

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации СКОВОРОДИНА Дмитрия Ивановича «Влияние самосогласованных полей на продольные потери из открытых ловушек», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 «Физика плазмы»

Актуальность

Продольные потери плазмы — это самый важный вопрос в теории открытых ловушек с 1950-х годов. Именно от решения этого вопроса всецело зависят термоядерные перспективы таких ловушек. Поперечное удержание у открытой ловушки очень хорошее, а продольное следует увеличить. Увеличение длины ловушки до сотен метров непрактично, увеличение пробочного отношения не дает серьезного выигрыша. Остается подбор режима удержания и дополнительные идеи: амбиполярный потенциал, гофрировка магнитного поля и т.п. В диссертационной работе теоретически исследованы продольные потери заряженных частиц из многопробочной и зеркальной ловушек в кинетическом режиме. Такая теория важна для интерпретации экспериментов, в частности, на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН. Поэтому *актуальность тематики* не вызывает сомнений.

Новизна

Впервые найдена поправка к функции распределения ионов в многопробочной ловушке в пределе мелкомасштабной гофрировки с несимметричными граничными условиями для каждой ячейки и исследована стационарная задача об истечении плазмы в вакуум. В рамках МГД теории найдена локализованная мода звуковых колебаний в неоднородной плазме пробкотрона. Впервые исследовано влияние самосогласованного амбиполярного поля на потери ионов из пробочной ловушки при $L \lambda$ и обнаружен режим, в котором в конусе потерь образуются струи холодных ионов. При помощи кинетического уравнения вычислен коэффициент подавления продольных потерь амбиполярной

пробкой в этом режиме. *Научная новизна* результатов подтверждается публикацией основных результатов в журналах: Fusion Science and Technology, Phys. of Plasmas, «Физика плазмы» и докладами на конференциях.

Обоснованность и достоверность выводов

Проведенные в диссертации исследования продольных потерь из открытых ловушек базируются на численном и аналитическом исследовании кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау. Используемые модели подробно обоснованы в тексте диссертации. *Достоверность выводов* подтверждается согласием с экспериментом, а в известных предельных случаях результатами других авторов.

Содержание

Диссертация состоит из Введения, 3 глав, Заключения и Приложения, содержит 97 страниц текста и 48 ссылок на литературу. В *Главе 1* описано истечение плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме. Вычисления проведены в пределе мелкомасштабной гофрировки $\lambda \gg l$, где λ — длина пробега, а l — период гофрировки. В пределе длинной ловушки $L \gg l$ можно найти изменение функции распределения ионов в одном пробокотроне, а потом подставить это изменение в уравнения переноса гидродинамического типа. Однако таким способом нельзя исследовать случай $l \sim \lambda$. Поправка к функции распределения в случае сильной гофрировки вычислена релаксационным численным методом. Скорость истечения плазмы в результате получилась меньше, чем в диффузионной модели в 1.5 раза. Причиной различия служит существенно немаксвелловское распределение по скоростям в концевом пробкотроне.

Глава 2 посвящена продольным звуковым колебаниям плазмы в ловушке, которые изучены в гидродинамическом приближении. Кинетическую теорию построить трудно из-за сильной неоднородности плазмы. Предполагается, что плазменный столб длинный и тонкий (параксиальное приближение), а частота колебаний много меньше

ионной циклотронной, но много больше частоты столкновений. Подробно обсуждается, почему несущественно затухание Ландау на электронах и ионах. Задача о малых колебаниях сводится к волновому уравнению (23), которое в свою очередь приводится к каноническому виду и получается одномерное уравнение Шредингера. Задача о существовании уровня в яме решается численно. Интересный результат изображен на рис. 10, где показано, что при коэффициенте обеднения конуса потерь (анизотропии функции распределения) $\gamma = 0,45$ уровень в яме исчезает. Как показано на рис. 15, в случае резких пробок уровень, а с ним и локализованная мода колебаний, существуют вплоть до $\gamma = 0,6$. Это объясняется уменьшением продольных градиентов параметров в почти максвелловской плазме. Особенно важно для оценки достоверности результатов диссертации, что локализованная мода с рассчитанной частотой 90–100 кГц наблюдалась в недавних экспериментах на установке ГДЛ, что показано на рис. 13.

