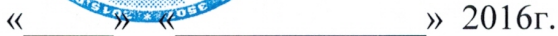


Зам. директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Российской академии наук
д.ф.-м.н. **Лебедев С.В.**



ведущей организации на диссертационную работу
Яковлева Дмитрия Вадимовича

«Экспериментальное исследование ЭЦР нагрева плазмы в газодинамической ловушке»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Диссертация Яковлева Д.В. посвящена экспериментальному исследованию метода электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы в крупномасштабной магнитной ловушке открытого типа, являющейся одной из перспективных систем для удержания плазмы в рамках решения задачи о создании реактора управляемого термоядерного синтеза.

Актуальность исследования ЭЦР нагрева плазмы в открытой ловушке определяется как уникальными возможностями, которые предоставляет данный метод для решения ключевых вопросов физики удержания плазмы в таких системах, так и отсутствием представлений об эффективности данного метода для увеличения термоядерного КПД установки реакторного класса на основе открытой ловушки, с учетом нетривиальных физических и технических особенностей его применения в такой установке.

Одним из ключевых физических вопросов является механизм продольных потерь энергии электронной компонентой плазмы в открытой ловушке. Несмотря на то, что к настоящему моменту была продемонстрирована эффективная термоизоляция плазмы при значениях электронной температуры плазмы 200-300 эВ, установка термоядерного класса на основе открытой ловушки, все же, предполагает существенную экстраполяцию параметров плазмы и определяющий вопрос о достижимости электронной температуры на уровне нескольких кэВ остается открытым.

Вторым вопросом является эффективность данного метода для увеличения термоядерного выхода реактора на основе открытой ловушки с плещущимися ионами. Базовые оценки показывают, что за счет увеличения электронной температуры можно добиться существенного увеличения времени удержания быстрых ионов, определяющих термоядерный выход установки. Однако, вопрос о достижимой эффективности метода ЭЦР нагрева плазмы для увеличения термоядерного выхода также остается открытым и, ввиду сказанного выше, весьма актуальным.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Была экспериментально продемонстрирована работоспособность новой схемы ЭЦР нагрева с наклонным вводом СВЧ-пучка, которая является альтернативой распространенным и трудно реализуемым в установках реакторного класса схемам с продольным вводом излучения или схемам с внутренними зеркалами. Возможность нагрева тепловой компоненты плазмы в крупномасштабной открытой ловушке и достигаемое при этом увеличение времени удержания высокоэнергичных плещущихся ионов, позволяют рассматривать ЭЦР нагрев как один из методов, способных существенно увеличить интенсивность термоядерных реакций в установке следующего поколения с плещущимися ионами. Значения электронной температуры, достигнутые в процессе экспериментов по ЭЦР нагреву, не только превосходят предыдущие значения более чем в три раза, но и позволяют сделать важные выводы о достижимой степени термоизоляции плазмы в открытой ловушке с газодинамическим удержанием плазмы. Результаты работы характеризуют энергобаланс и доказывают принципиальную достижимость параметров плазмы, закладываемых в проекты нейтронных источников на основе открытой ловушки с плещущимися ионами. Наконец, эксперименты с СВЧ-пробоем газа дают возможность полностью обойтись без прямой инжекции плазмы в установку следующего поколения, оснащенной системой ЭЦР нагрева.

Степень достоверности результатов исследования

Большой объем экспериментальных данных, полученных при помощи Томсоновского рассеяния, позволяет с высокой степенью уверенности говорить о влиянии ЭЦР нагрева на электронную температуру плазмы. Более того, в экспериментах было статистически достоверно показано существенное влияние прироста электронной температуры плазмы на удержание высокоэнергичных плещущихся ионов, которое независимо подтверждается несколькими диагностиками, в особенности, детекторами, измеряющими суммарную интенсивность термоядерных реакций в плазме. Возможность создания плазменной мишени при помощи СВЧ-пробоя подтверждается большой статистикой разрядов, в которых такой способ создания начальной плазмы позволил успешно заменить прямую инжекцию плазмы в экспериментах на ГДЛ.

