

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию АЛЕЙНИКОВОЙ Ксении Олеговны «Кинетические баллонные моды в плазме токамака и стелларатора», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Представленная диссертация Ксении Олеговны Алейниковой посвящена решению актуальных теоретических задач по исследованию семейства баллонных неустойчивостей высокотемпературной плазмы в тороидальных системах с магнитным удержанием. Диссертация включает введение, три главы, заключение и список литературы. Всего в диссертации 118 страниц, 36 рисунков, 111 ссылок в списке цитируемой литературы.

Актуальность

Теоретическое изучение неустойчивостей плазмы имеет ключевое значение для успеха в реализации управляемого термоядерного синтеза. При этом спектр моделей плазмы очень широк: от идеальной магнитной гидродинамики (МГД) до полного кинетического описания. Интересные и практически значимые результаты можно ожидать от применения разного сорта гибридных моделей, наследующих относительную простоту жидкостного описания и полноту кинетических уравнений, описывающих множество физических эффектов. Один из подходов, основанный на усреднении кинетических уравнений – гирокинетическое описание неустойчивостей – позволяет рассмотреть такой класс неустойчивостей, как кинетические баллонные моды (КБМ). Данная неустойчивость непосредственно связана с величиной давления плазмы (параметр β), определяющей эффективность современных установок с магнитным удержанием. Поэтому разработка адекватных, относительно простых моделей КБМ, оценка области их применимости и сравнение соответствующих результатов с более полными гирокинетическими и МГД моделями представляет собой актуальную теоретическую и практическую задачу в физике плазмы токамаков и стеллараторов. Для токамаков, частности, кинетические баллонные моды активно обсуждаются как одна из возможных неустойчивостей, ограничивающих высоту и ширину «пьедестала» - приграничной зоны высокого давления, возникающего при переходе в режим H-моды.

Научная новизна

Перед автором работы стояли непростые задачи, постановка и история развития которых лаконично, но по существу, обсуждается во введении диссертации. Первая из них (глава 1): в рамках упрощенной геометрии плазменного шнура разобраться в различных вариантах модели кинетических баллонных мод. В результате в работе

Алейниковой предложена новая методика упрощения и решения общего уравнения КБМ и определены режимы применимости данной методики. Это потребовало нетривиальной аналитической работы, и, с другой стороны - для верификации моделей – численного моделирования с использованием giroкинетических кодов GENE и GS2. Связанная с этим задача исследования КБМ в геометрии стелларатора (глава 2) приводит к необходимости обобщить уравнения на сложную геометрию силовых трубок в трехмерной равновесной конфигурации. В результате впервые выполнено последовательное, согласованное с МГД равновесием, численное исследование влияния параметров плазмы на КБМ для стелларатора W7-X. Здесь понадобилось применить коды VMES и GIST для расчета параметров равновесной плазмы в стеллараторах. Важность согласованного моделирования и других МГД неустойчивостей продемонстрирована при анализе срыва с генерацией убегающих электронов на примере плазмы ИТЭР (глава 3). Эта часть работы расширила область проведенного исследования за рамки КБМ мод и также потребовала освоения и квалифицированного применения кодов линейной устойчивости MISHKA и CASTOR.

Коротко о предложенных методах и основных результатах по главам.

Глава 1. Упрощенная модель $\hat{s}-\alpha$ цилиндрического равновесия с ключевыми параметрами нормированного шира и градиента давления позволяет провести тщательный анализ роли различных физических эффектов и выстроить соответствующую иерархию малых параметров. В результате теоретического анализа кинетической баллонной неустойчивости и его сопоставления с численными результатами в работе выделено два режима КБМ: с «высоким» и «умеренным» температурным градиентом. Также показано, что частота моды играет важную роль в идентификации этих режимов. Обнаружено, что при больших градиентах температуры общее уравнение КБМ отлично аппроксимируется диамагнитной модификацией уравнения идеальной МГД. Это один из самых неожиданных результатов, подтвержденный, тем не менее, расчетами по giroкинетическим кодам. Для умеренных градиентов температуры выводится оригинальная, но значительно более громоздкая, версия уравнения КБМ, учитывающая конечность малого параметра β . Для верификации моделей предложен изящный подход с подстановкой в вариационное тождество собственных функций, полученных с помощью кода GENE. Расчеты, проведенные для различных режимов температурных градиентов, подтвердили предположения о применимости упрощенных и полных уравнений, и о роли частоты моды. Выяснено, в частности, что для больших температурных градиентов максимальный инкремент роста неустойчивости наблюдается для очень большой длины волны в противовес случаю умеренных градиентов. Дан и более подробный анализ стабилизирующей роли членов уравнения в различных областях плазменных параметров.

Глава 2. Здесь произведен учет реалистичной геометрии токамака и стелларатора, и, соответственно, уравнения КБМ представлены в координатах с выпрямленными силовыми линиями (используются, в частности, координаты Бузера). В том числе модифицировано и упрощенное уравнение КБМ для режима, в котором эта мода сильно неустойчива. На этой основе впервые выполнено численное исследование КБМ неустойчивости в геометрии стелларатора W7-X, выявлена зависимость инкрементов от таких факторов как величина давления, флуктуации продольного поля, радиальное волновое число. Сравнивались два семейства конфигураций: оптимизированная по идеальной МГД устойчивости и нетипичная – без так называемой магнитной ямы. Для них получены и проанализированы пороговые значения β для дестабилизации КБМ. Эти критические значения β оказались ниже, чем референсные МГД-оценки, рассчитанные для идеальных баллонных мод. Таким образом, сделан новый, практически значимый, вывод о том, что появление КБМ неустойчивости возможно раньше, чем проявится соответствующая идеальная МГД неустойчивость. Кроме того, подтвержден расчетами вполне ожидаемый тезис о том, что моделирование с растущим значением β требует согласованного пересчета МГД равновесия как для токамака, так и для стелларатора.

