



«УТВЕРЖЕНО»

Проректор
Санкт-Петербургского
Государственного Университета
С. В. Микушев

работе

«20» ноября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию **Векшиной Елены Оскаровны** «Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Актуальность темы диссертации

Численное моделирование играет большую роль в анализе физических процессов, в проектировании новых установок в последнее время. Основной причиной является увеличение вычислительной мощности компьютеров, которое повлекло развитие численных методов решения дифференциальных уравнений. В физике токамаков численное моделирование применяется при анализе процессов в центральной области разряда и на периферии. В данной работе для моделирования пристеночной плазмы токамака Глобус-М использовался двумерный код SOLPS-ITER, в основе которого лежит решение уравнений Брагинского. Код был создан в начале девяностых годов прошлого века совместно сотрудниками кафедры физики плазмы Политехнического института и иностранными коллегами. С тех пор код постоянно обновляется, в решаемые уравнения были внесены новые члены, отвечающие за дрейфовые потоки частиц, расширяются возможности задания граничных условий для уравнений. Код SOLPS-ITER используется для моделирования пристеночной плазмы многих действующих токамаков, проекта ИТЭР.

В диссертации на основе моделирования кодом SOLPS-ITER определена зависимость ширины обдирочного слоя токамака Глобус-М от тока плазмы в разрядах с улучшенным удержанием энергии в центральной части разряда, проведено сравнение энергетических нагрузок на диверторные пластины для разрядов токамака Глобус-М с разной геометрией магнитных поверхностей. Этим темам посвящено много современных работ на различных токамаках, что говорит об актуальности темы диссертации.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Список литературы содержит 39 наименований. Общий объём диссертации – 91 страница.

Во введении описано современное состояние исследований пристеночной плазмы, посвященных ширине обдирочного слоя, протеканию токов в пристеночной плазме, рассказано о вопросах, оставшихся невыясненными в этих работах. Рассказано об имеющемся мировом опыте моделирования пристеночной плазмы кодом SOLPS-ITER, об использовании этого кода для моделирования сферических токамаков. Сформулированы цели работы, научная новизна, практическая значимость работы, обоснована достоверность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, описана апробация работы.

В первой главе описано моделирование пяти разрядов токамака Глобус-М в режиме улучшенного удержания со значениями тока плазмы в диапазоне 100-200КА. Проиллюстрировано согласие результатов моделирования с экспериментальными измерениями. На основе моделирования определена обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы. Аналогичный результат был получен при обработке экспериментальных данных многих токамаков с величиной тока плазмы от 0.4-3.5МА. Полученный в результате работы над диссертацией результат расширяет диапазон токов плазмы, для которых справедлива обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы.

Во второй главе представлена аналитическая модель В. А. Рожанского и Е. Г. Кавеевой неоклассического механизма формирования обдирочного слоя. Описано моделирование разряда токамака Глобус-М, проведённое для проверки аналитической модели. Показано, что результаты моделирования дают те же результаты, что и предсказанные моделью, таким образом, её подтверждая. Показано, что при моделировании обдирочного слоя неоклассической природы, за сепаратрисой увеличивается радиальный ток, предсказанный аналитической моделью.

В третьей главе представлено сравнение разрядов с разной геометрией магнитных силовых линий на основе моделирования двух разрядов токамака Глобус-М. Показано, что ширина обдирочного слоя зависит от геометрии слабее, чем получается при оценке переноса тепла в пристеночной области за счёт только турбулентного механизма. Таким образом, показано, что в формировании обдирочного слоя реального разряда дрейфовые процессы играют заметную роль. Описаны токи, протекающие в обдирочном слое в условиях симметричного разряда с одной сепаратрисой и двумя Х-точками на ней.

Четвёртая глава посвящена токам, протекающим в обдирочном слое разряда с двумя сепаратрисами. Показано, что радиальный ток, описанный во второй главе, требует протекания токов, замыкающих его через диверторные пластины. Токи, вытекающие на пластины, могут быть измерены экспериментально. Измеренные величины токов согласуются с результатами моделирования.

