

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Днестровского Алексея Юрьевича, с.н.с. лаб. геохимии углерода ГЕОХИ РАН, на диссертационную работу Бахарева Николая Николаевича "Поведение быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

### **Актуальность темы диссертации**

Исследование поведения быстрых частиц актуально для разработки нейтронных источников, которые рассматриваются сейчас как одно из самых важных приложений установок токамак. В таких установках реакция синтеза с выделением нейтронов в основном реализуется на взаимодействии тепловой компоненты плазмы и быстрых частиц. Нейтронные источники такого типа имеют достаточно высокий нейтронный выход и могут быть использованы в ядерной энергетике (гибридные реакторы, наработчики и дожигатели ядерного топлива) и для исследования материалов для будущих термоядерных установок. Эти проекты разрабатываются в ряде стран, в частности в России. Кроме того, сейчас активно развивается линия сферических токамаков, на которых достигнуты неплохие параметры по удержанию частиц и энергии плазмы. Проект нейтронного источника на основе сферического токамака ТИН-СТ, разработанный в Курчатовском институте, имеет геометрические параметры, близкие к параметрам Глобус-М. Поэтому эксперименты на сферическом токамаке Глобус-М, в частности, изучение поведения быстрых частиц, безусловно актуальны для обоснования физики данного проекта. На основании изложенного тема диссертационной работы Н.Н.Бахарева представляется актуальной, имеющей важное значение для науки и практики

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Новизна диссертационной работы заключается в использовании данных эксперимента на сферическом токамаке Глобус-М для изучения поведения быстрых частиц. Для этого был разработан код, рассчитывающий траектории

быстрых частиц и их потери из плазмы. Внедрен код NUBEAM для описания спектров быстрых частиц и также учитывающий потери. Проведено сопоставление результатов расчетов по двум кодам и их сравнение с экспериментальными спектрами, полученными с помощью анализатора вылетающих из плазмы атомов.

К числу основных новых результатов диссертации следует отнести:

- получение зависимостей удержания быстрых частиц от величин магнитного поля и тока плазмы, величины зазора плазма-стенка в сферическом токамаке Глобус-М;
- исследовано влияние пилообразных колебаний и алфвеновских мод на удержание быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М;
- исследованы потери быстрых частиц инжекции пучка горячих атомов против тока плазмы

Все представленные результаты получены лично автором или при его активном участии.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений**

Результаты эксперимента и моделирования обладают высокой степенью надежности. Используемые экспериментальные данные получены на многократно проверенном диагностическом оборудовании. Данные по нейтронному потоку и по спектру атомов перезарядки не противоречат друг другу. Для расчетов используется общеизвестный и проверенный код NUBEAM. Результаты моделирования не противоречат эксперименту. Результаты моделирования по двум независимым кодам сравниваются между собой и их расхождения объясняются различием физических эффектов, по-разному учитываемых в используемых кодах.

### **Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научная значимость результатов заключается в развитии методов подхода к изучению поведения быстрых частиц в токамаках.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования для предсказания поведения быстрых частиц в проектируемых установках, таких как Глобус-М2 и Глобус-М3.

### **Замечания по диссертационной работе в целом**

1. Ф-ла 2.45 для усреднения скоростного коэффициента приведена неверно, в ссылке [48], приведенной в диссертации, эта формула имеет другой вид.
2. Ф-ла 2.48 для потока атомов в определенный канал детектора имеет неверные пределы интегрирования, а подынтегральное выражение не содержит дифференциала.
3. В диссертации получен профиль эмиссии атомов энергии 18кэВ вдоль линии наблюдения атомарного анализатора, представленный на рисунке 2.7. Как справедливо отмечается в тексте, данный сигнал зависит не только от плотности быстрых частиц, но и от плотности нейтралов, на которых перезаряжаются эти 18-кэВные частицы. Нейтралы поступают в плазму со стенки (тепловые нейтралы) и с пучком (горячие нейтралы), причем последние, перезаряжаясь, формируют гало тепловых нейтралов вокруг пучка. Для ясного понимания сигнала анализатора необходимо было бы оценить вклад всех компонент нейтралов в сигнал анализатора.
4. Из сигналов падения нейтронного выхода и падения потока нейтралов перезарядки 28.5кэВ при развитии альфвеновской моды, показанных на рисунках 3.19 а и б, делается справедливый вывод, что потоки атомов перезарядки в области энергии инжекции уменьшаются значительно сильнее. И далее идет толкование этого эффекта, что быстрые частицы этой энергии теряются не совсем, а уходят из поля зрения анализатора. Непонятно, зачем такое толкование и на чем оно основано. Даже если эти частицы теряются совсем, противоречия между 3.19а и 3.19б не будет, т.к. вклад в нейтронный выход дают также быстрые частицы, которые не имеют потерь, но с меньшей энергией. Можно было бы рассчитать падение нейтронного выхода по падению спектра быстрых частиц, как на рис 3.18а. Понятно, что нейтронный выход упадет меньше, чем поток атомов с энергией инжекции.

## **Общая характеристика диссертационной работы**

В целом, несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию в выступлениях на семинарах и конференциях, опубликованы в 7 статьях в реферируемых журналах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям к диссертациям, указанным в постановлении Правительства Российской Федерации "О порядке присуждения ученых степеней", а ее автор – Бахарев Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина  
и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической  
химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)  
Россия 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д.19.

Телефон: 7(499) 137-14-84, E-mail: [dnestrov0@gmail.com](mailto:dnestrov0@gmail.com)

Днестровский Алексей Юрьевич  
3 апреля 2017

Подпись Днестровского Алексея Юрьевича ЗАВЕРЯЮ  
Ученый секретарь Ученого совета ГЕОХИ РАН

Коробова Е.М.