



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**«НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»**

(АО «НИИЭФА»)

---

196641, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, дорога на Металлострой, дом 3

Телефон: (812) 464-44-70, факс: (812) 464-46-23, <http://www.niiefa.spb.su>

ОКПО 008626377, ОГРН 1137847503067, ИНН / КПП 7817331468 / 781701001

№ \_\_\_\_\_

На № 11217 от 28.11.2017

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

Акционерного Общества

«НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

\_\_\_\_\_ А.В. Ванин

«29» 11 2017 г.

### **Отзыв ведущей организации**

Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

на диссертационную работу Мельника Андрея Дмитриевича

"Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной  
инжекции методом корпускулярной диагностики",

представленную на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

### **Актуальность темы диссертации**

Работы по управляемому термоядерному синтезу являются одним из приоритетных направлений научных исследований, проводимых в наиболее развитых странах Мира. Изучение поведения плазмы в токамаках

представляется в данный момент неотъемлемой частью этих работ. Диссертация А.Д. Мельника посвящена исследованию ионного компонента плазмы и, таким образом, находится в рамках указанной актуальной тематики работ по управляемому термоядерному синтезу.

Исследования были проведены на нескольких токамаках: Глобус-М, ТУМАН-3М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия) и COMPASS (ИФП, Чехия). При этом работы на токамаке COMPASS имеют прямое отношение к расчетам режимов работы крупнейшего строящегося термоядерного реактора ИТЭР, а исследования на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М направлены на развитие физики плазмы компактных и, в частности, сферических токамаков.

Исследования поведения ионов, описываемые в диссертации проводились в режиме работы установок при дополнительном нагреве методом нейтральной инжекции. В настоящий момент осуществление управляемого термоядерного синтеза в токамаках без применения нейтральной инжекции считается трудноосуществимым, а создание гибридных реакторов принципиально основано на применении мощных пучков атомов. Таким образом, следует отметить, что представленные в диссертации исследования, являются актуальными с точки зрения программы, направленной на осуществление управляемого термоядерного синтеза.

В качестве основного метода исследования автор использует метод, основанный на применении корпускулярной диагностики. Начиная с первых плазменных экспериментов на токамаках корпускулярная диагностика зарекомендовала себя как надежный и достоверный инструмент изучения ионного компонента плазмы. Следует отметить, что этот диагностический метод в настоящее время применяется на крупнейших токамаках, а также будет использован и на строящемся токамаке ИТЭР. Таким образом, можно сделать вывод, что для решения поставленных в диссертации задач автор пользуется современной методикой исследований.

## Полученные результаты и их новизна

1. Разработан новый анализатор атомов перезарядки АКОРД-24М. В диссертации проведено сравнение основных параметров вновь созданного анализатора АКОРД-24М и ранее разработанной модификации АКОРД-24. Показано, что новый прибор обладает эквидистантным шагом каналов по энергии и улучшенным до 10% энергетическим разрешением. Благодаря этим особенностям он наилучшим образом подходит для регистрации надтепловых частиц при нейтральной инжекции, так как позволяет получать детальные спектры за меньшее число плазменных разрядов.

2. Модернизированы комплексы корпускулярной диагностики для обеспечения измерений распределений надтепловых частиц на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS. На установке Глобус-М создан уникальный комплекс корпускулярной диагностики на основе двух анализаторов: АКОРД-24М (направлен тангенциально к плазменному шнуру и используется для измерений надтепловых частиц) и АКОРД-12 (направлен перпендикулярно к плазменному шнуру и применяется для измерений потоков атомов в тепловом диапазоне). Созданный комплекс оптимально подходит как для измерений ионной температуры, так и для изучения поведения надтепловых ионов. В работе проведено сравнение трех введенных в действие диагностических комплексов и показано, что для изучения ионного компонента плазмы продуктивнее использовать сочетание двух анализаторов, подобно тому, как это реализовано на токамаке Глобус-М.

3. Впервые на токамаке Глобус-М измерены энергетические распределения надтепловых ионов в режиме с нейтральной инжекцией дейтерия с энергиями

24 – 30 кэВ. Обнаружено, что эти распределения имеют специфическую форму, не наблюдаемую ранее в экспериментах с низкой энергией инжекции. Исследованы основные причины, приводящие к формированию особой функции распределения, и показано, что наблюдаемая форма распределений



является следствием влияния пилообразных колебаний на надтепловые ионы, а также с наличием компонента с энергией  $2/3E_{\text{NBI}}$  в инжекционном пучке.

Обнаружено влияние смещения плазменного шнура по большому радиусу на спектры надтепловых ионов. Сделан вывод об уменьшении потерь мощности нейтральной инжекции при смещении плазменного шнура к центральной колонне токамака.

4. Впервые на токамаке ТУМАН-3М проведены одновременные исследования поведения тепловых и надтепловых ионов в режиме с нейтральной инжекцией. Обнаружено, что при увеличении мощности нейтральной инжекции выше значения 0.3 МВт возникают потери надтепловых частиц, и наблюдается насыщение ионной температуры на уровне 280 эВ.

Проведено изучение поведения тепловых и надтепловых ионов при смещения плазмы по большому радиусу к центру. Обнаружено увеличение популяции надтепловых ионов и рост ионной температуры с 250 эВ до 350 эВ. Указаны две основные причины этого явления: улучшение удержания надтепловых частиц и возрастание времени их торможения.

