

БИБЛИОГРАФИЯ

533.9.01(049.3)

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА — ПЛАНКА

Killeen J., Kerbel G. D., McCoy M. G., Mirin A. A. *Computational Methods for Kinetic Models of Magnetically Confined Plasmas*. — New York; Berlin; Heidelberg; Tokyo: Springer-Verlag, 1986.—196 p.— (Springer Series in Computational Physics).

Кинетические эффекты играют определяющую роль в физике прямых зеркальных ловушек. Для тороидальных систем в течение долгого времени считалось, что эффекты, связанные с отклонением от максвелловского распределения, существенны лишь в режимах с малой плотностью, когда появляется заметное число убегающих электронов. Однако, развитие методов нагрева плазмы с помощью высокочастотных волн и инъекции пучка горячих нейтралов привело к необходимости изучения кинетики плазмы также и в системах с тороидальной геометрией. Сложность задачи потребовала развития как аналитических, так и численных методов. За последние десять лет по этому вопросу появилась обширная литература, а численное решение кинетических уравнений оформилось в самостоятельное научное направление.

Рецензируемая книга посвящена последовательному описанию математических моделей плазмы с кулоновским взаимодействием частиц и методов численного решения поставленных задач. Кинетическое уравнение с таким взаимодействием принято называть уравнением Фоккера — Планка (ФП). По крайней мере половина книги посвящена изложению собственных результатов авторов, которые являются ведущими специалистами в области численного решения уравнения ФП.

Краткое Введение содержит историю вопроса и дает обзор существующих моделей и численных кодов.

Во второй главе обсуждается кинетика плазмы в однородном магнитном поле. В этом случае кинетическое уравнение оказывается двумерным или одномерным. Авторы приводят полные выражения для оператора соударений в сферической системе координат. Для компактной записи этого оператора используются «потенциалы Розенблюта», являющиеся функционалами от искомых функций. На примере одномерного уравнения рассматривается построение численных методов. Двумерные уравнения решаются двумя способами. Первый заключается в разложении решения по собственным функциям углового оператора (функциям Лежандра) с последующим разностным решением системы одномерных уравнений относительно коэффициентов разложения. Второй метод состоит в решении уравнения ФП на двумерной разностной сети. В качестве примеров рассмотрены задачи о потерях частиц в зеркальной ловушке, об отклонении распределения ионов от максвелловского в токамаке ТФТР и ряд других интересных задач.

Третья глава является центральной. Здесь рассмотрены кинетические модели плазмы в неоднородном магнитном поле тороидальных систем. В таких ловушках траектории частиц могут далеко отходить от «своих» магнит-

ных поверхностей и в результате движения в скоростном и конфигурационном пространстве оказываются связанными. Это приводит к необходимости многомерного описания процесса, что пока неприемлемо даже для самых совершенных ЭВМ. Для упрощения задачи используются операции усреднения. Сначала проводится усреднение по быстрому ларморовскому вращению частиц. В результате получается обобщенное дрейфовое кинетическое уравнение. Затем в этом уравнении проводится усреднение по периодическому или квазипериодическому движению в продольном направлении. Характерной здесь является частота колебаний запертых частиц между точками отражения (бауне-частота). После вторичного усреднения кинетическое уравнение вновь, как и в случае однородного магнитного поля, становится двумерным. Такие же процедуры усреднения используются при анализе взаимодействия электромагнитных волн с плазмой. Развитый метод иллюстрируется на ряде задач. Вычисляются неоклассические поправки к проводимости, проводится моделирование эксперимента по определению температуры ионов по спектру нейтралов перезарядки.

В последней четвертой главе обсуждается гибридная модель, объединяющая уравнения ФП с транспортными уравнениями и содержащая описание инъекции горячих нейтралов в плазму. Функция распределения горячих ионов в этом случае зависит от четырех переменных: двух скоростных координат, радиальной координаты и времени. Для описания горячих ионов используется нелинейный оператор ФП. Результаты расчетов по гибридной модели сравниваются с экспериментами на установках ПЛТ, ДАЙТЕ и ТФТР.

К недостаткам книги следует отнести упущенную возможность описать неоклассический перенос частиц при проведении операции вторичного усреднения в третьей главе. Практически отсутствуют ссылки на работы советских авторов. Не отражена, в частности, теория конвективного переноса в гофрах продольного магнитного поля, развитая А. В. Гуревичем и Я. С. Димантом.

Следует сделать также замечание приоритетного порядка. Как известно, впервые кинетическое уравнение для частиц с кулоновским взаимодействием было получено Л. Д. Ландау¹ в 1937 г. с помощью разложения уравнения Больцмана. Через 20 лет оно было независимо построено М. Розенблютом и др.², исходя из статистических соображений. К сожалению, во Введении совершенно не отражена эта сторона истории вопроса. Авторы ссылаются на работу², как на первоисточник, хотя работа¹ им известна.

В целом рецензируемая книга представляет большой интерес для широкого круга читателей, имеющих дело с кинетикой плазмы и использующих численные методы. В советской литературе эта тематика отражена пока недостаточно.

Ю. Н. Днестровский

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д. // ЖЭТФ — 1937. Т. 7. С. 203.
2. Rosenbluth M. N., MacDonald W. M., Judd D. L. // Phys. Rev. 1957. V. 107. P. 1.