

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - «Физика плазмы» Солохи Владимира Владимировича на тему «Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2»

Понимание физики процессов, определяющих динамику плазмы в пристеночной области токамака, — один из ключевых вопросов, ответ на который необходим для успешного управления потоками вещества и энергии на периферии термоядерного реактора. Плазма токамака неустойчива — сложное взаимодействие различных неустойчивостей друг с другом приводит к формированию турбулентных течений как внутри, так и на границе плазменного шнура установки. Теоретические и экспериментальные исследования устойчивости течения пристеночной плазмы являются основой для более глубокого понимания процессов аномального переноса и взаимодействия плазмы с обращенными к ней элементами конструкции реактора. В диссертационной работе рассматривается один из подобных вопросов, а именно исследуется устойчивость краевой плазмы действующих сферических токамаков Глобус-М и Глобус-М2 и проектируемого сферического токамака Глобус-3.

Объем диссертации — 127 страниц. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списков литературы и использованных сокращений.

В Главе 1 диссертантом представлен обзор физических механизмов, способных приводить к дестабилизации пристеночной плазмы. Обсуждаются общие теоретические вопросы анализа устойчивости течений пристеночной плазмы, в частности рассматриваются методы, используемые для изучения устойчивости плазмы относительно пилинг-баллонных мод, являющихся одним из центральных объектов исследования в диссертационной работе. Наряду с анализом публикаций по исследованию магнитогидродинамической устойчивости пристеночной плазмы токамака, в Главе 1 собраны сведения, касающиеся результатов экспериментальных наблюдений устойчивости периферийной плазмы токамаков (в частности, влияния формы плазменного шнура на характеристики разрядов на установках), численные подходы к описанию динамики пристеночной плазмы, а также сведения о токамаках Глобус-М/М2 и проектируемом токамаке Глобус-3.

В Главе 2 рассматриваются результаты выполненных диссертантом экспериментальных исследований устойчивости плазменного шнура установок Глобус-М и Глобус-М2. Представлены данные измерений различных диагностик, таких как диагностика рентгеновского излучения, интенсивности излучения линии D_α , данные оптических измерений, результаты измерений профилей давления плазмы на периферии шнура, а также данные с других диагностик, имеющихся на токамаках Глобус-М/М2. Систематизация и анализ большого объема измерений показал, что в установках могут быть выделены три различных режима флуктуаций пристеночной плазмы, при которых наблюдается формирование возмущений, полностью либо частично коррелирующее с развитием пилообразных колебаний в центральной области разряда при изменении мощности нагрева, тока разряда и давления в области пьедестала установки. Сделанная в Главе 2 гипотеза о

связи между процессами перезамыкания линий магнитного поля в центральной области разряда и развитием флуктуаций на периферии установки является одним из значимых результатов диссертационного исследования.

В Главе 3 проведен численный анализ развития пилинг-баллонных мод в периферийной области токамаков Глобус-М/М2/3. Получены диаграммы устойчивости флуктуаций в координатах высота и ширина пьедестала, определены инкременты и тороидальные волновые числа наиболее неустойчивых возмущений. Показано, что для разрядов на токамаке Глобус-М характерные времена развития мод оказываются больше, чем экспериментально наблюдаемое время задержки между пилообразными возмущениями центральной области разряда и флуктуациями на периферии плазменного шнура. Для токамака Глобус-М2 продемонстрировано, что наличие более сильного магнитного поля и больших значений высоты пьедестала, чем в Глобус-М, приводят к росту значений инкремента пилинг-баллонной моды, дестабилизируя её. Аналогичные выводы также получены диссертантом для токамака Глобус-3.

Одним из важных вопросов, рассмотренных диссертантом в Главе 3, является поиск дополнительных факторов, дестабилизирующих пилинг-баллонную моду и увеличивающих инкремент неустойчивости выше порогового значения. Сделан вывод, что одним из возможных механизмов является индукция вихревых токов в периферийной области установки, связанная с перестройкой магнитного равновесия при развитии внутренней кинк-моды. Проведенный диссертантом численный анализ механизма показал его правдоподобие в объяснении условий дестабилизации пилинг-баллонной моды на периферии токамаков Глобус-М/М2.

Глава 4 диссертационного исследования посвящена анализу влияния формы плазменного шнура на устойчивость периферийной плазмы токамака Глобус-М2. На основе экспериментальных измерений с привлечением численного моделирования устойчивости краевой плазмы диссертантом сделан вывод о положительной корреляции между ростом треугольности плазмы и увеличением пороговых значений высоты пьедестала, необходимых для дестабилизации пилинг-баллонной моды.

В Заключение собраны основные результаты и выводы, полученные диссертантом в ходе выполнения диссертационного исследования.

