расширение плазмы с отрицательными ионами в вакуум

Ю.В. Медведев

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, [medve@mail.ru](mailto:medve@mail.ru)

Из огромного многообразия многокомпонентных плазм весьма важным для приложений является случай плазмы с отрицательными ионами, то есть трехкомпонентной плазмы, состоящей из электронов, положительных и отрицательных ионов. Расширение плазмы является неотъемлемым элементом течения практически во всех лабораторных установках. Это явление не только влияет на распределения параметров плазмы, но и во многих случаях определяет время существования такой плазмы, поскольку в процессе расширения из плазмы вытекает некоторая часть положительных ионов и электронов. Они образуют отдельную область двухкомпонентной плазмы. Расширение бесстолкновительной плазмы с отрицательными ионами в вакуум изучалось в работах [1 – 3].

В докладе рассматривается расширение бесстолкновительной плазмы с отрицательными ионами в вакуум в случае, когда температуры всех сортов частиц одинаковы. В начальный момент времени *t*= 0 плазма имеет однородное распределение с плотностями *n*e0, *n*i0 и *n*j0, соответственно, электронов, положительных и отрицательных ионов. Она расположена в левом полупространстве –∞ < *x* ≤ 0, где выполняется условие квазинейтральности, а электростатический потенциал равен нулю *φ*0= 0. Правое полупространство 0 < *x* < +∞ представляет собой вакуумную область. Задача состоит в исследовании эволюции начального состояния во времени.

Движение плазмы изучалось с помощью численного моделирования по методу частиц в ячейке. Моделирования процесса проведено для разных значений начального отношения плотностей отрицательных и положительных ионов *n*j0 / *n*i0 и двух вариантов отношения масс отрицательного и положительного ионов *m*j / *m*i.

Было установлено, что течение может характеризоваться наличием или отсутствием бесстолкновительной ударной (или дозвуковой осцилляторной) волны разрежения. Найдено, что в случае, когда более тяжелыми являются положительные ионы *m*i > *m*j, волна с осцилляторной структурой не образуется, и плотность частиц монотонно падает с ростом координаты. Лёгкие отрицательные ионы вытягиваются расширяющимися положительными ионами в сторону вакуума. В ином случае, когда более тяжелыми являются отрицательные ионы *m*j > *m*i, их движение с малыми тепловыми скоростями не может размыть возникающую осцилляторную волну. Плотность отрицательных ионов довольно резко падает при подходе к вакуумной области.

Расчёты показали, что с увеличением плотности отрицательных ионов скорость фронта осцилляторной структуры быстро возрастает. Очевидно, что с увеличением скорости волны может измениться характер движения. Так при дозвуковых скоростях фронт волны расширяется, а при сверхзвуковых скоростях он сохраняет свою форму, и движение представляет собой бесстолкновительную ударную волну. Переход через скорость звука происходит при определённом значении плотности отрицательных ионов для каждого ионного состава. Так для плазмы, состоящей из электронов, положительных ионов K+ и отрицательных ионов C−60, переход от одного режима течения к другому происходит при критическом отношении плотностей *n*j0 / *n*i0 ≈ 0,73, то есть бесстолкновительная ударная волна существует при достаточно большом отношении плотностей.

Литература

1. El-Zein Ya., Amin A., Kim H.-S., Yi S., Lonngren K. E. Phys. Plasmas, 1995, V.2, P.1073.
2. Garsia L. G., Goedert J., Figua H., Fijalkow E., Feix M. R. Phys. Plasmas, 1997, V.4, P.4240.
3. Medvedev Yu. V. Plasma Phys. Control. Fusion, 1999, V.41. P.303.