

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.016.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г. И.
БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, подведомственного Федеральному агентству научных организаций,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 28.12.2016 № 10

О присуждении **Яковлеву Дмитрию Вадимовичу** ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Диссертация "**Экспериментальное исследование ЭЦР нагрева плазмы в газодинамической ловушке**" по специальности **01.04.08 – физика плазмы** принята к защите 10.10.2016 г., протокол № 4 диссертационным советом Д 003.016.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, Приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Яковлев Дмитрий Вадимович 1990 года рождения, работает младшим научным сотрудником в лаборатории 9-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

В 2013 году соискатель окончил Новосибирский государственный университет, г Новосибирска.

Диссертация выполнена в лаборатории 9-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук, Федерального агентства научных организаций.

Научный руководитель доктор физико–математических наук, **Багрянский Пётр Андреевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией 9-1.

Официальные оппоненты:

1. **Скворцова Нина Николаевна** – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник,
2. **Сидоров Александр Васильевич** – кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, старший научный сотрудник

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург в своем положительном заключении, подписанном Савельевым Александром Николаевичем (д.ф.-м.н., лаборатория Физики высокотемпературной плазмы, снс) указала, что «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», а также что «Работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения научных степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»».

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, все из них по теме диссертации и в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

1. Bagryansky P. A., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al. et Yakovlev D. V. // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63, no. 1T. P. 40–45.
2. Савкин В. Я., Яковлев Д. В. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 6. С. 35–38.
3. Коваленко Ю. В., Яковлев Д. В. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 93–98.
4. Коваленко Ю. В., Пурескин Д. Н., Савкин В. Я. и др. в т.ч. Яковлев Д. В.// Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 1–6.
5. Bagryansky P. A., Kovalenko Y. V., Savkin V. Y. et al. et Yakovlev D. V.// Nucl. Fusion. 2014. Vol. 54, no. 8. P. 082001.
6. Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al. et Yakovlev D. V. // Nucl. Fusion 2015. Vol. 55, no. 5. P. 053009.
7. Bagryansky P., Shalashov A., Gospodchikov E. et al. et Yakovlev D. V.// Phys. Rev. Lett. 2015. no. 114. P. 205001.
8. Соломахин А. Л., Багрянский П. А., Коваленко Ю. В. и др. в т.ч. Яковлев Д. В. 2014 Вестник НГУ: серия физика 9 2 13-22
9. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D et al. et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 1-7
10. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D et al. et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 15-20
11. Bagryansky P.A., Gospodchikov E.D., Kovalenko Yu.V. et al., et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 87-91J.A.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от ведущей организации и официальных оппонентов. Во всех отзывах отмечена актуальность выбранной темы исследования, в частности, подчеркивается важность исследования метода ЭЦР нагрева плазмы в магнитных ловушках открытого типа и возможностей данного метода для решения ключевых вопросов физики удержания плазмы в системах открытого типа. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные по результатам работы, признаются обоснованными. Во всех

отзывах высказывается уверенность в достоверности полученных результатов и отмечается их новизна. Во всех отзывах отмечена как теоретическая значимость полученных результатов в части, касающейся режимов разряда с высокой электронной температурой и увеличенным временем удержания ионов плазмы, так и практическая значимость результатов экспериментов по ЭЦР нагреву плазмы и СВЧ-пробой в рамках проектов по созданию термоядерного источника нейтронов на основе осесимметричной магнитной ловушки открытого типа.

Оппонентом Скворцовой Н.Н. были высказаны следующие замечания:

1. В диссертации некоторые фразы излишне лаконичны и 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) приведены 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)?

Оппонентом Сидоровым А.В. были высказаны следующие 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 развита 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 режим 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 1-1.2 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 запитывается 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.

В отзыве ведущей организации перечислены следующие замечания:

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.

В отзывах оппонентов и ведущей организации особо отмечается, что ни одно из замечаний не влияет на общую положительную оценку работы.

Выбор **официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается известностью их достижений в физике высокотемпературной плазмы, в частности, в вопросах нагрева плазмы при помощи мощного ВЧ-излучения, а также их компетентностью, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и способностью определить научную и практическую ценность защищаемой диссертации, а также дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая экспериментальная методика, позволяющая выявить качественно новые закономерности, возникающие при ЭЦР нагреве плазмы в установке открытого типа;

предложены оригинальные научные гипотезы, объясняющие особенности реализации процесса ЭЦР нагрева плазмы в магнитной ловушке открытого типа, связанные с неравномерным распределением поглощенной мощности по сечению плазменного столба;

доказана перспективность использования метода ЭЦР нагрева для увеличения электронной температуры плазмы в магнитной ловушке открытого типа; для увеличения времени удержания высокоэнергичных ионов и термоядерного КПД магнитной ловушки открытого типа с плещущимися ионами;

введены новые понятия, характеризующие режимы разряда с дополнительным ЭЦР нагревом плазмы в магнитной ловушке открытого типа (узкий нагрев, широкий нагрев), в которых наблюдается существенно различающийся отклик плазмы на вводимую СВЧ-мощность.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана принципиальная возможность достижения температуры электронов на уровне 1 кэВ в магнитной ловушке открытого типа; соответствие уровня

