

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора

" "

"05" февраля 20 18 г.

### **О Т З Ы В**

ведущей организации на диссертацию Сладкомедовой Алсу Данияловны «Исследование радиационных потерь сферического токамака Глобус-М», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

#### **Актуальность диссертации**

Диссертация Сладкомедовой А.Д. посвящена исследованию радиационных потерь плазмы в сферическом токамаке Глобус-М. Актуальность проведенных исследований поведения радиационных потерь определяется тем, что потери из центральных областей плазмы снижают ее температуру и уменьшают выход термоядерной реакции. Увеличение выхода термоядерной реакции является одной из основных задач управляемого термоядерного синтеза для создания реакторов с целью выработки энергии. С другой стороны, потери с периферии играют положительную роль, поскольку снижают поток энергии на диверторные пластины и уменьшают их распыление. Поэтому радиационные потери являются одним из ключевых факторов в прогнозировании параметров будущих реакторов на основе токамаков, а также гибридных реакторов по схеме «синтез-деление».

#### **Общая структура диссертации**

Первая глава посвящена обзору отечественных и зарубежных исследований влияния радиационных потерь на энергобаланс плазмы в установках токамак. Рассмотрено влияние содержания примесей на параметры будущего термоядерного реактора. Обзор сделан достаточно полно и квалифицировано.

Во второй главе диссертации подробно рассмотрены теоретические основы различных типов радиационных потерь из плазмы и диагностики измерения мощности излучения плазмы, используемые в магнитных ловушках.

В третьей главе приведены параметры сферического токамака Глобус-М и описан развитый автором комплекс детекторов для исследования радиационных потерь на токамаке Глобус-М. Приведены характеристики детекторов, используемых для измерения радиационных потерь, как одноканальных, так и многоканальных систем, и выбор конфигурации для многоракурсных наблюдений. Автором разработан алгоритм реконструкции локального распределения радиационных потерь из плазмы и продемонстрирована его работоспособность путем тестирования на модельных профилях.

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования радиационных потерь в зависимости от параметров плазмы и обсуждаются причины наблюдаемого поведения радиационных потерь. Приведены результаты восстановления двумерного экспериментального профиля радиационных потерь плазмы и моделирования переноса основных частиц плазмы, тепла и углерода в токамаке Глобус-М.

### **Основные результаты работы**

В ходе выполнения работы был разработан и установлен на токамак Глобус-М уникальный диагностический комплекс для измерения радиационных потерь плазмы. Комплекс позволяет измерять радиационные потери по всему сечению токамака, включая диверторную область. Данная диагностика позволяет измерять радиационные потери плазмы в диапазоне энергий квантов от 1 эВ до 15 кэВ. Многоканальные детекторы позволяют измерять пространственное распределение радиационных потерь. Сладкомедовой А.Д. был разработан алгоритм для реконструкции двумерного распределения мощности излучения плазмы в полоидальном сечении токамака. Важно отметить, что разработанный алгоритм позволяет

восстанавливать локальные потери даже в таких особых областях, как дивертор, где потери могут быть велики и сильно локализованы. С помощью алгоритма автором были получены экспериментальные двумерные профили радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М.

Особо следует отметить важную работу по оценке распределения потерь по спектру с помощью нескольких фильтров. Это позволило разработать две методики для коррекции неоднородности спектральной чувствительности полупроводниковых детекторов. Разработанная методика позволила учесть спектральную вариацию чувствительности детекторов и получить более надежные данные по радиационным потерям.

Было проведено сравнение радиационных потерь в полностью графитовой камере и в камере с установленными вольфрамовыми элементами в диверторе. Была также прослежена эволюция во времени пространственного и спектрального распределений потерь после проведения боронизации.

В работе приведены результаты исследования зависимости радиационных потерь из основного объема плазмы от электронной плотности, изотопного состава, методов нагрева плазмы, тока и тороидального магнитного поля плазмы.

В результате проведенного в работе моделирования переноса основной плазмы и потока тепла определено влияние радиационных потерь на оценку эффективной электронной температуропроводности плазмы и времени удержания энергии. Изучены характеристики собственной примеси плазмы (углерода) в плазме токамака Глобус-М.

**Практически значимым результатом** работы является оснащение токамака Глобус-М диагностическим комплексом радиационных потерь. Особо следует отметить, что было выбрано оптимальное расположение и число каналов для возможности определения радиационных потерь не только в центральных областях плазмы, но и в диверторе. Также был разработан уникальный код для реконструкции двумерного распределения мощности

излучения плазмы, который позволяет получать экспериментальное распределение радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М по всему сечению токамака, включая дивертор.

**Научная значимость** работы состоит в получении новых данных о поведении радиационных потерь плазмы в зависимости от электронной плотности, тока, магнитного поля плазмы, метода нагрева и положения плазменного шнура относительно стенки токамака. Данные о радиационных потерях в зависимости от тока плазмы и тороидального магнитного поля могут быть использованы для прогнозирования параметров плазмы в будущей установке с увеличенным полем.

