

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 19.09.2018 № 6

О присуждении **СОТНИКОВУ ОЛЕГУ ЗАХАРОВИЧУ** ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «**Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов**» по специальности **01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника** принята к защите 24.05.2018 г., протокол № 2 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, созданного приказом Минобрнауки России № 385/нк от 27. 04. 2017 г.

**Соискатель** Сотников Олег Захарович 1991 года рождения, в 2014 г. окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. С 2014 г. по 2018 г. обучался в аспирантуре Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, в настоящее время работает младшим научным сотрудником в лаборатории 9-0 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

Диссертация выполнена в лаборатории 9-0 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

**Научный руководитель** – кандидат физико-математических наук САНИН Андрей Леонидович, старший научный сотрудник лаборатории 9-0 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

**Официальные оппоненты:**

1. **КРЫЛОВ Александр Иванович** – кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «**Курчатовский институт**», г. Москва, ведущий научный сотрудник;
2. **ЮШКОВ Георгий Юрьевич** - доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт сильноточной электроники СО РАН**, г. Томск, ведущий научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «**Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН**», г. Нижний Новгород в своем положительном заключении

утвержденным Денисовым Григорием Геннадьевичем, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ВрИО директора, подписанном Скалыгой Вадимом Александровичем, д.ф.-м.н., лаборатория ионных источников, заведующий лабораторией, указала, что диссертация является качественной работой, выполненной по актуальной проблематике современной науки и техники. В ней решены принципиальные вопросы создания современных источников отрицательных ионов водорода с предельной величиной тока. Наряду с положительными моментами отмечаются следующие замечания:

1. Описанные в работе исследования проводились при фиксированной геометрии ионно-оптической системы источника. Из текста не до конца ясно, проводилась ли оптимизация ее параметров и на каких основаниях были выбраны размеры отверстий в электродах, межэлектродные расстояния и т.д.

2. В работе не приводятся экспериментальных данных об эмиттансе формируемого пучка отрицательных ионов водорода. Учитывая необходимость дальнейшего ускорения пучка, обсуждение данного параметра и его соответствия характеристикам предполагаемого ускорителя представляется уместным.

3. Численное моделирование процесса извлечения и формирования ионного пучка выполнено с использованием ряда приближений: расчеты проведены для осесимметричной элементарной ячейки ионно-оптической системы. При этом ускоряющий электрод, имеющий щелевую структуру, не может быть полноценно разбит на осесимметричные ячейки. В качестве рекомендации на будущее можно предложить использовать более современное открытое программное обеспечение с возможностью полноценного трехмерного моделирования, например, IB Simu.

4. С точки зрения оформления текста диссертации несколько странным выглядит полное отсутствие ссылок во введении (все необходимые ссылки приводятся в последующих разделах). Также дополнение текста введения иллюстрациями схем установок, используемых в других научных группах, упростило бы их сравнение с системой, разработке которой посвящена диссертация.

Указанные замечания и рекомендации не снижают общей ценности работы, которая несомненно вызывает научный и практический интерес.

По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ общим авторским объемом 2.5 печ. л., в том числе по теме диссертации 12 работ, среди которых 7 научных статей (общим авторским объемом 1.7 печ. л.) в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России и приравненных к ним. Список статей с выходными данными:

1. Сотников О.З. Сравнительный анализ стационарных источников отрицательных ионов водорода с различной геометрией разряда / Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин, О.З. Сотников // Ядерная физика и инжиниринг.— 2015.— №6

2. Сотников О.З. Характеристики мощного ВЧ источника отрицательных ионов водорода для инжекторов нейтралов УТС / Г.Ф. Абдрашитов, Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин., др. // Физика плазмы.— 2017.— №43.

3. Sotnikov O. Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use / G. Abdrashitov, Y. Belchenko, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.

4. Sotnikov O. High voltage holding in the negative ion sources with cesium deposition / G. Abdrashitov, Y. Belchenko, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.

5. Sotnikov O. Effect of plasma grid bias on extracted currents in the RF driven surface-plasma negative ion source / Y. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.

6. Sotnikov O. Efficient cesiation in RF driven surface plasma negative ion source / Y. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.

7. Sotnikov O. Comparative analysis of continuous-wave surface-plasma negative ion sources with various discharge geometry / Y. Belchenko, A. Sanin // Review of Scientific Instruments.— 2014.— №85.

В материалах научных конференций опубликованы статьи:

8. Sotnikov O. Negative Ion Production in the RF Multiaperture Surface-Plasma Source / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Dranichnikov; etc. // AIP Conf. Proc.— 2015.— №1655.

9. Sotnikov O. Operation of RF driven Negative Ion Source in a Pure-Hydrogen Mode / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Ivanov, etc. // AIP Conf. Proc.— 2015.— №1655

10. Sotnikov O. Emission properties of inductively driven negative ion source for NBI / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Ivanov, etc. // AIP Conf. Proc.— 2016.— №1771.

11. Sotnikov O. Negative ion based neutral injector: Beam formation and transport / A. Ivanov, Yu. Belchenko, P. Deichuli, etc. // AIP Conf. Proc.— 2016.— №1771.

12. Sotnikov O. Extracted beam and electrode currents in the inductively driven surface-plasma negative hydrogen ion source / Yu. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // AIP Conf. Proc.— 2017.— №1869.

#### **Отзывы на автореферат.**

Все отзывы положительные. В отзывах отмечены следующие замечания.

