

Отзыв официального оппонента на диссертацию Елены Оскаровны Векшиной “Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

В диссертационной работе Е.О.Векшиной проанализированы физические процессы, происходящие в пристеночной плазме токамака Глобус-М в режимах с улучшенным удержанием. Анализ этих процессов проведён на основе моделирования двумерным кодом SOLPS-ITER. Моделирование пристеночной плазмы в последние годы очень активно развивается по следующим причинам. Во-первых, при проектировании и строительстве токамаков нового поколения, таких как ИТЭР и DEMO, есть необходимость предсказания потоков энергии на пластины в будущих установках. Во-вторых, развитие диагностических методов исследования пристеночной плазмы расширяет базу экспериментальных данных. Моделирование плазмы, основанное на экспериментальных измерениях, позволяет анализировать физические процессы в пристеночной плазме. Таким образом, тема представленного исследования **актуальна и практически значима.**

Текст диссертации состоит из введения, четырёх глав и заключения, и представляет собой законченное исследование. Введение описывает некоторые аспекты современных исследований пристеночной плазмы, имеющие отношение к данной работе: появление экспериментального скейлинга ширины обдирочного слоя на основе экспериментальных данных, полученных на разных токамаках; эвристическую модель неоклассического обдирочного слоя Голдстона; код SOLPS-ITER для моделирования пристеночной плазмы токамаков; особенности моделирования пристеночной плазмы сферических токамаков кодом SOLPS-ITER; протекание токов в объёме пристеночной плазмы. В первой главе проанализирована зависимость ширины диверторного («обдирочного») слоя от тока плазмы для разрядов в режиме улучшенного удержания на основе моделирования кодом SOLPS-ITER пристеночной плазмы токамака Глобус-М. Рассмотрены разряды с током плазмы в диапазоне от 100 до 200 кА. Такие величины тока плазмы не вошли в международную базу данных, по которой был построен скейлинг зависимости ширины обдирочного слоя от тока плазмы, и, таким образом, расширяют международную базу данных. Во второй главе описана теоретическая модель неоклассического диверторного слоя В.А. Рожанского и Е.Г. Кавеевой и приведены результаты моделирования с подавленным турбулентным переносом, подтверждающие теоретическую модель. Ширина диверторного слоя, полученная в моделировании, оказалась того же порядка, что величина, предсказанная в теоретической модели. Третья глава посвящена сравнительному анализу двух разрядов с разной геометрией магнитных силовых линий – симметричного разряда с двумя X-точками на одной сепаратрисе и разряда с двумя сепаратрисами и одной активной X-

точкой. Сравнение выполнено на основе результатов моделирования двух разрядов токамака Глобус-М. В последней главе описано протекание токов в разрядах с одной активной X-точкой. **Достоверность полученных** результатов следует из согласия результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными, использования для моделирования кода SOLPS-ITER, проверенного на многих токамаках, и схожести полученных в моделировании величин токов на диверторные пластины и измеренных экспериментально величин токов на диверторные пластины токамаков Глобус-М и ASDEX-Upgrade.

Следующие результаты анализа моделирования, приведенные автором, были **получены впервые**: подтверждение обратной зависимости ширины диверторного слоя от тока плазмы для значений тока плазмы 100-200 кА; выявление неоклассической природы радиального тока, обнаружение слабой зависимости ширины диверторного слоя от геометрии разряда токамака Глобус-М.

Работа, проделанная автором, является практически значимой, поскольку (а) дополняет международную базу данных зависимости ширины диверторного слоя от тока плазмы, а также демонстрирует, что (б) неоклассические механизмы поперечного переноса в области незамкнутых силовых линий создают диверторный слой конечной ширины, и (в) код SOLPS-ITER воспроизводит результаты экспериментальных измерений тока на диверторные пластины.

Основные результаты, представленные в диссертации, достаточно полно описаны в девяти статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, и доложены на пяти международных конференциях. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

При прочтении работы возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе не приведены (или я не заметил?) значения ионной теплопроводности поперёк магнитного поля. В то же время, делается утверждение, что поперечные потоки тепла в ионах значительно меньше электронных (стр. 37, 41). Температуры ионов и электронов на сепаратрисе близки (ср. рис. 1.4 и 1.7). Это предполагает относительно малую величину ионной теплопроводности в расчётах. Какова эта величина и каковы основания для её выбора?
2. В качестве каналов выноса энергии из плазмы указаны кинетическая энергия частиц, падающих на стенку, и излучение (стр. 22). Однако есть ещё потенциальная энергия ионизации, выделяющаяся при рекомбинации ионов и электронов на стенке. Учитывались ли эти потери каким-то образом?
3. Почему полный радиальный поток энергии, рис. 2.9, возрастает от внутренней границы сетки к сепаратрисе? Каков источник энергии в этой области?

4. Почему характерная ширина диверторного слоя L_n в режиме с пониженными коэффициентами переноса больше, чем в базовом режиме (стр. 46)?
5. Непонятно, почему полоидальная компонента аномального тока равна нулю (стр. 66).

Однако указанные замечания не снижают общего высокого мнения о представленной работе. В соответствии со сказанным выше считаю, что диссертация «Моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель, Елена Оскаровна Векшина, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Официальный оппонент



Андрей Серафимович Кукушкин,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, площадь академика Курчатова, дом 1,
Телефон: +7 963 688 9889,
e-mail: ank755@gmail.com

22.11.2021

Подпись А.С. Кукушкина заверяю:

Главный учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



И.И. Ерёмин