продольных потерь энергии в ГДЛ газодинамическому режиму течения плазмы при электронной температуре на уровне 1 кэВ;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы численного моделирования параметров разряда, а также методы расчета распространения и поглощения пучков электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в плазме;

изложены аргументы, свидетельствующие о соответствии продольных потерь энергии в ГДЛ в режиме разряда с дополнительным ЭЦР нагревом плазмы и электронной температуре на уровне около 1 кэВ модели газодинамического течения плазмы; гипотеза о причинах локализации поглощенной СВЧ-мощности в приосевой области плазмы в режимах разряда с «узким» профилем поглощения мощности; гипотеза о механизме возникновения неустойчивости в некоторых режимах разряда с «узким» профилем поглощения мощности;

раскрыты особенности экспериментов по ЭЦР нагреву плазмы в магнитной ловушке открытого типа с наклонным вводом СВЧ пучка и сильной рефракцией и выявлены отличия результатов от изначальных теоретических представлений, полученных при помощи геометрикооптического расчета с модельными распределениями температуры и плотности плазмы;

изучена связь (на качественном уровне) пикированного профиля электронной температуры, обусловленного локализованным поглощением вводимой СВЧ-мощности в некоторых режимах разряда с дополнительным ЭЦР нагревом с развитием неустойчивости плазмы, приводящей к повышенному уровню поперечных потерь;

проведена модернизация существующих методов исследований плазмы в условиях ЭЦР нагрева в магнитной ловушке открытого типа с учетом особенностей его применения: проведение точных динамических расчетов распределения магнитного поля в установке, необходимых для интерпретации эксперимента и оптимизации сценария разряда, проведение детальных измерений радиальных профилей плазмы при помощи системы Томсоновского рассеяния.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены экспериментальная методика и сценарий разряда с дополнительным ЭЦР нагревом плазмы в крупной магнитной ловушке открытого типа с нейтральной инжекцией (внедрены полностью); метод создания начальной плазменной мишени при помощи мощного пучка СВЧ-излучения, основывающийся на резонансном пробое нейтрального газа (внедрен полностью); **определены** эффективность метода ЭЦР нагрева с точки зрения увеличения времени удержания высокоэнергичных плещущихся ионов в магнитной ловушке открытого типа ГДЛ, что позволяет оценить потенциальную эффективность данного метода в нейтронном источнике на основе открытой ловушки; диапазон начальных параметров и необходимая мощность системы ЭЦР нагрева для реализации сценария СВЧ-пробоя и генерации начальной плазменной мишени, что потенциально позволяет рассматривать сценарии без продольной инжекции плазмы в установке следующего поколения;

созданы модель эффективного применения ЭЦР нагрева плазмы в магнитной ловушке открытого типа с нейтральной инжекцией и система практических рекомендаций по управлению распределением поглощенной СВЧ-мощности, позволяющая максимизировать эффект от дополнительного ЭЦР нагрева на параметры плазмы; система практических рекомендаций по реализации сценария разряда с нейтральной инжекцией, инициированного СВЧ-пробоем нейтрального газа в крупной магнитной ловушке открытого типа;

представлены предложения по дальнейшим направлениям развития эксперимента по ЭЦР нагреву плазмы в магнитной ловушке открытого типа ГДЛ с целью дальнейшей оптимизации поглощения СВЧ-мощности, а также методические рекомендации по практическому использованию разработанного метода СВЧ-пробоя в рамках планируемых новых экспериментов на установке ГДЛ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с использованием высокоточного диагностического оборудования, прошедшего калибровку; показана воспроизводимость результатов экспериментов в различных условиях в течение нескольких сотен импульсов установки ГДЛ и учтены факторы,

способные внести систематические ошибки в результаты измерений параметров плазмы;

теория, используемая при интерпретации результатов экспериментов, построена на известных фундаментальных положениях и согласуется с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации как в части моделирования плазменного разряда с нейтральной инжекцией, так и в части расчетов распространения мощных пучков СВЧ-излучения в плазме;

идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта применения метода ЭЦР нагрева плазмы в тороидальных магнитных системах удержания плазмы, а также в нескольких установках открытого типа;

использованы как общераспространенные методы диагностики параметров плазмы в экспериментах по ЭЦР нагреву, так и специфические методы, характерные для магнитных ловушек открытого типа;

установлена уникальность и новизна полученных экспериментальных данных в сравнении с результатами, представленными в независимых источниках по тематике ЭЦР нагрева плазмы в магнитных ловушках открытого типа, а также качественное совпадение результатов экспериментов по СВЧ-пробою газа с учетом особенностей установки ГДЛ;

использованы современные методики автоматизированного сбора, статистической обработки и фильтрации экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. 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. Личным вкладом автора является получение экспериментальных данных, систематизация и обработка результатов экспериментов, формулировка задач для численного моделирования, участие в анализе результатов и подготовка публикаций по экспериментам с ЭЦР нагревом плазмы. В части работы, посвященной исследованию режимов с СВЧ-пробоем

газа в ГДЛ, личным вкладом автора является постановка задачи, получение экспериментальных данных, их обработка и анализ, а также участие в обсуждении теоретической модели СВЧ-пробоя газа.

На заседании 28.12.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Яковлеву Д. В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного

совета Д 003.016.03

д.ф.-м.н.



А. А. Иванов

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 003.016.03

д.ф.-м.н.

А. В. Бурдаков

29. 12. 2016 г.