

ОТЗЫВ

официального оппонента
кандидата физико-математических наук Сидорова Александра Васильевича
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.

Крупномасштабные магнитные ловушки открытого типа являются одними из перспективных систем для удержания плазмы в рамках решения задачи о создании реактора управляемого термоядерного синтеза. Диссертация Яковлева Д.В. посвящена экспериментальному исследованию метода электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы применяемого, прежде всего, в качестве дополнительного метода нагрева для увеличения электронной температуры в такой магнитной ловушке.

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.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 127 страниц, включая 46 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 82 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели, перечислены положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна и практическая ценность работы.

В **Главе 1** приведено описание установки ГДЛ, изложены элементы теории взаимодействия волн миллиметрового диапазона с плазмой, описана предложенная для ГДЛ схема ЭЦР нагрева плазмы. Часть работы по технической подготовке эксперимента, связанная с созданием системы управления комплексом ЭЦР нагрева и емкостного накопителя, интеграцией этих систем в комплекс ГДЛ, разработкой диагностических методов и их применением для сборки и настройки всех элементов системы ЭЦР нагрева, а также подготовка соответствующих публикаций были выполнены лично автором.

В Главе 2 освещены общие вопросы физики удержания плазмы в ГДЛ, представлен сценарий эксперимента по ЭЦР нагреву плазмы и приведены его результаты. Экспериментальные данные были получены лично автором или при его определяющем участии.

В Главе 3 изложены результаты анализа экспериментальных данных по ЭЦР нагреву плазмы и предпринята попытка объяснения наблюдаемых явлений. Личным вкладом автора является систематизация результатов экспериментов, формулировка задач для численного моделирования, участие в анализе результатов и подготовка публикаций.

В Главе 4 изложены результаты экспериментов по СВЧ-пробое газа и генерации мишенной плазмы. Личным вкладом автора является постановка задачи, получение экспериментальных данных, их обработка и анализ, а также участие в обсуждении теоретической модели СВЧ-пробоя газа.

Диссертация является законченным научным трудом, хотя, как справедливо отметил автор, результаты, изложенные в четвертой главе, могли бы быть темой отдельного научного исследования.

Замечания.

1. Было бы удобнее, если бы работы, по материалам которых осуществляется защита, были представлены, в том числе, или отдельным списком (а не растворены в общем списке литературы), или хотя бы, как это сделано в автореферате, указаны конкретные номера ссылок на них в общем списке литературы
2. В списке литературы указана неверная ссылка на одну из работ автора. Так в ссылке под номером 63 вместо 5 номера журнала ПТЭ должен быть 6 номер, страницы 28-33 вместо 1-5.
3. Основным методом подавления поперечного транспорта, вызванного развитием желобковой неустойчивости, в данной работе является вихревое удержание. Данная концепция ранее была достаточно подробно исследована экспериментально в условиях, когда температура электронов была на уровне 50-200 эВ. Была разработана теоретическая модель вихревого удержания и найдены области устойчивости относительно желобковой неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. В частности в работе 49 из списка литературы диссертации приводится плоскость параметров (смещение потенциала на лимитере, температура электронов), на которой отмечены области устойчивости. На этой же плоскости указаны точки, соответствующие экспериментально полученным на ГДЛ режимам с хорошим удержанием. ЭЦР нагрев позволил существенно расширить область температур электронов, для которых стало возможным проверить границы существования устойчивого разряда. К сожалению, в диссертации сравнение с теорией происходит неявным образом. Например, на странице 71 указано, что *«Для стабилизации плазмы была создана схема питания электродов вихревого удержания, позволяющая ступенчато добавлять к базовому значению потенциала на лимитерах дополнительный скачок в заданный момент времени»*. При этом не совсем ясно как именно выбиралась необходимая для перехода в режим вихревого удержания величина скачка потенциала: экспериментально или теоретически? В диссертации указано со ссылкой на работу 49, что в условиях ГДЛ переход в режим улучшенного удержания осуществляется при значениях потенциала на уровне $1\div 1.2 T_e$. То есть, если температура электронов выросла в два раза, то и скачок потенциала должен быть в два раза больше по сравнению с режимом без ЭЦР нагрева. Исходя из рисунка 2.11, скачок потенциала, при котором удержание улучшилось, действительно вырос приблизительно в два раза, однако, в работе это явно не обсуждается. При этом с дальнейшим ростом температуры смещение на лимитере, обеспечивающее устойчивость, должно быть еще больше, чем, например, можно объяснить ухудшение удержания с ростом температуры от 400 до 500 эВ, как это видно все из того же рисунка 2.11. Тем более что со временем смещение на лимитере падает (в работе не уточняется, как именно запитывался лимитер, возможно источник питания при

существующих токах не способен был поддерживать смещение на нужном уровне достаточно длительное время).

4. Возможность формирования как пикированного радиального профиля электронной температуры, так и сравнительно пологого, позволяет исследовать влияние температурно-градиентной неустойчивости на режим вихревого удержания плазмы, что в настоящий момент экспериментально практически не изучено. В диссертации автор вскользь касается данной темы, но подробно на ней не останавливается. Хотя теоретические оценки влияния данной неустойчивости уже имеются. Возможно, уже полученного экспериментального материала достаточно для проведения предварительного сравнения эксперимента и теории.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и, конечно, ни в коей мере не снижают качество данной работы, тем более что направление исследований, указанное в последних замечаниях, входит в число возможных будущих работ, обсуждаемых в заключении диссертации и в главе 3.

Стоит отметить следующие научные результаты, полученные в диссертации:

1. В рамках данной работы **впервые** экспериментально проверена схема ввода микроволнового излучения в установку открытого типа, основывающаяся на рефракции излучения в плазме.

2. **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.

3. **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.

Полученные автором результаты имеют большую практическую значимость. 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.

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.

Большой объем экспериментальных данных, полученный 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 инъекцию 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.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

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,
Сидоров Александр Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
01.04.08 – «Физика плазмы»,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д.46,
т. +7 831 416 48 35,
alexsv@appl.sci-nnov.ru,
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)


(подпись)

01.12.2016

Сидоров А.В.

Подпись к.ф.-м.н. Сидорова А. В. заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН
к.ф.-м.н.




Корюкин И.В.