

УДК 533.932

В.Г.Скоков (6 курс, каф. ФП), Б.В.Кутеев, д.ф.-м.н., проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАКРОЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА WENDELSTEIN-VII AS

Исследование процессов испарения имеет широкое диагностическое применение [1]. Полученную информацию можно использовать для определения таких важных величин, как профиль тока [2], значения коэффициентов переноса [3], эффективный заряд [4].

Такие исследования широко проводились в токамаках, однако в стеллараторах эксперименты по примесной пеллет-инжекции проводились в меньшем объеме. Поэтому было проведено исследование испарения макрочастиц в плазме установки Wendelstein-VII AS (ниже именуемый W-VII AS.).

В экспериментах сферическая углеродная пеллета диаметром около 0.4 мм инжектировалась в высокотемпературную плазму стелларатора со скоростью немногим более 300 м/с. Она испарялась, и с помощью CCD-камеры и светофильтра фиксировалась интенсивность излучения в линиях различных ионов углерода. Скорость испарения считалась пропорциональной интенсивности излучения, что подтверждается расчетами по коду Ленгуэла – Ушакова [5]. Поэтому экспериментальные значения скорости испарения определяются по данным сигнала излучения в интегральном свете.

Для анализа полученных данных использовалась модифицированная модель нейтрального экранирования [6]. Наряду с традиционными факторами, определяющими профиль скорости испарения, такими как электронная концентрация и температура, мы учитывали влияние уменьшения тепловых потоков за счет охлаждения магнитной поверхности макрочастицей. Кроме того, при сопоставлении результатов экспериментов и моделирования мы проанализировали воздействие ошибок в определенных параметрах моделирования на степень соответствия теории и эксперимента.

Нами было обнаружено два различных режима испарения углеродных пеллет на установке W-VII AS, которые различаются конфигурацией магнитного поля. В одном из них экспериментальная скорость испарения неплохо описывается моделью испарения с нейтральным экранированием, другой режим – с повышенным периферийным испарением – не поддается описанию с помощью этой модели.

В ходе данной работы мы провели анализ влияния ряда ошибок эксперимента, а также учли новые данные о свойствах углерода, из которого изготовлены пеллеты [7]. И хотя влияние этих эффектов нельзя считать пренебрежимо малым, но оно не позволяет улучшить согласие модели с экспериментом в случае стандартной магнитной конфигурации. Предполагается, что за повышенное периферийное испарение ответственны потоки быстрых электронов. Нами также планируется провести исследование этих процессов.

В некоторых случаях наблюдалось более затянутое испарение макрочастицы по сравнению с результатами модели. Пеллет проникает глубже в плазму, и варьированием параметров невозможно описать это явление. Поэтому было предложено в этих случаях дополнить модель, учтя эффект истощения числа испаряющих электронов, описанный в статье Холберга и др. [8] для случая водородных макрочастиц.

Вкратце суть эффекта такова. Хотя время, необходимое пеллету, чтобы пройти расстояние порядка диаметра облака вокруг пеллета, мало (5...10 мкс), его достаточно, чтобы число электронов, проучаствовавших в испарении, т. е. упавших за это время на пеллет, претерпело изменения. Закон убывания со временем электронной плотности \tilde{n} в магнитной поверхности объемом $\Delta V = 8\pi^2 R r r_0$ из-за потока электронов на пеллету \tilde{J} записывается как $d\tilde{n}/dt = -\tilde{J}(2\pi r_0^2)/\Delta V$ в предположении, что все электроны, попавшие на пеллету, исчезают из рассмотрения. Сам поток электронов описывается выражением $\tilde{J}(t) = \tilde{n}(t)v_{Te}$. Таким образом получаем формулу $\tilde{n}(t) = n e^{-t/\tau_d}$, где n - невозмущенная плотность, $\tau_d^{-1} = v_{Te} 2\pi r_0^2 / \Delta V$. Интегрируя по времени нахождения пеллеты на данной магнитной поверхности $\tau_{p0} = 2r_0 / V_p$, получаем окончательный вид редуцированной электронной плотности $\langle n \rangle / n = (1 - e^{-\tau_{p0}/\tau_d}) \tau_d / \tau_{p0}$, и соответствующий поток энергии $Q_e^d = Q_e (1 - e^{-\tau_{p0}/\tau_d}) \tau_d / \tau_{p0}$, при этом r_0 являлась варьируемым параметром. С помощью последней формулы и была модернизирована модель.

Таким образом, мы видим, как уменьшается поток энергии электронов на пеллету, вследствие чего падает скорость испарения. Этот эффект был исследован, причем мы абстрагировались от различных периферийных явлений, сделав там модельное решение тождественным экспериментальному. При этом такой параметр, как радиус облака можно было варьировать. Результаты других работ [9] показали, что эта величина должна быть меньше 1 см. И действительно, проведенный подбор радиуса для наилучшего согласия между результатами модели и данными, полученными из обработки эксперимента, дал величины от 0.6 до 0.8 см.

В результате работы исследовано испарение углеродных макрочастиц в стеллараторе. Учтены новые данные о свойствах пеллет и проведен анализ ошибок эксперимента. Показана невозможность объяснения ошибками расхождений между расчетными и экспериментальными значениями скорости испарения в режиме "стандартной" магнитной конфигурации стелларатора W-VII AS.

Используя работу [8], модифицирована модель нейтрального экранирования для описания испарения в случае проникновения макрочастиц в центральные области плазменного шнура. Оценены характерные значения радиуса облака нейтрального газа ~ 0.6...0.7 см вокруг макрочастицы, которые позволяют неплохо описать наблюдаемое поведение скорости испарения.

Данные, полученные в результате проведенной работы, могут быть использованы в проведении расчетов испарения углеродных макрочастиц в высокотемпературной плазме.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кутеев Б.В. Диагностика плазмы методом инжекции макрочастиц. Вопросы атомной науки и техники, т.2, 1986, вып.1, сс. 3-24.
2. S.M. Egorov, B.V. Kuteev, I.V. Miroshnikov, V.Yu. Sergeev. "Current density profile and electron beam localization measurements using carbon pellet on T-10", Nuclear Fusion, **32** (1992) 2025.
3. Bagdasarov A.A et al. Europhys. Conf. Abstracts, 1985, v. 9F, part 1, p.207-210
4. Егоров С.М. и др. Физика плазмы, 1984, том 10, вып. 6, 1133-1138.
5. A. Ushakov, L. Ledl, G. Veres et al. Proc. 26th EPS conf., 14-18 June, Maastricht, ECA **23J** (1999) 1481-1484.
6. Кутеев Б. В., Сергеев В. Ю., Цендин Л. Д., Физика плазмы, 1984, том 10, вып. 6, 1172-1179.
7. H.L. Leider et al. Carbon, Vol.11, 1973, pp.555-563.
8. W.A. Houlberg, S.L. Milora, S.E. Attenderger. Neutral and plasma shielding model for pellet ablation. Nuclear Fusion, Vol. 28, No.4 (1988).

9. S.M. Egorov, V.A. Galkin, V.G. Kapralov, et al. "Pellet ablation study in T-10 using photography technique" 13-th Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. Washington, 1990, paper IAEA-CN-50/A-V-3-2.