

## Отзыв

официального оппонента начальника лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", д.ф.-м.н. Пастухова Владимира Павловича (123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, НИЦ "Курчатовский институт"; [Pastukhov\\_VP@nrcki.ru](mailto:Pastukhov_VP@nrcki.ru), тел. 8-499-196-7905) на диссертацию Сквородина Дмитрия Ивановича "Влияние самосогласованных полей на продольные потери из открытых ловушек", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация Сквородина Д.И. представляет собой научно-квалификационную работу, посвящённую теоретическому исследованию физических процессов, определяющих продольные потери плазмы в двух классах зеркальных магнитных ловушек, используемых для удержания высокотемпературной плазмы по программе исследований в области управляемого термоядерного синтеза. В отличие от предшествующих работ, в которых, как правило, анализировались предельные случаи слабой, либо очень сильной столкновительности плазмы, в данной диссертационной работе рассматриваются продольные потери плазмы в условиях промежуточной столкновительности, когда длина свободного пробега ионов  $\lambda_i$  сравнима с длиной ловушки  $L$ . Работа достаточно актуальна, а её результаты представляют значительный интерес для экспериментальных исследований, проводимых в Институте ядерной физики СО РАН на крупных магнитных ловушках ГОЛ-3 и ГДЛ.

Основная мотивация работы обусловлена тем, что эксперименты на установках ГОЛ-3 и ГДЛ ведутся в режимах с относительно невысокой столкновительностью плазмы и развитой турбулентностью, что указывает на необходимость учёта кинетических эффектов при анализе продольных потерь плазмы. Переход к кинетическому описанию связан также с необходимостью исследования стационарного режима истечения в вакуум. В этом случае существенную роль играют граничные условия на торцах ловушки, вблизи которых предположения квази-гидродинамической модели нарушаются. Ещё одной важной мотивацией для выполнения данной работы стали результаты измерения времени жизни горячей плазмы в экспериментах на ГОЛ-3, в которых величина продольных потерь плазмы указывала на присутствие аномально высокого эффективного рассеяния ионов, которое не могло быть объяснено парными кулоновскими столкновениями. В качестве одного из возможных объяснений обсуждалось рассеяние ионов на звуковых волнах, наблюдаемых в эксперименте.

В соответствии с указанной мотивацией в данной диссертационной работе были поставлены следующие основные цели:

- изучение функции распределения в многопробочной ловушке в случае мелкомасштабной гофрировки, когда длина свободного пробега  $\lambda_i$  много больше, чем длина гофрировки магнитного поля  $l$ ;
- исследование условий существования стоячей звуковой волны в плазме открытой ловушки;
- создание теоретической модели продольных потерь плазмы из пробочной ловушки в режиме переходной столкновительности.

Таким образом, задачи, решаемые в данной диссертационной работе, хорошо мотивированы, научно обоснованы и имеют важное значение для исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Дадим краткую характеристику структуры и основного содержания диссертационной работы Сквородина Д.И.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, трёх приложений и списка цитируемой литературы.

Во введении дан краткий обзор существующих теоретических и численных подходов к решению задачи о вычислении продольных потерь плазмы из открытых ловушек, обоснована актуальность исследований и сформулированы задачи, решению которых посвящена работа. Приведен перечень положений, выносимых на защиту, ссылки на статьи, в которых опубликованы основные результаты диссертации. Этот раздел дает правильное представление о месте данной работы в ряду других теоретических исследований продольных потерь плазмы в открытых магнитных ловушках.

Первая глава диссертации посвящена исследованию функции распределения в многопробочной ловушке в случае мелкомасштабной гофрировки, когда длина свободного пробега  $\lambda_i$  много больше длины гофрировки магнитного поля  $l$ . Особое внимание уделено задаче о стационарном истечении плазмы в вакуум. Показано, что скорость продольного истечения плазмы при  $\lambda_i \sim L$  должна быть значительно ниже, чем рассчитанная по квази-гидродинамической модели. При уменьшении длины свободного пробега  $\lambda_i < L$  наблюдается переход к многопробочному удержанию, причем темп потерь, рассчитанный в диссертации, по-прежнему остаётся примерно в 2 раза ниже предсказаний упрощённой квази-гидродинамической модели.

Во второй главе исследуются условия существования стоячих звуковых волн в открытых ловушках с анизотропной плазмой. Присутствие таких волн обсуждается в качестве возможного механизма аномально высокого эффективного рассеяния ионов, наблюдаемого в эксперименте. Задача решается в рамках идеальной анизотропной

магнитной гидродинамики Чу-Голдбергера-Лоу (ЧГЛ) при конечном отношении давления плазмы к давлению магнитного поля. Исследованы условия локализации звуковой волны для двух типов равновесий: пробкотрон с обедненным конусом потерь и ловушка с плещущимися ионами. Показано, что обеднение конуса потерь примерно в 3 раза приводит к появлению дискретной звуковой моды. В ловушке с плещущимися ионами стоячая волна с максимумом амплитуды в центральной части существует при большом отношении давления плещущихся ионов к давлению фоновой плазмы.