5. Впервые после запуска токамака COMPASS в ИФП проведены измерения ионной температуры. Получено ее значение в омическом режиме, которое составляет величину около 400 эВ. В режиме с пучковым нагревом зарегистрировано увеличение ионной температуры примерно на 70 эВ. Впервые на этом токамаке измерено энергетическое распределение надтепловых частиц, возникающих в результате действия нейтральной инжекции.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты исследований на плазменных установках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS, представленные в диссертации, имеют научную значимость с точки зрения накопления данных о поведении ионного компонента плазмы в токамаках в режиме с нейтральной инжекцией. Помимо этого работа имеет и практическую значимость. В ходе ее выполнения разработан новый анализатор потоков атомов, а также создан диагностический

комплекс, оптимизированный для одновременных исследований тепловых и надтепловых ионов плазмы.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность представленных в диссертационной работе экспериментальных фактов обеспечена использованием надежных и современных методик измерений, а также повторяемостью результатов. Достоверность ряда выводов базируется на применении расчетных кодов, прошедших верификацию в экспериментах на многих плазменных установках. Результаты исследований, представленные в диссертации, были неоднократно доложены на всероссийских и международных конференциях, а также содержатся в 5 статьях в рецензируемых журналах.

### **Общая оценка содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, она изложена на 168 страницах, содержит 56 рисунков, 3 таблицы и 108 ссылок. Во вводной части определены цели исследования и сформулированы основные положения. В работе имеется обзор литературы по теме исследования. Он представлен в первой главе. В обзоре приводятся основные известные особенности поведения ионов плазмы в условиях нейтральной инжекции. Также проанализированы достоинства и ограничения различных экспериментальных методов изучения ионного компонента.

Результаты исследований, полученные лично автором, представлены в главах со второй по пятую. Вторая глава посвящена разработке нового анализатора АКОРД-24М, а также сравнению его характеристик с анализатором предыдущего поколения АКОРД-24. В третьей главе содержится описание экспериментов и анализ полученных данных на токамаке Глобус-М. В ней представлены результаты исследований влияния пилообразных колебаний на энергетические распределения надтепловых ионов. Четвертая глава посвящена экспериментам на токамаке ТУМАН-3М и содержит две логические части, первая из которых описывает эксперименты по изменению мощности



нейтральной инжекции, а вторая – эксперименты по смещению плазмы. В пятой главе приведены результаты исследований поведения ионного компонента плазмы в экспериментах на токамаке COMPASS. В конце каждой главы подводятся промежуточные итоги. В заключении сформулированы общие результаты работы.

### Замечания

Положительно характеризуя работу в целом, можно сделать следующие замечания:

1. Диссертация, стр. 22.

Написано: *«Для больших установок ( $R > 1$  м) типичные значения энергий пучков составляют сотни кэВ. На токамаке ИТЭР ( $R \approx 3$  м) предполагается использовать пучки с энергией 1 МэВ».*

Приведённые значения больших радиусов установок нужно увеличить грубо в 2 раза. Так, к большим токамакам можно отнести DIII-D с  $R \approx 1.67$  м, а также JET, JT-60U с  $R \approx 3$  м. А большой радиус ИТЭР не 3 м, а 6.2 м.

2. Автореферат, стр. 4.

Написано: *«Важно отметить, что КД является практически прямым методом измерения параметров ионного компонента плазмы».*

Все известные сейчас методы измерения температуры и энергии ионов являются косвенными и при обработке экспериментальных данных требуют выполнения ряда предположений. Так для применимости КД нужно, чтобы плазма была прозрачной для быстрых нейтралов перезарядки, что возможно в небольших токамаках и при невысокой концентрации плазмы. Кроме того, КД не даёт информации о профилях ионной температуры плазмы, а сканирование по радиусу в разных разрядах требует предположения об идентичности серии разрядов. Но и другие диагностики (CHERS, нейтронная) также требуют выполнения определённых предположений о свойствах и поведении плазмы.

В этом смысле выбор установок, на которых проводились измерения с помощью КД и последующий анализ, а именно установок Глобус-М,

Туман-3М и COMPASS оказался очень удачным. Для этих токамаков метод КД оказался наиболее информативным и позволил определить как спектр быстрых атомов, так и оценить ионную температуру плазмы.

3. Одним из важных результатов работы является обнаружение на функции распределения по энергиям компоненты  $2/3E_{NBI}$  в экспериментах на токамаке Глобус-М (инжекция дейтериевого пучка в дейтериевую плазму, как указано на стр. 8 автореферата). Такая компонента  $2/3E_{NBI}$  связывается с диссоциацией иона  $HD^+$  в нейтрализаторе инжектора. В связи с этим возникают два вопроса:

- откуда взялся водород (H) при инъекции дейтерия (D) в дейтериевую (D) плазму?

- существует ли компонента  $2/3E_{NBI}$  в случае инъекции дейтерия (D) в водородную (H) плазму или водорода (H) в дейтериевую (D) плазму?

### Заключение

Диссертационная работа А.Д. Мельника "Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной инъекции методом корпускулярной диагностики" является завершенным научным исследованием по актуальной тематике. Несмотря на сделанные замечания, работа выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Результаты проведенных автором исследований ионного компонента плазмы токамаков представляют как научный, так и практический интерес. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Работа соответствует требованиям ВАК и, в частности, п. 9 "Положений о порядке присуждения ученых степеней" (постановление Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 24.09.2013 года), а ее автор – Мельник Андрей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета  
НТЦ "Синтез" АО "НИИЭФА", протокол № 14 от 29.11.2017 г.

На заседании присутствовало 19 человек. Результаты голосования: "за" –  
19 чел., "против" – нет, "воздержался" – нет.

Отзыв подготовил кандидат физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник  
АО "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова"

Б.В. Люблин

Председатель секции НТС отделения  
НТЦ "Синтез" АО "НИИЭФА"  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
директор отделения НТЦ "Синтез"

В.А. Беляков

Ученый секретарь секции НТС отделения  
НТЦ "Синтез" АО "НИИЭФА"  
кандидат физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник

Б.В. Люблин