Глава 3. Проведенный здесь анализ отражает важность и актуальность изучения различных типов МГД неустойчивостей. Новизна представленного исследования заключается в том, что МГД активность анализируется в процессе самосогласованного моделирования генерации убегающих электронов (УЭ) и эволюции плазмы во время и после срыва тока. Соответствующая динамика плазмы приводит к существенной перестройке ее положения (в частности, в событии вертикального смещения, VDE) и профилей, что может приводить к возбуждению различных МГД мод. Различные сценарии моделируются путем варьирования профиля затравочного тока УЭ в довольно широкой области параметров плазмы ИТЭР, а самосогласованная эволюция – с помощью кода DINA, рассчитывающего на каждом временном шаге равновесие плазмы со свободной границей. Расчеты идеальных и резистивных МГД мод проводились по кодам линейной устойчивости MISHKA и CASTOR, что, к тому же, потребовало подготовки данных кодом HELENA. Собрать эти коды в единый работающий комплекс – отдельная нетривиальная задача. В результате моделирования доминирующей неустойчивостью почти во всех случаях оказывается внутренняя резистивная кинк мода $n=m=1$, что объясняется провалом профиля запаса устойчивости q ниже единицы. Но, как справедливо замечает автор, вовсе не обязательно, что она существенно повлияет на ход VDE, а лишь приведет к уплощению профиля тока УЭ в центре плазмы, а значит, необходимо следить за более опасными внешними модами. И такие моды возбуждаются, особенно в случаях большой плотности тока у границы и при приближении граничных значений q к целочисленным значениям. В качестве нового, практически значимого,

результата предсказан наиболее нежелательный сценарий VDE в ИТЭР, когда очень высокий ток УЭ сохраняется в плазме до конца VDE и затем может быть выброшен на стенку.

Достоверность и обоснованность

Предсказания аналитической теории, сделанные в данной работе (главы 1,2), подтверждены многочисленными численными расчетами. Достоверность численных результатов, в свою очередь, продемонстрирована с помощью сравнительных расчетов по двум giroкинетическим кодам: GENE и GS2 (главы 1,2), и по двум кодам МГД устойчивости MISHKA и CASTOR (глава 3). Приведенные в главе 3 оценки согласуются с эмпирической границей устойчивости, полученной экспериментально на установке JET. Основные результаты представленной работы опубликованы в реферируемых журналах и доложены на международных конференциях.

Практическая значимость

Разработанная в главах 1,2 теория позволяет значительно сэкономить временные затраты на анализ плазмы на устойчивость по отношению к КБМ. Аналитически и численно подтверждены ожидаемые свойства КБМ, а именно: КБМ могут иметь как более, так и менее высокий порог устойчивости по сравнению с соответствующей идеальной МГД модой. Эта работа может быть востребована при планировании экспериментов и интерпретации диагностических данных. Представленная в главе 3 информация о возможном возбуждении и инкрементах различных МГД мод при генерации убегающих электронов и вертикальном смещении плазмы может быть применена к разработке желаемого сценария срыва в ИТЭР.

Замечания

Для понимания роли различных параметров плазмы полезно было бы провести более подробное сравнение полученного в главах 1,2 упрощенного уравнения КБМ с уравнением идеальной баллонной моды. В частности, не рассматривается вопрос о второй зоне устойчивости баллонных мод, открывающейся при больших градиентах давления. Во введении это явление упомянуто, а как оно модифицируется в рамках предложенных моделей КБМ – не обсуждается.

Есть некоторые неясности в представлении расчетов МГД неустойчивостей в главе 3. В частности, непонятно, как технически «исключается из расчетов мода $n=m=1$ ». Для полноты картины не хватает подробностей: какова величина и профиль давления, с какой проводящей стенкой моделируются внешние винтовые моды, каковы характерные расчетные сетки и т.д. Более глубокому пониманию причин неустойчивостей помогла бы информация о перестройке профиля запаса устойчивости q в процессе VDE. Приведенных

значений на оси и на границе маловато, есть подозрение, что профиль q может становиться немонотонным; и близость к единице минимального значения q оказывается определяющим фактором.

Есть в работе, конечно, и стилистические недочеты, орфографические ошибки, опечатки, несуразности типа « a представляет собой нормировочную длину численного кода». Из замеченных неаккуратностей: ошибочные ссылки на рисунки (2.7 вместо 1.5, стр. 39), в комментарии к рис.3.2 написано «Профили затравочного тока УЭ с одинаковой амплитудой...», а должно быть – «с одинаковым полным током», есть и другие. Впрочем, такие неточности не оказывают существенного влияния на содержание работы и могут быть легко исправлены внимательным читателем.

Подводя итог, полагаю, что диссертационная работа Ксении Олеговны Алейниковой «Кинетические баллонные моды в плазме токамака и стелларатора» представляет собой завершенное научное исследование, выполненное на уровне, соответствующем квалификации кандидата наук. Содержание диссертации и автореферата удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.13 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Кандидат физико-математических наук (специальность 05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях), старший научный сотрудник отдела № 3 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д.4. Тел. + 7 499 220 7000, доб.7062, martynov@a5.kiam.ru

Мартынов Александр Александрович

Подпись Мартынова Александра Александровича заверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

А.И. Маслов

Дата: 01.11. 2018г.

