. (2019). *SDTrimSP Version 6.00* (IPP 2019-02). Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. (<https://doi.org/10.17617/2.3026474>)
- [7] Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W. and Reiter D. 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 2865 (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>)
- [8] Lisgo S. W., et al., *J. Nucl. Mater.*, 2011, 415, 965.
- [9] Babenko P.Y., Mironov M.I., Mikhailov V.S., Zinoviev A.N. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, № 4, 45020