

Р.И. ХУСНУТДИНОВ^{1,2}, А.Б. КУКУШКИН^{1,2}, В.С. НЕВЕРОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ VM1D2V ДЛЯ РЕЦИКЛИНГА ВОДОРОДА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ОСНОВНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА

Разработано обобщение баллистической модели (БМ) [1-3] для функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов водорода, одномерной по скорости и координате, на случай двумерного распределения по скорости (такая модель названа VM1D2V, а модели [1-3] соответствует название VM1D1V). Такое обобщение необходимо для использования БМ при интерпретации наблюдений излучения плазмы токамака в спектральных линиях атомов изотопов водорода на хордах наблюдения, направленных под косым углом (не перпендикулярно) относительно первой стенки вакуумной камеры, и развития синтетической диагностики H-альфа в ИТЭР.

БМ [1-3] была разработана как простая, вычислительно эффективная модель, позволяющая рассчитывать ФРС атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме токамака путем итеративного решения кинетического уравнения для ФРС атомов и упрощенного решения кинетического уравнения для ФРС молекул. БМ учитывает проникновение медленных нейтралов со стенки в плазму с учетом следующих процессов: диссоциации молекул на атомы; ионизации атомов и молекул; перезарядки медленных нейтральных атомов на быстрых ионах плазмы; упругого и неупругого отражения атомов от стенки; отражения ионов от стенки с их нейтрализацией; поступления молекул со стенки. Используя в качестве входных данных профили плотности и температуры ионов и электронов в пристеночном слое плазмы и температуру стенки, БМ в приближении плоского слоя позволяет в пристеночном слое получить ФРС нейтральных молекул и атомов. БМ верифицирована в [1, 3] путем сравнения с результатами численного моделирования методом Монте-Карло кодом EIRENE [4] для условий периферийной плазмы в ИТЭР, смоделированных кодом SOLPS4.3 [5].

Использование БМ позволит заменить моделирование кодом EIRENE [4] в диагностике H-альфа в основной камере (но не в диверторе, где одномерная по координате модель неприменима), что намного ускорит решение обратной задачи восстановления плотности потока атомов и молекул со стенки путем подгонки спектров высокого разрешения линий бальмер-альфа в синтетической H-альфа диагностике для токамака ИТЭР [6]

и интерпретации экспериментов, например, при усовершенствовании методики, использованной в [7] для токамака JET. Однако БМ [1-3] применима только для хорд наблюдения, направленных ортогонально первой стенке.

Для описания кинетики нейтрального водорода в ВМ1D2V использовано следующее уравнение для $f^{(j)}(v_x, v_\perp, x)$ – функции распределения атомов j -го изотопа водорода по координате, ортогональной первой стенке, и по скорости, обобщающее уравнение (1) для ВМ1D1V в [3] на случай, двумерный по скорости:

$$\begin{aligned}
 v_x \frac{\partial f^{(j)}(v_x, v_\perp, x)}{\partial x} = & q(v_x, v_\perp, x) - f^{(j)}(v_x, v_\perp, x) n_e(x) \langle \sigma_{ai} v_e \rangle(x) \\
 & - f^{(j)}(v_x, v_\perp, x) \sum_{k=H,D,T} n_i^{(k+)}(x) \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) \\
 & \quad \times |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| F_M^{(k+)}(v', x) \\
 & + n_i^{(j+)}(x) F_M^{(j+)}(v, x) \sum_{k=H,D,T} \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) \\
 & \quad \times |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| f^{(k)}(v'_x, v'_\perp, x)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$|\mathbf{v} - \mathbf{v}'| = \sqrt{(v_x - v'_x)^2 + v_\perp^2 + v'_\perp^2 - 2v_\perp v'_\perp \cos \phi}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_\perp^2},$$

$$\int d\mathbf{v}' = \int_{-\infty}^{+\infty} dv'_x \int_0^{+\infty} v'_\perp dv'_\perp \int_0^{2\pi} d\phi.$$

В модели ВМ1D2V ФРС предполагается симметричной по полярному углу и зависит от проекции скорости на перпендикулярное стенке направление, v_x , и модуля проекции скорости на параллельное стенке направление, v_\perp .

