

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора физико-математических наук Скворцовой Нины Николаевны
на диссертацию **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»
в диссертационный совет Д 003.016.03 на базе
ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Актуальность избранной темы

Диссертация Яковлева Д.В. посвящена экспериментальному исследованию метода электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы в крупномасштабной магнитной ловушке открытого типа. В настоящее время такие установки рассматриваются в качестве перспективных технологических систем для создания реактора удержания плазмы при управляемом термоядерном синтезе (УТС) и источника нейтронов. Метод ЭЦР нагрева и создания успешно применяется на многих установках УТС тороидального типа (например, токамаках Т-10, ЛЕТ, ADDEX и стеллараторах Л-2М, TJ-II, LHD) для создания и нагрева плазмы. Но подобных успешных экспериментов по созданию и нагреву плазмы на магнитной ловушке открытого типа ранее проведено не было.

Актуальность экспериментального исследования ЭЦР нагрева и создания плазмы в газодинамической ловушке (ГДЛ) связана с решением принципиального вопроса об эффективности данного метода для магнитных ловушек открытого типа. К настоящему моменту в таких установках была продемонстрирована эффективная термоизоляция плазмы при значениях электронной температуры плазмы 200-300 эВ. Сценарии увеличения электронной температуры плазмы до уровня нескольких кэВ в открытых ловушках не ясны, в то время как такие температуры электронов уже получены на многих токамаках и стеллараторах при помощи дополнительного ЭЦР нагрева с использованием гиротронных СВЧ комплексов. В открытой ловушке не были ранее проведены эксперименты ни по изменению времени удержания быстрых ионов за счет увеличения электронной температуры плазмы до этих значений, ни по изучению механизма продольных потерь энергии электронной компонентой плазмы. Следующий вопрос о создании мишенной плазмы для последующего дополнительного нагрева нейтральными пучками также является актуальным (такой сценарий развития плазменного разряда активно был применен ранее на стеллараторе LHD).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным анализом и систематизацией экспериментальных данных, а также их соответствием результатам численного моделирования изучаемых процессов в плазме.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных экспериментальных характеристик не вызывает сомнения. Эксперименты были проведены в течение нескольких экспериментальных кампаний, базы данных по разным режимам плазмы и мощности СВЧ нагрева составляют сотни разрядов, что позволило получить статистически устойчивые характеристики. Эффективность ЭЦР нагрева в ГДЛ подтверждена измерениями температуры электронов диагностикой Томсоновского рассеяния. В экспериментах было статистически достоверно показано существенное влияние прироста электронной температуры плазмы на удержание высокоэнергичных плашущихся 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. Режим плазменной мишени позволил успешно заменить прямую инжекцию плазмы на первой стадии разряда в экспериментах с инжекцией нейтральных пучков 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.

В рамках данной работы впервые экспериментально проверена схема ввода микроволнового излучения в установку открытого типа, основывающаяся на достижении зоны поглощения в режиме сильной рефракции излучения в плазме. Впервые показана эффективность метода ЭЦР нагрева для магнитных ловушек открытого типа, когда в крупномасштабной открытой ловушке ГДЛ была нагрета тепловая компонента плазмы. В экспериментах в условиях установления баланса продольных потерь энергии были достигнуты значения электронной температуры, рекордные для систем такого типа. В экспериментах по ЭЦР нагреву на ГДЛ было обнаружено существенное увеличения времени удержания высокоэнергичных плашущихся ионов. Впервые в крупномасштабной осесимметричной открытой ловушке были детально исследованы режимы с СВЧ-пробоем газа для генерации мишенной плазмы, подходящей для старта разряда с последующей мощной нейтральной инжекцией.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

В диссертационной работе на установке ГДЛ была экспериментально продемонстрирована возможность дополнительного ЭЦР метода нагрева и создания плазмы. Для введения СВЧ мощности в ГДЛ была разработана принципиально новая схема ЭЦР нагрева с наклонным вводом СВЧ-пучка, которая является альтернативой распространенным и трудно реализуемым в установках такого типа 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 плашущихся ионов, позволяют рассматривать ЭЦР нагрев как один из методов, способных существенно увеличить интенсивность термоядерных реакций в установке следующего поколения с плашущимися 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 плашущимися ионами. Наконец, эксперименты с СВЧ-пробоем газа дают возможность полностью обойтись без прямой инжекции плазмы в установке следующего поколения, оснащенной системой ЭЦР нагрева.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд, в котором получен ряд важных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Отмечаю большой вклад автора в комплексную техническую подготовку уникального крупномасштабного эксперимента на установке ГДЛ. Результаты, полученные автором, широко известны специалистам в физике плазмы, опубликованы в 11 статьях в реферируемых журналах из списка ВАК, неоднократно были доложены на российских и международных семинарах и конференциях.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования

Диссертация написана хорошим научным языком, с использованием специальной терминологии. Несколько ошибок в оформлении рисунков не снижают ясности изложения.

По работе имеются следующие замечания и пожелания

1. В диссертации некоторые фразы излишне лаконичны, однако требуют либо ссылки на статью, либо пояснения. Некоторые из таких пояснений несущественны. Например, о каких «безнейтронных» реакциях идет речь на стр.6. Однако в более близких тематике диссертации утверждениях требуются пояснения. На стр. 25 «В геометрии установки ГДЛ такой способ ввода по нескольким причинам (нет перечисления) невозможен.» На стр.32 «В вакуумную камеру ГДЛ излучение попадает сквозь окно из кварцевого стекла со специально рассчитанной толщиной (какой, ведь СВЧ длина волны строго задана) для минимизации отражения.»
2. Некоторые оценки излишне точны. Например, увеличение электронной температуры составляет 44%, а на рис. 2.15 точность измерения температуры составляет 10% (стр.78).
3. На рис. 2.4 (стр.60) приведена осциллограммы МГД неустойчивых колебаний, но не приведен устойчивый Фурье-спектр (в тексте отмечены только характерные частоты).
4. Существование какой неустойчивости предполагает автор в режиме с узким профилем поглощенной мощности (электронно-температурной градиентной ETG или иной)?

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и опубликованные работы автора.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положение о присуждении ученых степеней» по пунктам 10, 11 и 14

Диссертация Яковлева Дмитрия Вадимовича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является 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 п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Официальный оппонент,
Скворцова Нина Николаевна, профессор, доктор физико-
математический наук по специальности «физика плазмы» (01.04.08)
Ведущий научный сотрудник отдела физики плазмы Института общей
физики им. А.М. Прохорова РАН

Адрес. 127349, г. Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН, отдел физики плазмы.
Тел. 8-499-135-80-39.
Адрес электронной почты nina@fpl.gpi.ru



Н.Н. Скворцова

29 ноября 2016г.

Подпись Н.Н. Скворцовой удостоверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН

д.ф.-м.н.



С.Н. Андреев

