УДК 533.951.2

Верификация компьютерной реализации метода частиц-в-ячейках на примере двумерной задачи Чайлда-Ленгмюра

Г.Р. Крупенин[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Институт проблем механики РАН

Плазмодинамические процессы в разреженных газах в присутствии внешнего магнитного поля являются относительно малоизученными. Одним из возможных способов моделирования этих процессов в указанных условиях является метод частиц-в-ячейках.

Методы частиц-в-ячейках нашли широкое применение в задачах, связанных с описанием процессов в плазменных образованиях. Изначально эти методы использовались для расчета параметров бесстолкновительной плазмы. Критерий бесстолкновительности плазмы [1-4] можно записать в следующем виде:

$$L << \lambda ,$$

где L - характерный пространственный масштаб процессов, протекающих в плазме, λ - длина свободного пробега частиц между парными соударениями. Бесстолкновительная полностью ионизованная плазма описывается системой уравнений Власова-Максвелла для функций распределения частиц с самосогласованными электромагнитными полями. С математической точки зрения связь этой системы с методами частиц-в-ячейках продемонстрирована в [4]. В некоторых случаях для описания динамических процессов в плазме достаточно использовать электростатический вариант метода частиц-в-ячейках, тогда решаемая система уравнения примет вид:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{\upsilon}\frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + \frac{q_\alpha}{m_\alpha}\left(\vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{\upsilon}, \vec{H}\right]\right)\frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{\upsilon}} = 0$$

$$div\vec{E} = 4\pi\rho_e = 4\pi\sum_\alpha q_\alpha \int f_\alpha d\vec{\upsilon}$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi$$

здесь α - сорт частиц (например, ионы и электроны); $f_\alpha(\vec{r},\vec{\upsilon},t)$ - функция распределения частиц сорта α ; q_α - заряд; m_α - масса частицы; ρ_e - плотность пространственного заряда, $\vec{E}$ - напряженность электрического поля; φ - электростатический потенциал. В рамках данного подхода так же возможен учет столкновительных процессов с помощью метода Монте-Карло, что открывает возможности для моделирования газовых разрядов [5, 6].

В данной работе на примере двухмерной задачи Чайлда-Ленгмюра [7, 8] выполнена верификация компьютерного кода, реализующего осесимметричный электростатический вариант метода частиц-в-ячейках на неструктурированных треугольных сетках и предназначенного для расчетно-теоретических исследований плазмодинамических процессов в частично ионизованных разреженных газах в присутствии внешнего магнитного поля. Сопоставлены результаты численных расчетов и аналитического решения рассмотренной задачи, продемонстрировано удовлетворительное соответствие.

Литература

1. *Березин Ю.А., Вшивков В.А.* Метод частиц в динамике разреженной плазмы. – Новосибирск: Наука, 1980.
2. *Хокни Р., Иствуд Дж.* Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.

3. *Бэдсел Ч., Ленгдон А.* Физика плазмы и численное моделирование: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. *Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П.* Численное моделирование методами частиц в ячейках. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004, 360 с.
5. *Birdsall C.K.* Particle-in-Cell Charged-Particle Simulations, Plus Monte Carlo Collisions With Neutral Atoms, PIC-MCC // IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, Vol. 19, No. 2, p. 65-85.
6. *Vahedi V. and Surendra M.* A Monte Carlo collision model for the particle in cell method: applications to argon and oxygen discharges // Computer Physics Communications, 1995, Vol. 87, pp. 179-198.
7. *Luginsland J.W., Lau Y.Y., Gilgenbach R.M.* Two-Dimensional Child-Langmuir Law // Physical Review Letters, 1996, Vol. 77, No. 22, p. 4668-4670.
8. *Li Y., Wang H., Liu C., Sun J.* Two-dimensional Child-Langmuir law of planar diode with finite-radius emitter // Applied Surface Science, 2005, Vol. 251, p. 19-23.