

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.069.02 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 09.10.2017 №67

О присуждении Изотову Ивану Владимировичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие разряда в магнитной ловушке ионного источника в условиях электронно-циклотронного резонанса» по специальности 01.04.08 (физика плазмы) принята к защите 19.06.2017, протокол №66, диссертационным советом Д 002.069.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН; 603950, г. Нижний Новгород, бокс-120, ул. Ульянова, д. 46), приказ о создании совета № 717/нк от 09.11.2012.

Соискатель — Изотов Иван Владимирович, 1984 года рождения. В 2007 году соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», работает научным сотрудником в ИПФ РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории ионных источников ИПФ РАН.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Голубев Сергей Владимирович, научный руководитель направления «физика плазмы» ИПФ РАН.

Официальные оппоненты,

- 1) Косый Игорь Антонович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей физики Российской академии наук», и
- 2) Соломахин Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук», в своем положительном заключении, подписанном Оксом Ефимом Михайловичем, доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией плазменных источников, указала, что диссертация Изотова И. В. является законченной научно-квалификационной работой, в ко-

торой содержатся экспериментальные и численные исследования начальной стадии ЭЦР разряда в магнитной ловушке ионного источника; что работа отвечает критериям «Положения о порядке присвоения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Соискатель имеет 91 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации: 16 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, и 18 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Вклад соискателя во все опубликованные работы является определяющим.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. T. R. Edgecock et al. High intensity neutrino oscillation facilities in Europe. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2013. V. 16.
2. T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, M. Marie-Jeanne. Study of pulsed ECRIS plasma near breakdown: the Preglow. // *Review of Scientific Instruments*. 2008. V. 79.
3. Ivan V. Izotov, Alexander V. Sidorov, Vadim A. Skalyga, Vladimir G. Zorin, Thierry Lamy, Louis Latrasse, and Thomas Thuillier. Experimental and Theoretical Investigation of the Preglow in ECRIS. // *IEEE Transactions on plasma science*. 2008. V. 36, N. 4.
4. T Ropponen, O Tarvainen, I Izotov, J Noland, V Toivanen, G Machicoane, D Leitner, H Koivisto, T Kalvas, P Peura, P Jones, V Skalyga and V Zorin. Studies of plasma breakdown and electron heating on a 14 GHz ECR ion source through measurement of plasma bremsstrahlung. // *Plasma Sources Science and Technology*. 2011. V. 20, N. 5.
5. V. Skalyga, I. Izotov, V. Zorin, and A. Sidorov. Physical principles of the preglow effect and scaling of its basic parameters for electron cyclotron resonance sources of multicharged ions. // *Physics of Plasmas*. 2012. V. 19.
6. S. V. Golubev, I. V. Izotov, D. A. Mansfeld, and V. E. Semenov. Experimental electron energy distribution function investigation at initial stage of electron cyclotron resonance discharge. // *Review of Scientific Instruments*. 2012. V. 83.

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечаются актуальность диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Отзыв ведущей организации содержит следующие замечания:

- 1) Обнаруженный кратковременный всплеск ионного тока в начале ЭЦР разряда связывается автором с запасом энергии в энергичных электронах при формировании ФРЭЭ при

низких плотностях электронов на первой стадии разряда, которая затем тратится на быструю дополнительную ионизацию. В пользу этого предположения свидетельствуют экспериментальные исследования ФРЭЭ, проведенные по рентгеновским измерениям, показавшим существование энергичных электронов с энергией до 500 кэВ. Однако частота ионизирующих столкновений электронов с такой энергией невелика и не может обеспечить короткий всплеск тока. По-видимому, быстрая дополнительная ионизация осуществляется менее энергичными электронами плато ФРЭЭ, в диссертации эти особенности следовало бы обсудить более подробно.

2) Большая степень детализации и конкретики выносимых на защиту научных положений позволила бы более четко выделить научную новизну и научно-практическую ценность диссертационной работы.