В *Главе 3* рассмотрен переход от кинетического режима к гидродинамическому в открытой ловушке. На рис. 19 показано время продольного удержания в зависимости от пробочного отношения и частоты ион-ионных столкновений. Обе зависимости выходят на линейную, предсказанную Будкером. Функция распределения ионов изображена на рис. 22. Показано, что заполняющие конус потерь холодные ионы ускоряются амбиполярным потенциалом и вытягиваются из ловушки. Задача нелинейная, потому что градиент потенциала меняет скорость ионов, следовательно, меняется распределение плотности ионов, а с ним и сам амбиполярный потенциал. Создана программа для расчета самосогласованного поля, основанная на итерационной процедуре. Граничные условия для функции распределения обсуждаются очень подробно, а для ионных струй, возникающих вблизи X-точек фазового портрета системы, предложена простая аналитическая модель, позволяющая качественно объяснить наблюдаемые зависимости. Интересные результаты изображены на рис. 28, где подавления продольного потока ионов из ГДЛ за счет амбиполярного потенциала сравнивается с теорией. Самое интересное, что в эксперименте подавления получается даже сильнее, чем в теории.

Замечания

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Модель в главе 2 включает предположение об аксиально-симметричных колебаниях. Даже если стационарное решение аксиально-симметрично, моды собственных колебаний могут иметь зависимость от угла ($m \neq 0$). Следовало бы обосновать это допущение на стр. 28 более подробно, чем одной строчкой.
2. В списке литературы всего 48 ссылок. Имело бы смысл пояснить встречающиеся в работе понятия плещущихся ионов, потенциала Юшманова, адиабаты Чу — Голдбергера — Лоу, альфвеновских волн кручения и т.п., а заодно продемонстрировать знакомство с современной литературой по тематике исследования.
3. Имеются досадные опечатки и часто вместо устоявшихся терминов используются жаргонные слова. Так на стр. 54 написано, что функция распределения «зануляется», а следовало бы написать «обращается в нуль». Неправильно обозначен гипболический аресинус (в отечественной литературе используется обозначение arsh). В нескольких формулах умножение обозначено точкой. Точка в формулах обычно не пишется, а резервируется для обозначения скалярного произведения.
4. Введение и заключение написаны не в соответствии с каноническими правилами. Принято формулировать во введении защищаемые положения, а в заключении — основные результаты работы. В диссертационной работе формулировки основных результатов сырые, например, на стр. 78 в качестве первого результата написано, что «Построена корректная модель истечения ...». Результатом принято считать не построение модели, новые закономерности, которые обнаружены с помощью данной модели. На стр. 11 в качестве положения указано «Существенное подавление продольных потерь ионов из зеркальной ловушки ...», что звучит как результат, а не положение. Не указаны конференции, на которых докладывались результаты.

Однако эти замечания относятся скорее к оформлению, а не к содержанию диссертации, и поэтому не влияют на общую положительную оценку работы.

Выводы

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационная работа Д.И. Сквородина представляет научно-квалификационную работу, в которой выполнены исследования по продольному удержанию плазмы в открытых ловушках. Автореферат правильно отражает основные идеи и выводы диссертации.

Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов и достоверность выводов, можно заключить, что работа Д.И. Сквородина удовлетворяет всем требованиям ВАК, а автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Официальный оппонент, заведующий лабораторией фотоники
Института автоматики и электрометрии СО РАН

д.ф.-м.н., профессор

Д.А. Шапиро

пр. академика Колтюга, д. 1, 630090 Новосибирск
Институт автоматики и электрометрии СО РАН
тел. 33309021, e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Подпись д.ф.-м.н. Д.А.Шапиро з а в е р я ю

Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН

д.т.н.



 С.В. Михляев