В третьей главе проведено исследование продольных потерь плазмы из зеркальной ловушки в режиме промежуточной столкновительности ионов, когда  $\lambda_i \sim L$ . Основные результаты получены путём численного решения стационарного кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау. Для этого диссертантом была разработана численная схема, включающая в себя интегрирование столкновительного члена вдоль траектории частиц, что позволило снизить паразитную схемную диффузию в пространстве скоростей до уровня, меньшего физической диффузии, определяемой интегралом столкновений Ландау. Результаты численного моделирования, проведенные для режимов с низкой ( $\lambda_i \gg L$ ) и высокой ( $\lambda_i \ll L$ ) столкновительностью, хорошо воспроизводят известные решения для этих предельных случаев. В случае промежуточной столкновительности ( $\lambda_i \sim L$ ) обнаружен режим, в котором формируются продольные струи холодных ионов. Проведено моделирование подавления продольных потерь плазмы из зеркальной ловушки, основанного на использовании "амбиполярных пробок" на торцах. Результаты моделирования качественно согласуются с результатами экспериментов на ГДЛ.

В заключении достаточно чётко суммированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложениях А и В представлено обсуждение ряда вспомогательных формул, вывод которых слишком громоздок, чтобы поместить его в основной текст диссертации. Приложение Б содержит пояснения, относящиеся к деталям физической модели, на основании которой был построен код, используемый в главе 3 для решения стационарного кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау. Вынесение указанных вопросов из основного текста в приложения вполне оправдано.

Вместе с тем у меня есть ряд критических замечаний:

1. Во второй главе использование магнитной гидродинамики ЧГЛ для описания звуковых колебаний в плазме с анизотропным давлением аргументируется лишь тем, что частота колебаний примерно соответствует баунс-частоте ионов и заметно превышает частоту столкновений. Однако, строго говоря, гидродинамика ЧГЛ применима к процессам с

характерными частотам, превышающими баунс-частоту ионов. Поэтому применимость гидродинамики ЧГЛ в рассматриваемой задаче требует дополнительного обоснования.

2. В третьей главе при расчёте продольных потерь ионов из зеркальной ловушке с большим пробочным отношением ( $R \gg 1$ ) используется модельный столкновений член, соответствующий диффузии лишь по поперечной скорости. Однако, как хорошо известно, потенциалы Трубникова-Розенблюта в достаточной степени изотропны (как при больших, так и при умеренных  $R$ ), в результате чего столкновительный член наиболее адекватно выражается в терминах модуля скорости и питч-угла. Об этом, а также о виде функции распределения ионов в зеркальных ловушках достаточно подробно написано в обзоре, опубликованном в сборнике "Вопросы теории плазмы" том 13 и посвящённом столкновительным потерям плазмы из открытых ловушек. Несомненно, диссертанту было бы полезно ознакомиться с этим обзором и сравнить с ним свои результаты. В частности, в этом обзоре указано на обеднение функции распределения запертых ионов в области малых скоростей  $v$ , что не учитывается в расчёте продольного потока ионов в данной диссертации.

3. Диссертанту следовало бы уделить большее внимание аккуратности и стилю изложения материалов диссертации. К сожалению, и диссертация, и автореферат содержат значительное число опечаток, а также нечётких и даже не вполне корректных словосочетаний и предложений. Ниже приведено лишь несколько характерных примеров:

- так и в диссертации (стр. 4) и в автореферате (стр. 3) вместо слова "реактор" написано "рекактор";
- в автореферате (стр. 7) написано "Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения", в то время как в диссертации имеется лишь три главы и три приложения;
- и в диссертации на стр. 6, и в автореферате на стр. 4 написано "В многопробочной ловушке ГОЛ-3 ... зарегистрированы продольные колебания в ячейках ловушки". Из этого предложения, а также из последующего текста, неясно, продольные колебания чего (потенциала, плотности, давления и т.п.) были зарегистрированы в эксперименте и поведение каких расчётных параметров нужно сравнивать с экспериментальными наблюдениями.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки работы. В целом диссертация является завершённым научным трудом, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, выводы и рекомендации, которые достоверны и в достаточной степени обоснованы. Все результаты, на основе которых сформулированы выводы и рекомендаций диссертации, получены автором лично и свидетельствуют о его

вкладе в науку. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в ряде ведущих научных центров Российской Федерации, таких как Институт ядерной физики СО РАН, НИЦ "Курчатовский институт", Институт прикладной физики РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, а также во многих университетах.

Диссертация Сковородина Д.И. удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно Положению о порядке присуждения ученых степеней (утвержденному Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней"). Автор диссертации, Сковородин Дмитрий Иванович, *заслуживает* присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Начальник лаборатории  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Доктор физико-математических наук

В.П. Пастухов

«07» апреля 2014 г.

Подпись Пастухова В.П. удостоверяю:

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Доктор физико-математических наук



В.И. Ильгисонис