

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бахарева Н.Н.

**"Поведение быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М",
представляемой на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук**

Диссертация посвящена одной из важных проблем управляемого термоядерного синтеза – исследованию нагрева плазмы пучками быстрых нейтралов в сферических токамаках (СТ). Такая проблема имеет ряд особенностей:

- в сферических токамаках она меньше исследована, чем в классических. Ряд особенностей СТ, определяемых сильным изменением магнитного и электрического поля по сечению плазменного шнура, делает эту задачу более сложной;
- имеется установка (СТ Глобус-М), уникальная по плотности вкладываемой в плазму мощности нагрева, на которой можно провести основные экспериментальные исследования и сравнить их с моделями;
- есть необходимость экстраполяции данных на параметры плазмы при нагреве пучками в Глобус-М2 и, в перспективе, в Глобус-М3.

Диссертанту удалось внести вклад в весь комплекс возникающих проблем: подготовлены соответствующие коды; модернизирована диагностика; на Глобус-М проведены эксперименты в широком диапазоне изменения параметров; изучено влияние неустойчивостей на взаимодействие пучка с плазмой; расчёты по разработанным кодам показали на хорошее соответствие с экспериментами. Это позволило сделать обоснованный прогноз для Глобус-М2 и помочь в выборе параметров этой установки.

Многолетние исследования, проделанные диссертантом, получили одобрение международного сообщества, что позволяет высоко оценить саму работу, уровень диссертанта и подчеркивает актуальность и новизну работы.

К тексту автореферата имеется ряд замечаний.

1). Стр. 12, параграф 2.3.

Утверждается, что *«Трёхмерный алгоритм позволяет вычислять орбиты ионов без приближений, путём решения уравнения движения в электрическом и магнитном полях»*.

Такое общее утверждение нуждается в детализации и пояснениях. Так, можно допустить, что диссертант учёл вихревое (*тороидальное*) электрическое поле. Однако, возможность корректного учёта *радиального* электрического поля, связанного с амбиполярной диффузией плазмы, уже вызывает вопросы. А учёт электрических полей, возникающих из-за прямых потерь быстрых ионов на стенках камеры (а доля прямых потерь в Глобус-М велика), по-видимому, вообще находится за пределами возможностей существующих моделей.

2). Стр. 13, рисунок 2.

На рисунке приведены расчёты спектров атомов перезарядки по кодам «NUBEAM» и «3D tracking+Boltzmann Eq.» и данные эксперимента. Однако, нет пояснения - в чём отличие результатов расчётов по указанным кодам в области низких энергий (< 6 кэВ).

3). На стр. 13 – 14 по результатам экспериментов (и, возможно, расчётов) сделано несколько утверждений, а именно:

- потери с первой орбиты сильно зависят от тока плазмы I_p и слабо – от тороидального поля B_t ;

- потери быстрых ионов при инжекции водорода ниже, чем при инжекции дейтерия.

По нашему мнению, оба эти утверждения являются простым следствием из соотношения для т.н. критического тока I_{cr} , характеризующего роль прямых потерь быстрых ионов в плазме токамака (если критический ток сравним или превышает ток плазмы, то прямые потери велики). Соотношение для I_{cr} получено в обзоре С.В. Путьвинского (Вопросы теории плазмы, Вып.19, М., ЭАИ, 1990). Для параметров Глобус-М ($A = 1.5$, $k = 1.7$) критический ток I_{cr} имеет следующую зависимость от энергии быстрых частиц E_b и их относительной массы A_b

$$I_{cr} = 40 \cdot (E_b \cdot A_b)^{1/2} \quad [kA, keV] \quad (1)$$

Из этого соотношения и следуют указанные выше утверждения. Так, для водорода при энергии частиц 20 кэВ критический ток составляет 180 кА, для дейтерия – уже 250 кА. В результате, при токе плазмы 200 кА водородные быстрые частицы должны удерживаться лучше, чем дейтериевые. Отметим, что магнитное поле в соотношение для критического тока вообще не входит.

4). Стр. 15, рисунок 4.

Диссертант приводит зависимость прямых потерь надтепловых частиц при разных значениях тороидального поля.

В соответствии с предыдущим замечанием, этот график лучше приводить при разных значениях *тока плазмы*, а не тороидального магнитного поля (от которого, как указано, зависимость слабая). Т.е. на графике вместо 0.4 Тл написать 200 кА, а вместо 1 Тл – 500 кА. Тем более, что на самом графике есть приписка $q = \text{const}$, т.е фактически речь идёт именно о токе плазмы, а не о величине тороидального магнитного поля.

5). В списке цитированной литературы написано:

Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции
/под ред. В.А. Лешковцева, Б.Л. Лифшица...

Фамилии этих *не научных, а технических* редакторов нужно опустить. Академик Арцимович не потерпел бы научного редактирования.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы. Представленный в автореферате материал позволяет получить достаточно полное представление о результатах исследований и свидетельствует о высоком научном уровне работы.

Николай Николаевич Бахарев заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник
АО «НИИЭФА»,
канд. физ.-мат. наук

А.Б. Минеев

Научный руководитель
АО «НИИЭФА»
доктор физ.-мат. наук

О.Г. Филатов

*Адрес: дор. на Металлоостров, 3, пос. Металлоостров, 2.
Санкт-Петербург, 196641
тел.: 8 (812) 464-79-80*