

Отзыв

официального оппонента Аскинази Л.Г.

на диссертационную работу 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.

Диссертация Векшиной Е.О. посвящена численному моделированию пристеночной области сферического диверторного токамака Глобус-М. **Актуальность** темы обусловлена, с одной стороны, необходимостью предсказать, и по возможности найти пути минимизировать плотность потока энергии из плазмы на элементы конструкции будущего термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы, в частности – сооружаемого в настоящего времени первого токамака-реактора ИТЭР. С другой стороны, имеющиеся в данный момент экспериментальные данные и аналитические модели структуры периферийной (диверторной) плазмы весьма ограничены. Поэтому возникает необходимость в численном моделировании SOL с аккуратным учетом множества различных физических процессов в этой области.

Важным достоинством работы является то, что моделирование проведено для набора конкретных разрядов диверторного токамака Глобус-М, для которых известны многие параметры как основной, так и периферийной плазмы. Это позволило автору обеспечить **достоверность** полученных результатов, верифицировать использованные методы и подходы и, таким образом, повысить обоснованность применения разработанных моделей в будущем.

В первой главе диссертации описаны результаты моделирования пристеночной плазмы пяти разрядов в режиме улучшенного удержания токамака Глобус-М, выполненного на основе экспериментальных данных. По результатам моделирования проделан анализ каналов потерь энергии из разряда. Показано, что относительная доля интегрального потока энергии на каждую диверторную пластину зависит от геометрии разряда. Сравнение различных каналов потерь и ширины обдирочного слоя для различных разрядов проведено на токамаке Глобус-М **впервые**.

Во второй главе описано моделирование с пониженными коэффициентами переноса, не основанное на реальном разряде, а выполненное для проверки аналитической модели Рожанского и Кавеевой о неоклассическом механизме формирования обдирочного слоя. Ширина обдирочного слоя, вычисленная по результату моделирования оказалась

близкой величине обдирочного слоя, вычисленной в рамках аналитической модели. Таким образом, моделирование подтвердило модель неоклассического обдирочного слоя, поскольку расчёты кодом SOLPS-ITER более аккуратно учитывают неоклассические процессы, чем аналитическая модель.

В третьей главе приведено сравнение двух разрядов в разной конфигурации. Один разряд с двумя сепаратрисами и одной активной X-точкой, другой разряд с одной сепаратрисой и двумя X-точками на ней. Сравнением разрядов в разных конфигурациях занимаются на многих современных токамаках. Однако, сравнение ширины обдирочного слоя разрядов с разной геометрией магнитных поверхностей проведено впервые.

В четвёртой главе описаны токи, протекающие в объёме пристеночной плазмы, полученные в результате моделирования. Протекание токов влияет на распределение потенциала и формирует электрическое поле в пристеночной плазме. Токи, вытекающие на диверторные пластины могут быть измерены экспериментально диверторными зондами. Сравнение результатов моделирования с полученными экспериментальными данными подтвердило схему протекание токов, полученную при моделировании.

Результаты, полученные в диссертации, обладают **практической значимостью** – сравнение энергетических нагрузок в разных режимах работы дивертора проводится на многих токамаках с целью выбора оптимальной конфигурации, позволяющей снизить нагрузку на пластины, не ухудшая состояние плазмы в центральной зоне удержания. Прделанная работа по сравнению разрядов в конфигурации с двумя сепаратрисами и симметричной конфигурации с двумя X-точками на одной сепаратрисе вносит вклад в международные исследования различных конфигураций.

Описанная в четвёртой главе диссертации схема замыкания радиального тока в объёме плазмы токами на пластины имеет практическое значение, поскольку протекание тока с пластины в плазму в обдирочном слое вблизи максимума плотности потока энергии на пластины дополнительно увеличивает поток энергии и должно быть учтено при определении нагрузок на пластины.

Замечания по тексту диссертации:

1. В качестве обоснования применения стационарного кода B2SOLPS5.2 на стр.12. приводится сравнение скинового времени t_{ksin} и длительности стационарной части разряда токамака Глобус-М (~40ms) и показано, что $t_{ksin} \sim 3ms \ll 40ms$. К этой оценке имеются вопросы. Во-первых, не понятно, для каких параметров разряда токамака Глобус-М получено значение скинового времени $t_{ksin} \sim 3ms$. По оценкам

оппонента, для значений электронной температуры $T_e \sim 500$ eV, эффективного заряда $Z_{eff} = 2$ и поперечного размера плазмы $L \sim 25$ см, используя Спицеровское сопротивление плазмы $2.8 \cdot 10^{-8} Z_{eff} \cdot T_e^{-3/2}$, Ohm m, можно получить $t_{ksin} \sim 500$ ms, что значительно превышает оценку, приведенную в диссертации. Во-вторых, следует пояснить, почему для обоснования применимости стационарного расчета необходимо использовать именно скиновое время (время проникновения тороидального тока и полоидального магнитного поля в плазму), а не, например время, характеризующее процессы диффузии $\sim L^2/D$, где D – эффективный коэффициент диффузии.

2. Выражения для проводимости плазмы, использованные в оценках на стр. 12 и 17, отличаются множителем 0.51. Такое различие обычно возникает при сравнении поперечной и продольной проводимости полностью ионизованной плазмы в магнитном поле, однако в обоих случаях, очевидно, речь идет о продольной проводимости, и поэтому использование разных выражений для нее требует пояснений.
3. На рис. 1.23, стр. 32., приведена аппроксимация ширины области SOL от тока плазмы для пяти разрядов функцией вида αI^β , и утверждается, что наилучшая аппроксимация достигается при $\beta=1.2$. Однако, как кажется, аппроксимация вида $\alpha - \beta I$ могла бы быть не хуже. Следовало бы привести величину среднеквадратичного отклонения для разных аппроксимирующих функций и их параметров.
4. В выводах к главе 1 на стр.33. сказано, что результаты моделирования хорошо воспроизводят экспериментальные данные о зависимости ширины зоны SOL от тока плазмы, однако на выше указывается, что «...экспериментальное определение по профилю температуры затруднено, поскольку обычно положение сепаратрисы экспериментально известно с погрешностью порядка ширины SOL...». В результате, не понятно, что же именно хорошо воспроизводится в расчете.
5. В тексте диссертации (стр. 35 и др.) имеются два списка литературы, один – список трудов автора, другой – цитируемые по ходу изложения источники. Оба списка имеют одинаковый простой формат нумерации, из-за чего не всегда ясно, на что именно ссылается автор - на свою собственную публикацию, или на литературные данные. Например, на стр. 35 два раза упоминается №7 из списка литературы, причем, видимо, имеются в виду две различные публикации.
6. Не всегда понятна логика построения текста диссертации. Так, результаты моделирования радиального тока в области SOL приводятся уже в Главе 2,

параграф 2.4, а описание использованных методов и подходов, и дополнительные результаты – только в Главе 4.

Указанные недостатки не вызывают сомнений в высоком уровне диссертации и не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация представляет собой законченное исследование, результаты которого опубликованы в 9 статьях в российских и зарубежных реферируемых научных журналах. Текст автореферата полно отражает основное содержание диссертации. Считаю диссертацию удовлетворяющей требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней в ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а соискатель Векшина Елена Оскаровна заслуживает присуждения искомой степени.



Официальный оппонент
доктор физико-математических наук

Леонид Георгиевич Аскинази

с.н.с. лаборатории физики высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе