

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.02 НА БАЗЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЁННЫЙ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №\_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 18.04.2019 № 19-03

о присуждении Азаряну Николаю Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы из ниобия для электронных линаков» по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника принята к защите 20 декабря 2018 г., протокол № 18-06, диссертационным советом Д 720.001.02 на базе Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований, почтовый адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, д.6, г. Дубна, Московская область, РФ, приказ от 11.04.2014 г. №105/нк.

Соискатель Азарян Николай Сергеевич 1984 года рождения, в 2007 г. окончил физико-математический факультет Костромского государственного университета им. Н.А.Некрасова по специальности «физика».

Н.С.Азарян работает в Международной межправительственной научно-исследовательской организации «Объединенный институт ядерных исследований» с 2006 г. в должностях инженера, младшего научного сотрудника, научного сотрудника. В настоящее время Н.С.Азарян работает в должности научного сотрудника Научно-экспериментального отдела множественных

адронных процессов ЛЯП. Диссертация выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований.

Для подготовки диссертации и сдачи кандидатских экзаменов без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре был прикреплен в Объединенном институте ядерных исследований.

Научный руководитель:

**Ширков Григорий Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, член корреспондент РАН, помощник директора Объединённого института ядерных исследований

Научный консультант:

**Поболь Игорь Леонидович**, доктор технических наук, доцент, начальник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы, Физико-технический институт НАН Беларуси

Официальные оппоненты:

**Парамонов Валентин Витальевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела ускорительного комплекса, ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», (почтовый адрес: 117312 г.Москва, Проспект 60-летия Октября 7а, тел. (495) 850-42-39, e-mail: [paramono@inr.ru](mailto:paramono@inr.ru))

**Лалаян Михаил Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрофизические установки», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», (почтовый адрес: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (495) 788-56-99 доб.9052, e-mail: [MVLalayan@mephi.ru](mailto:MVLalayan@mephi.ru))

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"», (почтовый адрес: 117218, г.Москва, ул.Б.Черемушкинская, д.25, тел. (499) 789-66-00, e-mail: [director@itep.ru](mailto:director@itep.ru)) в своем положительном заключении, составленным кандидатом физико-математических наук Кулевым Тимуром Вячеславовичем, заместителем директора по научной работе по ускорительному направлению НИЦ

«Курчатовский институт» ИТЭФ, указала: «Диссертация написана логично, аргументированно и технически грамотным языком, хорошо оформлена. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в научных трудах соискателя, неоднократно докладывались им на престижных научных конференциях, в том числе и международного уровня.

Диссертация Н.С. Азаряна является самостоятельной завершённой квалификационной работой и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук согласно п.п. 9-14 Положение о присуждении ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Автор диссертации – Азарян Николай Сергеевич – заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по социальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.»

В отзыве содержатся следующие замечания:

1. В работе практически не уделено внимания вопросам подготовки поверхности резонаторов.
2. Хотелось бы увидеть результаты измерений на рабочих уровнях мощности.

Тем не менее указано, что «...замечания не изменяют несомненно положительной оценки диссертационной работы Азаряна Н.С по степени актуальности, новизне полученных результатов и практической ценности.» Соискатель ответил на замечания.

Других отзывов на диссертацию и автореферат в совет не поступало.

Соискатель имеет 2 патента, один из которых по теме диссертации, 40 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 16 работ, 5 из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы данных РИНЦ, Web of Science или Scopus. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1) Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Ширков Г.Д., Карпович В.А., Родионова В.Н. и др., «Устройство связи для цилиндрического резонатора СВЧ», Патент BY 9583 U 2013.10.03, от 13 марта 2013, Республика Беларусь, 2013.

2) Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Расчет одноячеичного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов», Письма в ЭЧАЯ, т. 9, № 2, с. 247-268, 2012.

3) Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Измерение ультравысокой собственной добротности путём возбуждения сверхпроводящего резонатора электронным потоком», Письма в ЭЧАЯ, т. 10, № 7, с. 1282-1291, 2013.

4) Demyanov S.E., Pobel I.L., Shirkov G.D., Budagov Yu.A., Azaryan N.S. и et al., «Superconducting properties of ultra-pure niobium welded joints», Low Temperature Physics, V. 41, I.7, pp. 522-527, 2015.

5) Азарян Н.С., Ширков Г.Д., Журавский А.Ю., Петраковский В.С., Батурицкий М.А., «Изготовление деталей сверхпроводящих резонаторов из ниобия методом гидроударной штамповки», Письма в ЭЧАЯ, т. 13, № 2, с. 345-353, 2016.

6) Azaryan N.S., Budagov Yu.A., Karpovich V.A., Pobel I.L., Rodionova V.N., Shirkov G.D. et al., «Measurement of Microwave Parameters of a Superconducting Niobium Cavity», Journal of Engineering Physics and Thermophysics, V. 90, I.1, pp. 242-249, 2017.

Вклад соискателя в эти работы определяющий.

Основные результаты диссертации были представлены в 12 докладах, в том числе на международных конференциях:

- 15-я, 16-я, 17-я, 18-я Международная научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС-2011, ОМУС-2012, ОМУС-2013, ОМУС-2014), Дубна, Россия.

- 23 Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC 2012), Санкт-Петербург, Россия.

- X-Ray Free Electron Laser school (XFEL 2012), Анси, Франция.

- 4 International Particle Accelerator Conference (IPAC'13), Шанхай, Китай.
- 8 and 9 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013, MSMW '2016), Харьков, Украина.
- 16 Международная научно-техническая конференция "Технологии и оборудование ЭЛС-2014", Санкт-Петербург, Россия.
- TESLA Technology Collaboration at DESY, 2014 г., Гамбург, Германия.
- TESLA Technology Collaboration at KEK, 2014 г., Цукуба, Япония.

Из представленного списка докладов 7 доложены лично автором, его доклад на конференции RuPAC-2012 удостоен Диплома 2-й степени на конкурсе молодых учёных – участников конференции.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обусловлен как особенностями и направлениями их исследований, так и специальностью, по которой выполнена работа соискателя.

**В.В.Парамонов** является признанным и авторитетным специалистом в области прикладной электродинамики для ускорителей заряженных частиц. Работы В.В.Парамонова по теории, вопросам разработки и сооружения ускоряющих структур хорошо известны в международном научном сообществе. Разработанные при его определяющем вкладе резонаторы и ускоряющие структуры используются в отечественных и зарубежных лабораториях.

**М.В.Лалаян** является признанным специалистом в области разработки ускоряющих систем различных типов и систем СВЧ-питания для ускорителей заряженных частиц. Имеет значительный опыт практической работы по расчётам, разработке и экспериментальному исследованию сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

**НИЦ "Курчатовский институт" - ИТЭФ** является многопрофильным центром научных исследований и образования, в число основных направлений научных исследований которого входит ускорительная физика. Одним из основных структурных подразделений ИТЭФ является Ускорительный центр, объединяющий службы Института, обеспечивающие работу ускорительно-

накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН, а также научные лаборатории, деятельность которых связана с физикой пучков заряженных частиц и ускорительной техникой. Сотрудники Центра являются признанными в мире специалистами в области ускорительной физики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Создана технология изготовления методом гидроштамповки сверхпроводящих ускоряющих резонаторов из ниобия для электронных линаков. Разработана, изготовлена и исследована опытная серия резонаторов на частоту 1.3 ГГц. В созданных по собственной оригинальной технологии резонаторах достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость и получена высокая повторяемость частоты.

2. Определены геометрические параметры резонатора для частоты 1.3 ГГц в соответствии с проектными параметрами ускорителя ILC и разработано Техническое задание для изготовления одноячеичного резонатора.

