

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Марусова Никиты Андреевича
«Электростатические колебания в неоднородных плазменных
системах с замкнутым дрейфом электронов»,
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертация Н.А. Марусова посвящена исследованию устойчивости электростатических колебаний в частично замагниченной плазме, линейные размеры которой меньше ларморовского радиуса ионов, но значительно больше ларморовского радиуса электронов. Устройства, в которых реализуется режим частичной замагниченности, принято называть системами с замкнутым дрейфом электронов (СЗДЭ). Классическими примерами таких систем, перечисленных в диссертации, являются разряды Пеннинга, магнетронные разряды, стационарные плазменные двигатели А.И. Морозова, ионные источники с замкнутым дрейфом электронов и т.п. К этому же классу относится предложенная недавно в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера диамагнитная ловушка А.Д. Беклемишева (так называемый «диамагнитный пузырь»). В связи с этим тема диссертации Н.А. Марусова помимо общенаучного значения представляла для меня, как сотрудника ИЯФ СО РАН, особый интерес.

Основной задачей диссертационной работы было установление условий развития градиентной неустойчивости длинноволновых электростатических колебаний неоднородной плазмы с незамагниченной ионной компонентой во внешних скрещенных электрическом и магнитном полях с целью объяснения явления формирования крупномасштабных азимутальных структур, наблюдаемых в плазменных системах с замкнутым дрейфом электронов. Динамика неоднородной плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях теоретически исследовалась в приближении двухжидкостной магнитной гидродинамики методом собственных колебаний. Для отыскания собственных функций и собственных частот глобальных мод использовался код, разработанный автором диссертации. Численные расчёты и визуализация данных были выполнены в компьютерной среде MATLAB.

В результате работы автором диссертации найдены необходимые и достаточные условия устойчивости колебаний нижнегибридного типа, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля в неоднородной частично замагниченной плазме в скрещенных полях. В аналитической форме найдены профили граничной устойчивости и пороговые значения скорости азимутального дрейфа электронов, при превышении которых развивается неустойчивость. Вычислены частоты и инкременты наиболее неустойчивых мод. Для типичных аксиальных профилей плотности плазмы, электрического и магнитного полей вдоль ускоряющего канала стационарного плазменного двигателя (СПД) численно исследована линейная устойчивость

электростатических возмущений с учётом температуры электронов и интенсивности ионного потока. Показано, что приближение холодных электронов, используемое в работах по анализу колебаний в СПД, пригодно для описания градиентной неустойчивости только в прианодной области ускорителя. Получены точные аналитические решения для глобальных мод градиентной неустойчивости плазмы с поперечным током электронов в базовой конфигурации цилиндрического магнетрона. Впервые показано, что параметры биений, формируемых в результате суперпозиции близких по частоте глобальных мод с близкими инкрементами, качественно совпадают с характеристиками крупномасштабных структур, наблюдаемых в экспериментах на плазменных ускорителях с замкнутым дрейфом электронов. Вычислены собственные частоты и собственные функции неустойчивых глобальных мод внутри ускоряющего канала СПД. Исследовано влияние геометрических размеров ускоряющего канала СПД на форму частотного спектра неустойчивых глобальных мод. Предложена модель, которая описывает возникновение крупномасштабных азимутальных структур в прианодной части ускоряющего канала СПД как результат развития градиентной неустойчивости плазмы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Отмечу как пример для подражания тот факт, что каждая глава начинается с небольшого вступления, разъяснявшего, чему посвящена данная глава, и заканчивается кратким резюме, в котором суммируются полученные в ней результаты.

Во введении сформулированы основные задачи диссертационной работы и описаны методы их решения, описаны базовые принципы ускорения плазмы в системах с замкнутым дрейфом электронов, пояснена роль длинноволновых колебаний в процессе самоорганизации плазмы и описано их влияние на характеристики плазменных ускорителей. Здесь отмечено, что к настоящему времени известно несколько видов неустойчивостей плазмы, существенных для организации плазменного потока и формирования крупномасштабных структур в СЗДЭ, таких как ионно-пучковая и двухпоточковая неустойчивости, электронная и электрон-циклотронная дрейфовые неустойчивости, ионно-звуковая неустойчивость, резистивная неустойчивость, ионизационные неустойчивости, неустойчивости Рэлея, различные модификации градиентных неустойчивостей электростатических колебаний и т.п. Автор поясняет свой выбор темы диссертации – исследование градиентной электростатической неустойчивости в СЗДЭ – тем, что несмотря на богатую историю исследований, многие аспекты развития этой неустойчивости до сих пор оставались неизученными. В частности, в системах типа СПД неустойчивость традиционно рассматривалась локально, что не позволяло отследить изменение характеристик наиболее опасных возмущений вдоль длины ускоряющего канала.

Первая глава диссертационной работы посвящена построению редуцированной двухжидкостной гидродинамической модели для описания динамики неоднородной плазмы низкого давления с незамагниченными ионами и замагниченными горячими электронами.

Основным результатом этой главы является система нелинейных уравнений (1.1), (1.2), (1.5) и (1.12). В линейном локальном приближении из этой системы получено дисперсионное соотношение для электростатических возмущений, распространяющихся поперёк внешнего неоднородного магнитного поля в базовой конфигурации СЗДЭ. По сравнению с работами предшественников достижением автора диссертации является одновременный учёт неоднородности магнитного поля и эффектов конечного ларморовского радиуса электронов (КЛР).

Во второй главе на основе дисперсионного соотношения (1.21) исследована линейная устойчивость электростатических колебаний плазмы на фоне произвольного стационарного состояния СЗДЭ. Получены необходимые и достаточные условия неустойчивости (2.9). Определено влияние эффектов инерции и КЛР электронов на характер развития неустойчивости. Для чисто азимутальных колебаний аналитически найдены пороги неустойчивости, получены асимптотические выражения для длин волн, частот и инкрементов наиболее неустойчивых мод вблизи порога устойчивости. Автор диссертации убедительно доказал, что учёт инерции электронов и эффектов КЛР существенно меняет режим эволюции электростатических колебаний как в сторону сужения, так и в сторону расширения зоны устойчивости в зависимости от скорости вращения электронов. Во второй части главы исследована граничная устойчивость азимутальных возмущений. Для всех областей изменения параметров, характеризующих градиенты плотности плазмы и магнитного поля, получены выражения для критической скорости вращения электронов. Опираясь на концепцию граничной устойчивости, развитую в работах В.П. Пастухова и В.И. Ильгисониса при исследовании аномальных потерь заряженных частиц в открытых системах магнитного удержания плазмы, автор делает вывод, что можно ожидать формирование граничного профиля (2.50) в плазме СЗДЭ с сильно неоднородным магнитным полем в ходе нелинейного насыщения градиентной неустойчивости.

В третьей главе диссертации численно исследована устойчивость электростатических колебаний плазмы в ускоряющем канале СПД. Для расчёта использованы гауссовы профили, которые моделируют распределение плотности, электронной температуры, электрического и магнитного полей вдоль оси ускоряющего канала в реальных экспериментах. Определены волновые характеристики наиболее неустойчивых мод и найдена область локализации длинноволновых колебаний. Показано, что ускоряющий канал СПД разделяется на три пространственные области, которые характеризуются разными волновыми характеристиками наиболее неустойчивых колебаний. Изучено влияние эффектов электронной температуры и скорости течения ионов на характеристики неустойчивости в СПД. В отличие от второй главы, результаты расчётов доведены до конкретных чисел. В частности, указаны диапазоны частот неустойчивых колебаний. На основе анализа влияния эффектов конечной электронной температуры и скорости ионного потока на устойчивость плазмы в ускоряющем канале СПД сделан вывод, что приближение холодных электронов и неподвижных ионов, используемое во

множестве теоретических работ, применимо только для описания длинноволновых колебаний в прианодной области плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов.