**Ю.Н. Гавриш**, доктор физико-математических наук, профессор, директор НТЦ «ЛУЦ» Акционерного общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА») отмечает: «недостаточно четкое описание в автореферате процесса подачи цезия из контейнера, содержащего таблетки с бихроматом цезия, в распределительные трубки источника»

**В. Б. Минаев**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Физики высокотемпературной плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, отмечает, что: «К автореферату имеется ряд замечаний: **1.** На стр. 9 и стр. 21 используются сокращения (ПШИ, ЛТ), расшифровка которых в тексте не приводится; **2.** На рис. 1 ток IEG ошибочно указан у плазменного электрода. По всей видимости он относится к вытягивающему электроду; **3.** На стр. 13 указывается, что отрицательные ионы водорода вытягиваются через 21 отверстие в плазменном электроде, а на рис. 3 представлена фотография электрода с 25 отверстиями. Кроме того, в автореферате не отражено, как круглые отверстия в плазменном и вытягивающем электродах позиционируются по отношению к щелевым отверстиям в ускоряющем электроде;

4. На стр. 22 в качестве одного из результатов диссертационной работы указана разработка процедуры контроля подачи цезия в источник, основанная на измерении давления в вакуумном баке. Описание данной процедуры в автореферате отсутствует, возможно, оно имеется в тексте диссертации.»

**С.А. Гаврилов**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией пучка Отдела ускорительного комплекса ИЯИ РАН Институт ядерных исследований Российской академии наук, дал положительный отзыв на автореферат без замечаний.

Выбор **официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается известностью их достижений в области получения и использования пучков высокоэнергетичных заряженных частиц, 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:

**Разработан** и исследован источник отрицательных ионов водорода с большой площадью эмиссии использующий высокочастотный разряд для создания плазмы, в котором используются новые подходы, позволяющие увеличить ток и энергию пучка отрицательных ионов водорода. В частности:

**Разработана** новая методика создания устойчивого цезиевого покрытия на эмиссионной поверхности многоапертурного источника отрицательных ионов водорода;

**Разработана** новая методика повышения высоковольтной прочности источника, работающего с подачей цезия;

**Разработана** новая методика оперативного определения тока пучка отрицательных ионов водорода на основе измерений токов систем питания источника и токов, перехватываемых на электроды ионно-оптической системы.

**Предложены** практические рекомендации по дальнейшему развитию источников отрицательных ионов водорода использующих высокочастотный разряд для создания плазмы и модернизации их конструкции: увеличение тока пучка за счет создания цезиевого покрытия с помощью распределенной подачи цезия на плазменный электрод, увеличение энергии пучка и высоковольтной прочности ионно-оптической системы источника за счет нагрева электродов и выпуклой геометрии магнитного поля, увеличение длительности пучка за счет уменьшения тепловой нагрузки на электроды при использовании щелевого ускоряющего электрода и разделения области источника и ускорителя промежуточной линией транспортировки.

**Доказано**, что источник с высокочастотным разрядом обеспечивает стабильное получение пучка с плотностью тока  $\sim 30$  мА/см<sup>2</sup> с энергией  $\sim 100$  кэВ в длинных импульсах. Описаны ограничения многоапертурного источника отрицательных ионов водорода с высокочастотным разрядом, разработанного в ИЯФ.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что: **доказана** эффективность применения физических принципов, заложенных в конструкции источника и использованных в конструкции источника ИЯФ.

Применительно к проблематике диссертации результативно с получением обладающих новизной результатов использован комплекс базовых методов

исследования, в т.ч. методы теоретического исследования (моделирование, экстраполяция, сравнение, обобщение, классификация и типологизация изучаемого явления), методы эмпирического исследования (статистический и сравнительный виды анализа; проведение экспериментов);

**изложены** новые перспективные идеи по увеличению тока, энергии и длительности пучка отрицательных ионов водорода.

**изучено** влияние потенциала плазмы источника на эффективность ионной и электронной эмиссии

**Определены** ограничения многоапертурного источника отрицательных ионов водорода с высокочастотным разрядом, разработанного в ИЯФ.

**Представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию источника отрицательных ионов для инжектора нейтралов ИЯФ

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ**

для однозначной трактовки полученных в работе результатов, исследования проводились с использованием нескольких независимых диагностик. Достоверность приведённых в работе экспериментальных результатов подтверждается их высокой воспроизводимостью.

**теория** построена на известных, проверяемых данных, фактах, в т.ч. для предельных случаев, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации или по смежным отраслям

**идея базируется** на обобщении передового опыта создания источников отрицательных ионов водорода

**использованы** сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике

**установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, представительные выборочные совокупности с обоснованием подбора объектов наблюдения и измерения

**Личный вклад соискателя**

Участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. На всех этапах процесса исследования автор непосредственно участвовал в формулировании цели и задач исследования, выборе методов исследования. При определяющем участии автора проведены экспериментальные исследования оптимизации параметров пучка, разработаны теоретико-методические основы получения, ускорения и транспортировки пучков отрицательных ионов водорода, получен пучок отрицательных ионов водорода с проектными параметрами, определены пути дальнейшей оптимизации источника. При активном личном участии автора были проведены анализ и обработка результатов исследований, а также подготовлены основные статьи и доклады по результатам работы, доложенные на научных конференциях и семинарах международного и всероссийского уровней.

На заседании 19.09.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить **Сотникову Олегу Захаровичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, 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.



/ П. А. Багрянский /

20. 09. 2018 г.