3. Впервые в мировой практике создания сверхпроводящих резонаторов предложен и реализован метод гидроударной штамповки ниобиевых полужеек. Впервые в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц создана экспериментальная база для полного производственного цикла изготовления одноячеичных резонаторов. Экспериментальным путём впервые получена диаграмма штампуемости высокочистого ниобия для гидроударной штамповки и определены ключевые параметры процесса, обеспечившие полную вытяжку заготовки: предельная степень вытяжки сверхчистого ниобия составляет 1.92 при удельной энергии удара  $0.42 \text{ МДж}/\text{м}^2$ . Обеспечена точность 100 мкм в контролируемых проектных диаметрах полужеек ( $\varnothing 206.9 \text{ мм}$  и  $\varnothing 78.1 \text{ мм}$ ).

4. Реализованы режимы электронно-лучевой сварки особочистого ниобия, отвечающие современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов. Анализ микроструктуры сварных швов свидетельствует о достижении соединения высокого качества. Измерены критические температура  $T_{KP} = 8.6 \text{ К}$  и магнитное поле  $B_{KP} = 0.4 \text{ Тл}$  образцов

сварного соединения: отклонение этих характеристик от цельнолистового ниобия не превышает 10%, что является естественным следствием высоколокального термического воздействия электронным лучом.

5. Предложен и обоснован принципиально новый метод измерения ультравысоких ( $10^8 - 10^{10}$ ) собственных добротностей резонаторов. Существенное преимущество метода – его «инвазивность»: резонатор не связан с внешними СВЧ цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току при монотронной генерации. В результате численного моделирования определены стартовые условия монотронной генерации в резонаторе на 1.3 ГГц, найдены значения необходимой величины тока пучка электронов.

6. Разработано, запатентовано и экспериментально исследовано устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора. В опытном образце достигнут уровень согласования  $KCB = 1.01$ , что соответствует передаче в резонатор 99.9 % СВЧ мощности.

7. Создана экспериментальная база для исследований одноячеекных СВЧ-резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Выполнены СВЧ испытания опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных впервые с применением технологии гидроударной штамповки. Полученные значения добротности более  $10^9$ , что подтвердило стабильное достижение в резонаторах сверхпроводимости. Максимальное измеренное значение добротности составило  $2.5 \cdot 10^9$  на частоте 1.29 ГГц при достигнутом  $KCB = 1.0001$ .

#### Актуальность диссертационного исследования обусловлена следующим:

Ускорители частиц на базе сверхпроводящих ускоряющих структур находят широкое применение во многих областях современной науки. Прежде всего – это экспериментальная физика элементарных частиц, где ускорители служат основным инструментом учёных.

Ярким примером выдающегося достижения современной физики является недавнее (2012 г.) обнаружение бозона Хиггса на Большом Адронном Коллайдере

LHC на установках ATLAS и CMS. Для дальнейших экспериментов в рамках Стандартной Модели, поиска новых явлений и частиц за её пределами необходимо создание нового инструмента – электрон-позитронного коллайдера с энергией в центре масс от 500 ГэВ.

В сравнении с адронной машиной, такой как LHC, лептонный коллайдер обеспечит более оптимальное сочетание достаточной статистики с приемлемой систематикой и более благоприятным отношением эффект/фон. На сегодняшний день лидирующим проектом в этом направлении является Международный Линейный Коллайдер ILC, в котором ускоряющими структурами служат сверхпроводящие резонаторы на частоту 1.3 ГГц. В 2007 г. ОИЯИ присоединился к проекту ILC и предложил размещение коллайдера в Московской области в окрестностях г. Дубны.

Ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проблематике ILC ведутся в ОИЯИ с 2007 г. в рамках темы первого приоритета. Один из основных этапов этих тем - проект по разработке собственной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц, выполненный в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) в сотрудничестве с рядом ведущих научно-исследовательских центров Республики Беларусь.

### **Научная новизна**

Предложен и реализован принципиально новый метод формирования ниобиевых полужеек гидроударной штамповкой, ранее не применявшимся для изготовления СВЧ-резонаторов.

Впервые экспериментально определена предельная степень вытяжки при гидроударной штамповке ниобия высокой чистоты. Созданная оригинальная технология удовлетворяет требованиям производства сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

Разработано и запатентовано уникальное устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора и оптимальную передачу в резонатор СВЧ мощности.

### **Практическая значимость работы**

Впервые в научных центрах стран-участниц ОИЯИ реализован комплекс технологических процедур изготовления сверхпроводящих резонаторов из высокочистого ниобия для ускорителей заряженных частиц. Испытания опытной серии сверхпроводящих резонаторов показали: их качество удовлетворяет современным требованиям и при внедрении в промышленное производство отечественные резонаторы могут быть конкурентоспособными по сравнению с зарубежными аналогами. Опыт создания и исследования ниобиевых резонаторов нашёл продолжение в ОИЯИ в проекте протонного инжектора ускорительного комплекса НИКЛ.

### **Степень достоверности и апробация работы**

При выполнении работы получен патент, основные результаты опубликованы в пяти рецензируемых журналах. Всего результаты работы представлены в 16 научных публикациях и в 12 докладах, в том числе на международных конференциях. 7 докладов доложены лично автором, его доклад на конференции RuPAC-2012 удостоен Диплома 2-й степени на конкурсе молодых учёных – участников конференции.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием аттестованных измерительных средств и апробированных методик, а также хорошей воспроизводимостью результатов. Разработанные и созданные стенды для проведения СВЧ-испытаний резонаторов, а также применённые методики измерений сперва были отработаны на готовом одноячеечном Nb-резонаторе, полученному в рамках международного сотрудничества по программе ILC из Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) – этот резонатор был принят в качестве эталонного образца.

### **Личный вклад соискателя**

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. При его непосредственном участии выполнено научное планирование и координация всех этапов НИОКР, обеспечившее создание первой опытной серии сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц.

В соавторстве проведены теоретические расчёты по оптимизации геометрии резонатора, по результатам которых при определяющем участии автора создано Техническое задание на изготовление резонатора.

Как лично автором, так и в соавторстве, экспериментально исследованы свойства ниобия разных производителей. Автор предложил постановку и лично участвовал в экспериментах по травлению ниобия, имевших целью отработку режимов химической очистки материала. При участии автора спроектирована специализированная технологическая оснастка для ключевых этапов производства деталей резонаторов, отработаны режимы электронно-лучевой сварки резонатора. В соавторстве впервые получена диаграмма штампуемости особочистого ниобия для метода гидроударной штамповки.

Разработано и запатентовано в соавторстве устройство связи для СВЧ-испытаний резонаторов. При определяющем участии автора выбраны и реализованы методики СВЧ-измерений, созданы экспериментальные стенды и проведены испытания готовых резонаторов.

Как в соавторстве, так и лично выполнена апробация результатов исследования. Большинство публикаций и докладов по теме диссертации подготовлены и представлены лично автором.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

На заседании 18 апреля 2019 года диссертационный совет сделал вывод о том, что диссертация Н.С.Азаряна представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены результаты, имеющие важное значение для развития методов создания линейных ускорителей и, таким образом, решена важная практическая задача. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней. Совет принял решение присудить Николаю Сергеевичу Азаряну учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 25 человек, из них 5 докторов наук по специальности защищаемой диссертации,

участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введенных на разовую защиту нет, проголосовал: за присуждение учёной степени 24, против нет, недействительных бюллетеней - 1.

Заключение подготовили:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Коваленко Александр Дмитриевич

доктор физико-математических наук,  
Костромин Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Арефьев Валентин Александрович

Председатель диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Малахов Александр Иванович

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник



Арефьев Валентин Александрович

« 26 » апреля 2019 года