### **Новизна полученных результатов**

1. Впервые на сферических токамаках разработана и установлена диагностика мощности излучения плазмы, основанная на наборе линеек SPD (Silicon Precision Detector) и дискретных фотодиодах SPD, регистрирующих излучение в различных спектральных диапазонах.
2. Впервые на сферических токамаках экспериментально исследованы зависимость мощности излучения плазмы от электронной плотности, тока плазмы, тороидального магнитного поля, расстояния между плазмой и стенкой, режимов нагрева плазмы, изотопного состава плазмы, а также вклад нескольких энергетических диапазонов в пределах от 1 эВ до 15 кэВ в полные радиационные потери.
3. Впервые на сферических токамаках получено экспериментальное двумерное распределение радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака. В частности, впервые для условий компактного сферического токамака Глобус-М разработан и применен алгоритм для реконструкции двумерного профиля радиационных потерь в полоидальном сечении плазмы на основе хордовых измерений в 280 каналах.
4. Впервые на компактном сферическом токамаке Глобус-М проведено исследование влияния экспериментально измеренных радиационных потерь

плазмы на оценку коэффициента электронной температуропроводности и времени удержания энергии.

5. Впервые на токамаках проведено исследование радиационных потерь плазмы при формировании профиля плотности посредством инъекции быстрой плазменной струи в основную плазму.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается тем, что результаты выполненных многоканальных измерений радиационных потерь плазмы находятся в хорошем соответствии с ранее полученными одноканальными измерениями на токамаке Глобус-М. Уровень примесей, полученный в результате измерения радиационных потерь и моделирования, хорошо соответствует экспериментальным измерениям проводимости плазмы. Полученные зависимости радиационных потерь от параметров плазмы на токамаке Глобус-М не противоречат результатам с токамаков NSTX, JT-60U, JET, ASDEX. Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в реферируемых журналах, доложены на российских и международных конференциях, а также на семинарах лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе и лаборатории физики улучшенного удержания плазмы токамаков Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

**Имеются следующие замечания по диссертации:**

1. В работе исследуются зависимости потерь от различных параметров разряда. Известно, что радиационные потери сильно зависят от степени очистки камеры токамака. Однако автором не приведена методика очистки камеры, которая бы обеспечивала воспроизводимость результатов в различных сериях измерений. На возможность такого разброса указывают данные рис. 4.18, стр. 119, где наблюдаются вариации в 3—4 раза.
2. В работе не указано, что основные результаты были получены в боронизированной камере.

3. Радиационные потери оценивались с помощью полупроводниковых детекторов с неоднородной спектральной чувствительностью. Хотя автором и были проведены специальные эксперименты по учету этой неоднородности, однако спектральная характеристика бралась от фирмы изготовителя. Тем не менее известно, что даже малые напыления в процессе работы токамака могут значительно снижать чувствительность детекторов в области малых энергий. В этом плане желательно было бы провести сравнение с такими детекторами, как пирозлектрические с равномерной спектральной чувствительностью.
4. Хотя в работе и приводится обзорный спектр излучения плазмы, однако нет никаких абсолютных измерений интенсивностей спектральных линий. В описании методик упомянута диагностика CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy), но нет результатов по примесям. Такие данные существенно увеличили надежность моделирования.
5. В работе также есть ряд неточностей и опечаток. Так на стр. 35 написано «радиоактивный» вместо «радиационный». На стр. 110 не указано, в каком разряде была диверторная и лимитерная конфигурация. На стр. 114 Рис. 4.10 в) в подписи написано профили температуры, а приведены плотности.

### **Заключение**

Приведенные недостатки и замечания не умаляют ценность и значимость работы. Автором проведен большой объем работ и получены важные результаты по радиационным потерям из плазмы. Можно отметить, что работа выполнена на высоком научном уровне. Результаты работы по исследованиям радиационных потерь плазмы токамака являются актуальными и представляют научный интерес. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационное исследование Сладкомедовой А.Д. на тему «Исследование радиационных потерь сферического токамака Глобус-М», выполнено на высоком уровне, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, указанным в Положении о

присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составил  
доктор физико-математических наук,  
доцент, начальник лаборатории

Вершков  
Владимир  
Александрович

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен в Блоке термоядерных исследований Курчатовского ядерно-технологического комплекса НИЦ «Курчатовский институт» 29.01.2018 г.

Руководитель

Блока термоядерных исследований  
Курчатовского ядерно-технологического  
Комплекса НИЦ «Курчатовский институт»

Романников  
Александр Николаевич

Ученый секретарь  
Блока термоядерных исследований  
Курчатовского ядерно-технологического  
комплекса НИЦ «Курчатовский институт»  
кандидат физико-математических наук, доцент

Кузнецова  
Лариса Константиновна

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»  
кандидат физико-математических наук

Стремоухов  
Сергей Юрьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
НИЦ «Курчатовский институт»  
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 .  
<http://www.nrcki.ru>  
Телефон: +7(499) 196 95 39  
Факс: +7(499) 196 17 04  
Электронная почта: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)