3) Использование англоязычного термина «Preglow» для обозначения эффекта резкого возрастания ионного тока представляется не вполне удачным, прежде всего с точки зрения интерпретации физического механизма этого эффекта.

Отзыв официального оппонента, д. ф.-м. н., проф. И. А. Косого содержит следующие замечания.

1) Центральное место в диссертации принадлежит обнаружению и использованию явления генерации пучков энергичных ионов на ранней стадии ЭЦР (эффект «Preglow»). Относя открытие автора с коллегами к одной из главных ценностей диссертации, нельзя не заметить, что в представленном труде нет убедительного достаточно развернутого описания модели, объясняющей эффект «всплеска» ранней генерации выходящего из пробкотрона ионного тока. При этом нет сомнения в том, что модель, основанная на предположении об определяющем значении газовых поступлений с облученных энергичными ионами стенок камеры, может претендовать на роль адекватно отражающей особенности эксперимента. Однако, хотелось бы иметь дополнительные экспериментальные данные, подтверждающие высказанные автором соображения о физике явления «Preglow». Если предполагается, что газовое поступление является результатом распыления металла — это, по-видимому, должно быть подтверждено исследованиями ионного состава или спектра излучения плазменного образования. Возможно, хотя и маловероятно, что определяющую роль играют десорбированные поверхностью газы. Хотелось бы, понимая природу «Preglow», найти способ существенным образом повлиять на параметры ионного «всплеска». Не очень ясно, на чём основано пренебрежение процессами неустойчивости плазмы на стадии «Preglow» и на более поздних стадиях.

2) Диссертационная работа написана аккуратно и легко читаема. Однако, вызывает некоторое отторжение «обогащение» её терминами, не имеющими, на мой взгляд, общефизиче-

ского применения, и относящиеся скорее к «сленгу» местной значимости. Например, «квази-магнитодинамический режим», «суперадиабатическое движение», «квазилинейное плато» и др.

В отзыве официального оппонента, к. ф.-м. н. Соломахина А. Л. сделаны следующие замечания.

- 1) Список литературы выполнен с нарушением ГОСТа.
- 2) На рисунке 14 указана неправильная размерность по горизонтальной оси.
- 3) В работе отсутствует упоминание о кинетических неустойчивостях, которые могут возникнуть при наличии существенно неравновесной функции распределения электронов. Это ставит под сомнение применимость некоторых уравнений системы (24), использованной для расчёта динамики ЭЦР разряда.
- 4) Энергия электронов в модели меняется от нуля до нескольких сот кэВ. Также сильно отличается время жизни электронов в ловушке. Причём самые горячие электроны всегда удерживаются в классическом режиме, а самые холодные в газодинамическом. Непонятно, как в модели с помощью одной переменной определяется время жизни электронов и режим удержания.
- 5) Из текста неясно, какой величины скачок амбиполярного потенциала (22), удерживающего ионы в ловушке, использовался при моделировании. Зависит ли он от параметров плазмы или использовалось постоянное значение?
- 6) В описании модели не определена функция напуска нейтрального газа в ловушку, которая использовалась при моделировании. В работе указывалось, что проводилось моделирование с учётом десорбции газа со стенок, но никаких подробностей не приведено.
- 7) На графиках 18г и 19а изображены зависимости, измеренные и промоделированные в очень похожих условиях, с отличием только в мощности СВЧ на 3%. Однако зависимости на разных графиках заметно отличаются, особенно результаты моделирования (до 200%).
- 8) В пояснении к рисунку 19 указано, что для высоких зарядовых состояний наблюдается завышение результатов моделирования по сравнению с результатами эксперимента, однако на графиках систематического завышения не наблюдается.
- 9) На стр. 62 написано, что уменьшение градиента магнитного поля приводит к уменьшению резонансной области. Кажется, что должно быть наоборот.
- 10) Также на стр. 62 написано, что уменьшение размера области, заключенной в резонансную поверхность, приводит к увеличению удельного энерговклада. При классическом режиме удержания должно быть наоборот, так как в этом случае большее число электронов достигает резонанса.