Несомненной научной ценностью обладают полученные диссертантом результаты кросс-анализа данных экспериментальных наблюдений флуктуаций на периферии токамаков Глобус-М/М2 и данных численного моделирования развития пилинг-баллонных возмущений в пристеночной области установок для выяснения влияния, которое оказывают форма плазменного шнура и возмущение токов, вызываемое развитием внутренней кинк-моды, на дестабилизацию флуктуаций на периферии плазменного шнура. Представленные результаты могут быть использованы на других установках для оценки воздействия нелокального изменения макроскопических параметров плазменного шнура на локальное развитие и дестабилизацию флуктуаций в пристеночной области установки. Результаты исследования применены диссертантом для расчёта области устойчивости периферийной плазмы проектируемого токамака Глобус-3 относительно пилинг-баллонной моды.

Достоверность экспериментальных результатов, продемонстрированных в работе, обоснована применением оборудования и методик измерений, сертифицированных и апробированных на токамаках Глобус-М/М2, а также согласием результатов измерений с данными, имеющимися в литературе. Достоверность и обоснованность результатов численного моделирования возмущений пилинг-баллонного типа в периферийной области токамаков подтверждаются применением верифицированной численной модели неустойчивости, реализованной в библиотеке BOUT++ и широко используемой в литературе для моделирования развития возмущений типа пристеночных локализованных мод (ELM).

Тематика диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.9 — «Физика плазмы», пункты 1) «Управляемый термоядерный синтез с магнитным и инерциальным удержанием», 3) «Динамика плазмы: волны, неустойчивости, нелинейные явления», 4) «Диагностика плазмы». Содержание автореферата верно отражает содержание диссертационной работы.

По тексту диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. в работе вместо устоявшегося в литературе определения устойчивости плазмы через знак инкремента неустойчивости используется нестандартное определение через соотношение между временем экспоненциального нарастания возмущения давления плазмы и экспериментально наблюдаемым временем задержки между сигналами рентгеновской и D_α диагностики. В то же время во всех представленных в тексте расчётных случаях флуктуации давления на периферии плазменного шнура нарастают во времени, при этом для наиболее неустойчивых мод указаны как инкременты, так и номера тороидальных мод, что и отражено на рисунках 3.5, 3.6. Хотелось бы, чтобы диссертант более детально прокомментировал, почему в работе использовано именно такое, нестандартное определение устойчивости плазмы.
2. Расчёты устойчивости плазмы относительно пилинг-баллонной моды выполнены в работе в приближении свободной границы плазменного шнура (проводящая стенка удалена на бесконечность). Как могут измениться выводы, полученные в работе, при учёте проводящей стенки вблизи границы плазменного шнура?
3. Расчётные сетки, использованные в работе для моделирования разрядов, охватывают область замкнутых магнитных силовых линий, простирающуюся вплоть до магнитной сепаратрисы. Данные экспериментальных измерений, рис. 4.4, показывают, что в этой области температура электронов снижается до величины < 100 эВ, что совместно с оценкой инкремента неустойчивости $\sim 10^4$ с⁻¹, может приводить к необходимости учёта конечной проводимости плазмы и снижению тока, индуцируемого на границе плазменного шнура при развитии внутренней кинк-моды в результате резистивной диссипации токовых возмущений. Как может повлиять этот эффект на развитие пилинг-баллонной моды на внешнем обводе в экваториальной плоскости установки?
4. Хотя работа подготовлена на высоком научном уровне, в ней имеются досадные небрежности оформления, снижающие общее положительное впечатление от её прочтения, например: ур. (1.1) — пропущен плюс в третьем слагаемом в скобках в правой части равенства; ур. (1.2) — уравнение записано в системе СИ, хотя ниже упоминается скорость света; Гред — вместо общепринятого Грэд; ур. (1.13) —

перепутаны местами числитель и знаменатель дроби; сравнение времени и скорости — как, например, во фразе «характерные времена развития краевых неустойчивостей при пеллет инъекции много меньше, чем звуковая скорость»; некорректная размерность двух последних слагаемых в правой части ур. (1.43), и ряд других.

Указанные замечания не снижают значимости полученных диссертантом научных результатов. Диссертационная работа «Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 — «Физика плазмы» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Солоха Владимир Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук за определение условий дестабилизации возмущений пилинг-баллонного типа на периферии токамаков Глобус-М/М2.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук

доцент кафедры физики плазмы

Института лазерных и плазменных технологий

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Степаненко Александр Александрович

14.05.2025

Контактные данные:

Тел.: +7(999)8430512

E-mail: aastepanenko@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.08 — Физика плазмы (физико-математические науки)

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра физики плазмы Института лазерных и плазменных технологий. Тел.: +7(999)8430512, E-mail: aastepanenko@mephi.ru

Подпись сотрудника НИЯУ МИФИ А.А. Степаненко удостоверяю: