

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Марусова Никиты Андреевича
«ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ
ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ»
по специальности 01.04.08 — физика плазмы, представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа Марусова Н.А. посвящена исследованию частично замагниченной плазмы, включающей замагниченные электроны и слабо замагниченные ионы. Такая плазма лежит в основе работы стационарных плазменных двигателей и ионных источников с замкнутым дрейфом электронов, а также реализуется в установках с разрядами Пеннинга и в установках с магнетронными разрядами. Важность применения такой плазмы, а также отсутствие последовательной теории процессов самоорганизации в такой плазме делает работу Марусова Н.А. особенно актуальной. Системы, в которых реализуется такая плазма, известны как системы с замкнутым дрейфом электронов. В диссертации развита теория линейных мод в таких системах и получены важные результаты, объясняющие наблюдаемые крупномасштабные спицеобразные структуры в таких системах.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и приложения. Список цитируемой литературы содержит 107 наименований.

Во введении к диссертации излагается современное состояние исследований плазмы в системах с замкнутым дрейфом электронов. Сформулированы задачи и цели работы. Обсуждается актуальность работы, ее новизна, обоснованность и практическая значимость.

В первой главе диссертации на основе двухжидкостных уравнений плазмы с незамагниченными ионами и замагниченными электронами построена модель для описания гидродинамических неустойчивостей в скрещенных электрическом и магнитном полях. Используя квазиклассическое приближение для электростатических возмущений, получено линейное дисперсионное уравнение, учитывающее квазинейтральность возмущений, влияние градиентов магнитного поля и плотности плазмы, стационарные потоки электронов и ионов, а также конечную температуру, инерцию и влияние конечного ларморовского радиуса электрона. Проведен детальный анализ полученного дисперсионного уравнения и изучены различные предельные случаи. Показано, что в случае низкочастотных длинноволновых колебаний, дисперсионное уравнение описывает антидрейфовую моду. В этом же пределе проанализирована модифицированная неустойчивость Саймона-

Хо. Описаны различные механизмы формирования поперечного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях, приводящие к неустойчивости электростатических возмущений, распространяющегося поперек внешнего магнитного поля в неоднородной слабо или полностью ионизованной плазме замагниченными и незамагниченными ионами.

Во второй главе проведено детальное исследование устойчивости малых электростатических колебаний, распространяющихся поперек внешнего неоднородного магнитного поля, в плазме с незамагниченными ионами и горячими замагниченными электронами в скрещенных электрическом и магнитном полях. Качественно исследовано влияние эффектов электронной инерции и конечного ларморовского радиуса электронов на характер неустойчивости азимутальных колебаний. Показано, что влияние эффектов конечного ларморовского радиуса электронов ослабевает с ростом скорости вращения электронов. Для чисто азимутальных колебаний найдены аналитические выражения для порога неустойчивости, а также найдены инкременты наиболее неустойчивых мод вблизи порога. Используя концепцию граничной устойчивости, в работе предложено использовать выражения для профилей граничной устойчивости для определения параметров плазмы, магнитного и электрического полей в системах с замкнутым дрейфом электронов. Полученные во второй главе результаты могут быть использованы для оптимизации рабочих режимов установок.

В третьей главе диссертации проведено численное исследование важной практической задачи об устойчивости электростатических колебаний в ускоряющем канале стационарного плазменного двигателя. Для решения такой амбициозной задачи дисперсионное уравнение, полученное в первой главе, анализируется с использованием типичных профилей, описывающих изменения электрического и магнитного полей, плотности плазмы и электронной температуры вдоль оси ускоряющего канала. В главе найдены наиболее неустойчивые моды, а также область локализации длинноволновых колебаний. Показано, что в ускоряющем канале стационарного плазменного двигателя существует три пространственно распределенных области, различающиеся направлением распространения и характеристиками наиболее неустойчивых возмущений.

В четвертой главе диссертации исследована устойчивость глобальных электростатических колебаний, распространяющихся в пространственно ограниченной неоднородной плазме с поперечным током. Получены уравнения малых колебаний, описывающие глобальную структуру возмущений электростатического потенциала в конфигурации систем с замкнутым дрейфом электронов в установках типа обращенного

магнетронного разряда и в установках стационарного плазменного двигателя. Для разрядов магнетронной конфигурации получены аналитические решения линейного уравнения, исследованы собственные колебания плазмы в такой конфигурации и рассчитан спектр неустойчивых мод. Наиболее неустойчивой модой оказалось крупномасштабное колебание с радиальным волновым числом равным единице. Для конфигурации стационарного плазменного двигателя показано, что неустойчивые колебания локализованы преимущественно в прианодной части ускоряющего канала. Исследовано влияние радиуса канала и увеличения длины ускоряющего канала на неустойчивость глобальных мод. Найденные глобальные моды градиентной неустойчивости предложены в качестве механизма формирования крупномасштабных азимутальных структур типа спиц, наблюдаемых в экспериментах в установках с замкнутым дрейфом электронов.

В заключении сформулированы выводы и основные результаты диссертации.

Диссертационная работа содержит целый ряд результатов, важных для понимания течений в плазменных системах с замкнутым дрейфом электронов, полученные результаты имеют важное практическое значение. Однако работа не лишена отдельных недостатков.

Во второй главе диссертации автором утверждается, что при пренебрежении инерцией электронов степень исследуемого кубического (по частоте возмущений) дисперсионного уравнения (1.21) понижается до второй. Между тем, прямая подстановка $m_e = 0$ в уравнение (1.21) не приводит к указанному автором результату.

В тексте на стр. 46 указано, что параметр δ , используемый для количественной оценки отрицательного влияния эффектов конечного ларморовского радиуса и инерции электронов на спектр мод градиентной неустойчивости, является безразмерным. Однако из формулы (2.18), посредством которой вводится данный параметр, следует, что его величина имеет размерность обратной длины.

У параметра n , характеризующего невозмущенное значение концентрации плазмы в выражении (1.23), а также в тексте на стр. 70 и 83, отсутствует индекс "0", принятый автором для обозначения равновесных величин.

Указанные замечания не умаляют достоинств работы. Диссертация Марусова Н. А. выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой. Результаты диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 5 статей в ведущих мировых

журналах по физике плазмы, включенных ВАК РФ в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных для публикации результатов диссертаций на соискание степени кандидата и доктора наук.

Учитывая вышесказанное, считаю, что диссертация «Электростатические колебания в неоднородных плазменных системах с замкнутым дрейфом электронов» полностью отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Марусов Никита Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук
профессор
заведующий сектором
«Динамика атмосфер и климата»
Отдела физики планет и малых тел Солнечной системы
Федерального государственного учреждения науки
Институт космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32
тел. +7(495) 333-54-78
e-mail: apetrosy@iki.rssi.ru

Петросян А. С.

08.04.2020

Подпись Петросяна Аракела Саркисовича заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН
кандидат физико-математических наук

Садовский А. М.