В конце каждой из четырёх глав приведены выводы из данной части. Заключение перечисляет основные результаты, полученные в диссертации.

Последняя часть, приложение, содержит гидродинамические уравнения, которые решаются в коде SOLPS-ITER.

В конце работы приведён список из 9 публикаций по теме диссертации и список цитируемой литературы. Все публикации были выполнены в реферируемых журналах.

Новизна и научная ценность полученных результатов

На основе результатов моделирования впервые продемонстрирована обратная зависимость ширины обдирочного слоя от тока плазмы в диапазоне 100-200КА.

Впервые проведён сравнительный анализ энергетических нагрузок разрядов с разной геометрией магнитных силовых линий и показано, что симметричный разряд не даёт ожидаемого выигрыша в два раза на токамаке Глобус-М.

С помощью моделирования подтверждена аналитическая модель неоклассического обдирочного слоя.

Показано, что наличие радиального тока, предсказанного в моделировании, требует замыкающих его полоидальных токов, вытекающих на пластины. Токи, вытекающие на пластину из плазмы, влияют на поток энергии, выходящий на пластину.

Наряду с научной ценностью, материалы диссертации представляют интерес с точки зрения использования в педагогическом процессе. В частности, на кафедре оптики СПбГУ на специализации «Физика плазмы» читается специальный курс «Физика высокотемпературной плазмы». Поскольку диссертация Векшиной отражает современное состояние исследований пристеночной области токамака, то естественно использовать полученные результаты при чтении лекций в этом курсе.

Достоверность полученных результатов основана на том, что:

- Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М проводилось с помощью кода SOLPS-ITER, применяемого и проверенного на многих токамаках. В расчёт были включены дрейфовые потоки и протекание токов через плазму, что позволяет достоверно описать процессы переноса в пристеночной области.
- Результаты расчётов воспроизводят с допустимой точностью результаты измерений параметров плазмы ленгмюровскими зондами.
- Полученные в моделировании токи на пластины близки к значениям токов экспериментально измеренным с помощью диверторных зондов.

Замечания по диссертации:

1. Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М проводилось с использованием гидродинамического описания, в то время как в SOLPS-ITER есть возможность более аккуратного кинетического описания нейтральных частиц кодом EIRENE.
2. Малое количество экспериментальных точек в экваториальной плоскости на профиле электронной плотности и температуры.
3. В рамках численного эксперимента – моделирования с пониженными коэффициентами турбулентного переноса, коэффициент электронной теплопроводности был снижен в двадцать раз, а коэффициент диффузии только в два раза.

Приведённые замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Векшиной Елены Оскаровны «Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей важное теоретическое и практическое применение. Текст автореферата соответствует всем основным положениям и результатам, изложенным автором в диссертации. Диссертация **соответствует заявленной научной специальности 01.04.08 – "Физика плазмы"**. Основные положения диссертации **апробированы** на международных научных конференциях и опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. **Выносимые на защиту основные положения полностью соответствуют** изложенным в диссертации результатам.

По объёму, научной новизне, практической ценности и достоверности результатов диссертация Векшиной Е. О. полностью соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (п.9 Положения о присуждении ученой степени, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Отзыв, составленный на основании ознакомления с текстом диссертации и автореферата, рассмотрен и одобрен на заседании кафедры оптики Санкт-Петербургского государственного университета "19" ноября 2021 г., протокол № 8. На заседании присутствовало 15 человек, отзыв одобрен единогласно.

<p>доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптики СПбГУ Тел. +79117041211 E-mail: niktimof@yandex.ru</p>	
<p>доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики СПбГУ +79219711498 E-mail: yu_golubovski@yahoo.com</p>	<p>Голубовский Юрий Борисович</p>
<p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» г.Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034</p>	

Адрес
Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург,
Университетская наб., д.7-9

e-mail: spbu@spbu.ru
<http://spbu.ru>

ПОДПИСЬ РУК
У ДОСТОВЕРНО

НАЧАЛЬНИК УП
МЕРСОНОВ С. В.

23 НОЯ 2021

Шилова М.А. и Голубовский Ю.Б.

