

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
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 20.11.2017 №69

О присуждении Скалыге Вадиму Александровичу, гражданину РФ,
ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков» по специальности 01.04.08 – физика плазмы принята к защите 19 июня 2017 г., 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, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ Министерства образования и науки РФ № 717 от 09.10.2012).

Соискатель Скалыга Вадим Александрович 1981 года рождения в 2004 году окончил Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Исследование ЭЦР источников многозарядных ионов с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы в открытых магнитных ловушках» защитил в 2007 году в диссертационном совете Д 002.069.02, созданном на базе ИПФ РАН, и работает заведующим лабораторией в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, приказ ФАНО № 334 от 30.06.2015 г.).

Диссертация выполнена в отделе физики плазмы ИПФ РАН.

Официальные оппоненты:

- Лебедев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе),

- Иванов Александр Александрович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук),

- Шарков Борис Юрьевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, заместитель директора (Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований»)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук в своем положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы Батановым Германом Михайловичем, указала, что диссертация В.А. Скалыги является первоклассной работой, выполненной по актуальной проблематике современной физики, в ней решены принципиальные вопросы создания современных источников с предельными величинами токов и эмиттанса и предложены пути расширения применения разработанных систем. Как по уровню проведенных исследований, так и по полученным результатам работа полностью отвечает критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

По теме диссертации соискателем опубликовано 30 научных статей и один патент. 25 статей опубликованы в зарубежных рецензируемых научных журналах,

5 статей – в отечественных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов. Наиболее значимыми работами являются:

1) V. Skalyga et. al. Gasdynamic ECR Source of Multicharged Ions Based on a Cusp Magnetic Trap. *Plasma Sources Science and Technology* 15 (2006) 727-734.

2) В.А. Скалыга, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, С.В. Разин, А.В. Сидоров. Короткоимпульсный ЭЦР источник многозарядных ионов. *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 90-94.

3) V. Skalyga et. al. “High current proton beams production at Simple Mirror Ion Source 37”. // *Review of Scientific Instruments*, v. 85, no. 2, 2014, p. 02A702-1 – 02A702-3.

4) V. Skalyga et. al. High yield neutron generator based on a high-current gasdynamic electron cyclotron resonance ion source. *Journal of Applied Physics* 118, 093301 (2015).

5) V. Skalyga et. al. “New progress of high current gasdynamic ion source”. *Review of Scientific Instruments*. 87, 02A716 (2016)

6) S. Golubev, V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov. “New method of a “point-like” neutron source creation based on sharp focusing of high-current deuteron beam onto deuterium-saturated target for neutron tomography”. *Journal of Instrumentation*, V. 12, 2017_JINST_12_T02003 (2017).

На диссертацию и автореферат поступили 8 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечают актуальность диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В положительном отзыве ведущей организации были сделаны 3 замечания. Первое замечание заключается в том, что в диссертации не обсуждается возможность нагрева закритической плазмы при продольном вводе СВЧ излучения. Второе замечание связано с использованием простой магнитной ловушки в исследованиях сильноточных протонных источников без подробного рассмотрения проблемы ее МГД устойчивости. Третье замечание относится к вопросу о причине высокой степени модуляции тока ионного пучка на приведенных осциллограммах.

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., академика РАН Шаркова Бориса Юрьевича содержит следующие замечания: 1) в работе не обсуждается конкретная величина ионной температуры; 2) не обсуждается влияние магнитного поля на величину эмиттанса формируемых ионных пучков; 3) в работе отсутствует обоснование целесообразности выбора для конкретных экспериментальных исследований того или другого типа магнитной ловушки; 4) не обсуждается проблема перехода к высокой частоте следования импульсов или непрерывному режиму работы системы; 5) отсутствует детальное сопоставление полученных результатов с результатами других лабораторий России и зарубежных центров; 6) отмечена опечатка на формуле расчета уширения линии на стр. 171.

В положительном отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Лебедева Сергея Владимировича в качестве недостатков отмечается отсутствие обоснования возможности применения 0-мерной модели для описания процессов в разряде, значительная доля примесей в пучках ионов дейтерия, которые должны снижать эффективность предложенного нейтронного источника, а также отмечается значительное количество опечаток в тексте.

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н. Иванова Александра Александровича содержит следующие замечания: 1) утверждения на стр.8 :«В традиционных ЭЦР источниках время кулоновского рассеяния электронов значительно больше газодинамического времени жизни плазмы в ловушке» и на стр. 9 «Минимальное время жизни плазмы при квазигазодинамическом режиме при фиксированной концентрации автоматически означает максимально возможную плотность потока частиц из ловушки, ...» являются спорными; 2) В уравнении 1.5 не определено τ ; 3) в каких предположениях в Главе 1 диссертации на Рис.1.4 приведена зависимость инкремента желобковых колебаний от радиуса плазмы; 4) выражение 1.2 некорректно при описании плазмы близко к оси ловушки касп; 5) требуется более подробное объяснение малой величины эмиттанса извлекаемых ионных пучков; 6) не указывается влияет ли на измерения тока пучка отсутствие запирающего поток обратных электронов электрода и учитывался ли эффект вторичной эмиссии при бомбардировке пучком поверхности цилиндра Фарадея; 7)