Как показано в [1-3] интегро-дифференциальное уравнение типа (1) можно успешно решить итеративным методом благодаря тому, что основной вклад в ФРС в пристеночной плазме дает небольшое число актов перезарядки на траекториях нейтральных атомов от точки их рождения на стенке (вследствие процесса рекомбинации поступающих на стенку из плазмы ионов с их нейтрализацией, см. (10) в [3]) или в объеме (вследствие процессов диссоциации молекул и молекулярных ионов под действием электронных ударов, см. (3) в [3]).

Распределение источника нейтральных атомов по скоростям $q(v_x, v_\perp, x)$ можно вычислить, зная ФРС молекулярной компоненты, которую можно рассчитать, решив кинетическое уравнение для молекул:

$$v_x \frac{\partial f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x)}{\partial x} = -f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x) n_e(x) [\langle \sigma_{mi} v_e \rangle(x) + \langle \sigma_d v_e \rangle(x) + \langle \sigma_{di} v_e \rangle(x)], \quad (2)$$

где $f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x)$ – функция распределения молекул водорода, состоящих из j -го и k -го изотопов, по координате, ортогональной первой стенке, и по скорости, $\langle \sigma_{mi} v_e \rangle$, $\langle \sigma_d v_e \rangle$, $\langle \sigma_{di} v_e \rangle$ – скорости ионизации, диссоциации, диссоциации с ионизацией молекул, соответственно. Уравнение (2) легко интегрируется, поскольку относится к ОДУ с разделяющимися переменными.

Существенным усложнением расчетов при решении уравнения (1) по сравнению с одномерной по скорости моделью [1-3] является появление трехмерного интеграла в третьей строке, поскольку интеграл во второй строке можно аппроксимировать двойным логарифмическим полиномом как функцией температуры и кинетической энергии налетающего атома в лабораторной системе отсчета (такая параметризация дана в базе атомных данных кода EIRENE [4]):

$$\int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| F_M^{(k+)}(v', T(x)) = \exp\left(\sum_{m,n} \alpha_{mn} (\ln E)^n (\ln T)^m\right) \quad (3)$$

Однако несмотря на увеличение сложности расчетов, скорость расчетов ФРС кодом VM1D2V намного выше, чем кодом EIRENE. Данная модель позволит для наклонных хорд наблюдения решать общую многопараметрическую обратную задачу в синтетической H-альфа диагностике [6] для спектроскопии высокого разрешения водородных линий в токамаке-реакторе. Это даст возможность восстанавливать плотность потока атомов и молекул изотопов водорода с вакуумной стенки в плазму как с максимально достижимой точностью с помощью пост-процессинга экспериментальных данных, так – при определенных условиях – и с точностью до порядка величины в режиме реального времени с помощью метода [8], модифицирующего на случай измерения только линий атомов водорода (без привлечения трудно интерпретируемых данных спектроскопии молекул) известный метод SXB [9-11] для определения плотности потока примеси со стенки в плазму по интенсивности излучения в спектральной линии.

Литература.

1. 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>)
2. 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>)
3. 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>)
4. Reiter D., Baelmans M. and Börner P. 2005 *Fusion Sci. Tech.* **47** 172 (<https://doi.org/10.13182/FST47-172>), www.eirene.de
5. 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>)
6. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Lisgo S.W., Kukushkin A.S. 2016 *Fusion Sci. Tech.* **69** 628 (<https://doi.org/10.13182/FST15-186>)
7. Neverov V.S., Kukushkin A.B., Stamp M.F. et al. 2017 *Nucl. Fusion* **57** 016031 (<https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016031>)
8. Khusnutdinov R.I. and Kukushkin A.B. 2019 *Physics of Atomic Nuclei* **82** (10) 1392 (<https://doi.org/10.1134/S1063778819100119>)
9. Behringer K.H. 1987 *J. Nucl. Mater.* **145–147** 145 ([https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90319-9](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90319-9))
10. Pospieszczyk A. et al 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 144017 (<https://doi.org/10.1088/0953-4075/43/14/144017>)
11. Summers H.P. et al 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** 263 (<https://doi.org/10.1088/0741-3335/48/2/007>)