Все разделы диссертации освещались на нескольких международных конференциях по физике плазмы, обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН и были опубликованы или приняты к публикации в рецензируемых журналах.

Новизна полученных результатов

В рамках данной работы впервые экспериментально проверена схема ввода микроволнового излучения в установку открытого типа, основывающаяся на рефракции излучения в плазме. Впервые в крупномасштабной открытой ловушке осуществлен эффективный ЭЦР нагрев тепловой компоненты плазмы, позволивший достичь рекордных для систем такого типа значений электронной температуры, в условиях установления баланса продольных потерь энергии. Более того, было экспериментально доказано, что в системе открытого типа можно добиться существенного увеличения времени удержания высокоэнергичных плещущихся ионов, при этом была оценена эффективность метода ЭЦР нагрева с точки зрения повышения термоядерного выхода установки. Впервые в крупномасштабной осесимметричной открытой ловушке были детально исследованы режимы с СВЧ-пробоем газа для генерации мишенной плазмы, подходящей для старта разряда в установке с мощной нейтральной инжекцией.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Материалы диссертации являются отправной точкой для следующего этапа экспериментов по ЭЦР нагреву плазмы, в которых должен быть использован оставшийся ресурс для оптимизации поглощения СВЧ мощности, что в конечном счете должно привести к дальнейшему увеличению времени удержания высокоэнергичных ионов и электронной температуры плазмы в установке ГДЛ.

Продемонстрированные в экспериментах значения электронной температуры на уровне 1 кэВ в ГДЛ позволяют судить о надежности физики продольного удержания энергии в установках такого типа и доказывают принципиальную возможность создания мощного источника нейтронов на основе открытой ловушки с плещущимися ионами с использованием уже разработанных технологий и в рамках существующих теоретических представлений.

Разработанный метод СВЧ-пробоя для старта разряда в ГДЛ позволяет осуществлять новый класс экспериментов в условиях значительно улучшенных вакуумных условий в торцевых баках ГДЛ и без присущей режимам с дуговым генератором асимметрии потоков плазмы.

Замечания по диссертационной работе

- 1) В главе 4 показаны несколько рисунков, демонстрирующих рост концентрации начальной плазмы под действием СВЧ излучения гиротрона с характерными участками насыщения, начинающимися примерно на последней трети длительности СВЧ импульса. При интерпретации этого явления в диссертации не обсуждается вклад, который может вносить в данное насыщение уменьшение поглощения необыкновенной волны, происходящее с ростом плотности плазмы вследствие уменьшения доли благоприятной поляризации волны, ускоряющей электроны.
- 2) В библиографии диссертации имеется опечатка – публикации под номерами 55 и 57 являются одной и той же работой. При этом в тексте диссертации присутствуют ссылки на оба номера библиографии.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Автореферат диссертации соответствует всем требованиям ВАК и отражает содержание диссертации и опубликованных работ автора.

Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» по пунктам 9 и 10.

Диссертация Яковлева Дмитрия Вадимовича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для физики удержания плазмы в магнитных ловушках открытого типа.

Работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен Савельевым Александром Николаевичем, д.ф.-м.н., снс. лаборатории Физики высокотемпературной плазмы, научная специальность «физика плазмы» 01.04.08.

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

Тел. 812 292-79-27, email alexander.n.saveliev@mail.ioffe.ru



Савельев А.Н.

Доклад Яковлева Д.В., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на заседании семинара лаборатории Физики высокотемпературной плазмы 25 ноября 2016г., протокол № 12. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Председатель семинара лаборатории
Физики высокотемпературной плазмы
д.ф.-м.н., профессор



Е.З.Гусаков

Секретарь семинара



В.А.Токарев