”repper pot” метод измерения эмиттанса пучка обладает низкой точностью; 8) что означает утверждение на стр.70, что всплеск ионного тока обусловлен «повышением эффективности экстракции»; 9) почему в источнике, описанном автором в Главе 3, нет проблемы с развитием МГД неустойчивости; 10) утверждение на стр.108 «что в большинстве классических источниках МЗИ средний заряд ионов оказывается выше, чем в реализованных на сегодняшний день квазигазодинамических источниках» находится в противоречии с утверждениями автора о преимуществах данного типа источников; 11) непонятны преимущества ЭЦР разряда в сравнении с другими методами получения протонных и нейтронных пучков, протонные пучки с током на уровне 100-400 мА при нормализованном эмиттансе не более 0.2 п·мм·мрад ранее были получены с использованием дугового генератора плазмы; 12) В предлагаемом источнике для радиографии плотность мощности пучка на мишени слишком высока; 13) отмечается ряд опечаток в тексте диссертации.

В отзыве на автореферат д.т.н. Окса Е.М. и д.т.н. Юшкова Г.Ю. отмечается, что в работе не обсуждается переход к непрерывному режиму генерации ионных пучков и не обосновывается использование двухэлектродных систем экстракции.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н., профессора Грача С.М. указывается на то, что недостаточно четко объясняется отношение полученных автором результатов к упомянутым крупным проектам и при описании рис. 1.36 неудачно разъясняется ток какого электромагнита отложен по оси абсцисс.

Отзыв, составленный Кулевым Т.В., подчеркивает отсутствие обсуждения перехода к непрерывному режиму генерации, проблемы влияния собственного заряда сильноточного пучка на его эмиттанс и подробного сравнения предлагаемого нейтронного генератора с уже существующими изделиями.

Отзыв на автореферат д.ф.-м.н. Лебедева Ю.А. не содержит замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тем, что оппоненты являются признанными высококвалифицированными специалистами в области физики плазмы, а одним из важнейших направлений научной деятельности ведущей организации являются исследования в области физики плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Впервые продемонстрирована возможность эффективного использования магнитной ловушки со встречными полями для удержания плазмы в ЭЦР ионном источнике, при использовании для нагрева плазмы излучения гиротрона с частотой 60 ГГц и мощностью 150 кВт получены сильноточные пучки многозарядных ионов азота с яркостью до $50 \text{ A}/(\pi \text{ мм мрад})^2$ при плотности тока до $650 \text{ mA}/\text{см}^2$ и средним зарядом до +4.
 - Показано, что реализация квазигазодинамического режима удержания плотной плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротрона, обеспечивает быстрое (10 мкс) формирование плазмы с высокой концентрацией многозарядных ионов.
 - Продемонстрирована возможность формирования ионных пучков водорода с током до 500 мА, нормализованным эмиттансом $0,07 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, нормализованной яркостью $100 \text{ A}/(\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})^2$ при доле атомарных ионов (протонов или дейтронов) 94% из плазмы ЭЦР разряда с плотностью до 10^{14} см^{-3} при температуре основной электронной компоненты 50-100 эВ.
 - Предложено использовать полученные интенсивные пучки ионов дейтерия для создания мощного компактного нейтронного генератора нового поколения на основе D-D реакции. Экспериментально продемонстрировано, что при бомбардировке мишени из тяжелого льда пучком ионов дейтерия с током 500 мА и энергией 45 кэВ возможно получение нейтронного выхода с плотностью на уровне $1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.
- Значение полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в том, что:
- Разработан короткоимпульсный (длительность 50-100 мкс) ЭЦР источник многозарядных ионов короткоживущих радиоактивных изотопов с нагревом плазмы излучением гиротрона с частотой 60 ГГц в ловушке со встречными полями;
 - Для современных линейных ускорителей разработан ЭЦР источник сильноточных пучков легких ионов с рекордной яркостью;

• На основе сильноточного ЭЦР источника ионов дейтерия разработан D-D нейтронный генератор для применения в области бор-нейтронозахватной терапии и нейтронографии.

Все изложенные в диссертационной работе результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Вклад автора в исследование плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротронов в ловушке со встречными полями в квазигазодинамическом режиме, разработку короткоимпульсных ионных источников короткоживущих радиоактивных изотопов, изучение возможности формирования сильноточных ионных пучков с высокой яркостью и их использование для генерации плотных нейтронных потоков является определяющим.

Результаты, полученные в диссертации, вносят существенный вклад в научное направление, связанное с физикой ЭЦР разрядов и разработкой методов генерации интенсивных ионных пучков.

На заседании от 20.11.2017 г. диссертационный совет принял решение присвоить Скалыге В.А. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 25 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 25, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

академик РАН



А.Г. Литвак

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук



Э.Б. Абубакиров

подписи А.Г. Литвака и Э.Б. Абубакирова заверяю

ученый секретарь ИПФ РАН

кандидат физ.-мат. наук



И.В. Корюкин

«20» ноября 2017 г.