11) На стр. 76 написано, что падение ионного тока после пика «Preglow» вызвано уменьшением концентрации плазмы. Однако на рис. 38 наблюдается падение плотности плазмы на 10%, в то время как ток падает в два раза. А на рисунке 1 падение плотности плазмы после формирования пика «Preglow» практически отсутствует.

В отзыве на автореферат от к. ф.-м. н. Кулевого Т. В., заместителя директора по научной работе по ускорительному направлению Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» содержится замечание, что в автореферате недостаточно полно отражено, как при работе в режиме «Preglow» изменяется средний заряд пучка и распределение ионов в пучке по зарядам по сравнению со стационарным режимом.

В отзыве на автореферат от д. ф.-м. н. Сковороды А. А., главного научного сотрудника Курчатовского ядерно-технологического комплекса Национального исследовательского центра "Курчатовский Институт" содержится рекомендация обратить внимание на специфику ЭЦР разряда в новом источнике на основе каспа. Хотя автор отмечает слабую зависимость эффекта «Preglow» от типа ловушки, сам процесс образования ФРЭ существенно зависит от типа ловушки. При ЭЦР в каспах обнаруживается образование пространственных колец энергичных электронов. При этом важную роль играет образование амбиполярного потенциала, влияющего не только на удержание ионов, но и на энергию горячих электронов. Полезно всегда помнить, что СВЧ диффузия электронов идёт всегда в обе стороны по энергии.

Отзыв на автореферат от к. т. н. Миронова В. Е., старшего научного сотрудника Лаборатории ядерных реакций Международной межправительственной организации «Объединённый институт ядерных исследований» содержит следующее замечание: автор связывает обнаруженный всплеск ионного тока с энергией, запасённой в горячих электронах, причем речь идёт об энергиях порядка сотен кэВ, однако недостаточно подробно объяснено, почему электроны с описанной функцией распределения по энергиям эффективно ионизируют атомы, т. к. сечение столкновений с нейтралами и ионами у электронов с такими энергиями невелико.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тем, что оппоненты являются признанными высококвалифицированными специалистами в области физики плазмы, а одним из важнейших направлений деятельности ведущей организации является исследование и производство плазмодгенераторов и ионных источников на их основе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- экспериментально обнаружен эффект «Preglow», исследование которого на различных установках позволило предложить новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника ионов с рекордными характеристиками (длительность импульса и плотность ионного тока);
- впервые проведены эксперименты по измерению тормозного излучения ЭЦР плазмы, позволившие восстановить эволюцию спектра тормозного излучения в диапазоне 1.5-400 кэВ с разрешением не хуже 1.5 кэВ и 100 микросекунд;
- впервые проведены прямые измерения энергии горячих электронов, покидающих магнитную ловушку вдоль её оси на начальной стадии разряда;
- разработана численная модель динамики плазмы в магнитной ловушке ЭЦР ионного источника, хорошо согласующаяся с результатами экспериментов;
- применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс базовых экспериментальных и численных методов исследования.

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

- предложен и успешно запущен новый тип короткоимпульсного источника многозарядных ионов, основанного на эффекте «Preglow», с характеристиками, существенно превосходящими аналоги.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- экспериментальные результаты получены с использованием апробированных в ИПФ РАН и других научных центрах методик исследования плазмы, удерживаемой магнитным полем, и современных методов обработки данных;
- физическая интерпретация полученных результатов находится в согласии с построенной численной моделью;
- основные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в экспериментальном и численном исследовании плазмы ЭЦР разряда, удерживаемой в магнитной ловушке ионного источника, а также в анализе экспериментальных данных и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

На заседании 09.10.2017 г. диссертационный совет принял решение присудить И. В. Изотову ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в засе-

дании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 21, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель
диссертационного совета
академик РАН



А. Г. Литвак

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

А. И. Смирнов

Подписи А. Г. Литвака и А. И. Смирнова заверяю:

ученый секретарь ИПФ РАН
кандидат физ.-мат. наук

И. В. Корюкин

09 октября 2017 г.