В четвёртой главе диссертации исследована глобальная структура собственных колебаний холодной плазмы в СЗДЭ. Получено аналитическое решение задачи на собственные значения для случая однородного магнитного поля в магнетроне. Для аксиальных профилей основных параметров стационарного плазменного двигателя, предложенных в главе 3, численно рассчитана структура собственных неустойчивых колебаний в ускоряющем канале СПД. В параграфе 4.2 предложена физическая модель формирования крупномасштабных азимутальных структур типа спиц, которые регулярно наблюдаются в экспериментах с СЗДЭ при помощи высокоскоростной видеосъёмки. Большую ценность представляет сравнение в параграфе 4.3 результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

В Заключении перечислены основные результаты работы. Здесь сказано, что исследование включает построение модели для описания дисперсии электростатических колебаний, общий анализ их устойчивости, расчёт волновых характеристик и глобальной структуры неустойчивых мод в практически значимых конфигурациях электрического и магнитного полей, а также интерпретацию явления формирования крупномасштабных вращающихся структур, экспериментально наблюдаемых в плазменных ускорителях, основанных на эффекте Холла.

Замечания по работе

Диссертационная работа Н.А. Марусова представляет собой добротное завершённое научное исследование актуальной научно-технической задачи. Работа аккуратно оформлена, расчёты хорошо иллюстрированы. Неизбежные в большой работе опечатки, часть которых перечислена ниже, существенно не мешают пониманию мысли автора. Вместе с тем имеются и более существенные вопросы.

1. При выводе уравнения (1.12) использовано приближение вакуумного поля $\text{rot}\mathbf{V}=0$, но затем на стр. 25 магнитное поле было задано в виде $\mathbf{V}=V(x)\mathbf{e}_z$, который не совместим с приближением вакуумного поля. Поскольку само приближение вакуумного поля в рассматриваемой задаче кажется вполне адекватным, можно предположить, что отбрасывание x -компоненты магнитного поля не вполне обоснованно.

2. Интуитивно кажется, что утверждение о нулевой температуре ионов (= нулевой ларморовский радиус) несовместимо с утверждением о незамагниченности ионов (=ларморовский радиус больше линейных размеров плазмы). В диссертации не указан количественный критерий на температуру ионов, когда работает приближение, использованное в диссертации.

3. Не определён параметр v_{ni} в формуле (1.25). Не понятна также необходимость цитирования в диссертации самой этой формулы. Она даёт скорость ионов, близкую к скорости электрического

дрейфа, тогда как движение ионов в диссертации считается незамагниченным.

4. Опечатка в формуле (2.9). Во второй строке в левой части неравенства должно быть μ_1 .

5. Опечатки: в формулах (3.1), (3.2), (3.7) пропущен показатель степени 2.

6. На стр. 91 должно быть «рис. 1.1(а)» вместо «рис. 1.1(б)».

Указанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Марусова Никиты Андреевича актуальна и выполнена на высоком научном уровне. Ее результаты докладывались на крупных международных конференциях. По ним опубликованы 5 научных работ в ведущих рецензируемых изданиях мирового уровня, включая работы в научных журналах из перечня ВАК РФ. Результаты расчёта устойчивости ускоряющего канала стационарного плазменного двигателя могут быть использованы для интерпретации экспериментально наблюдаемых осцилляций разряда в действующих установках. Отдельное методическое значение имеет проведённая проверка применимости стандартно используемого приближения холодной плазмы для описания колебаний в системах с замкнутым дрейфом электронов.

Считаю, что диссертационная работа вполне соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор настоящего диссертационного исследования Марусов Никита Андреевич безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный
сотрудник Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт ядерной
физики им. Г.И. Будкера Сибирского
отделения Российской академии наук,
Новосибирск, пр. Академика
Лаврентьева, д.11
Тел. 8(383) 329-42-68, +7-(913) 933-24-84
e-mail: i.a.kotelnikov@inp.nsk.su

Котельников Игорь Александрович
16 марта 2020 г.

Подпись И.А. Котельникова заверяю
Учёный секретарь ИЯФ им. Будкера
д.ф.-м.н.



Аракчеев