

## СТЕНОГРАММА

заседания № 19-03 диссертационного совета Д 720.001.02 на базе Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований от 18 апреля 2019 г.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ** диссертационного совета - доктор физико-математических наук, профессор Малахов Александр Иванович.

**УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ** диссертационного совета - кандидат физико-математических наук Арёфьев Валентин Александрович.

На заседании присутствовали члены диссертационного совета:

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, физико-математические науки:

Водопьянов Александр Сергеевич	- доктор физико-математических наук
Глаголев Виктор Викторович	- доктор физико-математических наук
Мелкумов Георгий Левонович	- доктор физико-математических наук
Никитин Владимир Алексеевич	- доктор физико-математических наук
Таратин Александр Михайлович	- доктор физико-математических наук
Тяпкин Игорь Алексеевич	- доктор физико-математических наук
Ужинский Владимир Витальевич	- доктор физико-математических наук
Арёфьев Валентин Александрович	- кандидат физико-математических наук.

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, технические науки:

Калинников Владимир Александрович	- доктор технических наук
Матюшин Валентин Тарасович	- доктор физико-математических наук
Романов Юрий Иванович	- доктор технических наук
Тимошенко Геннадий Николаевич	- доктор физико-математических наук
Тютюнников Сергей Иванович	- доктор технических наук

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, физико-математические науки:

Батюня Борис Владимирович	- доктор физико-математических наук
Кекелидзе Владимир Димитриевич	- доктор физико-математических наук
Капишин Михаил Николаевич	- доктор физико-математических наук
Мадигожин Дмитрий Турыскалиевич	- доктор физико-математических наук
Малахов Александр Иванович	- доктор физико-математических наук
Панебратцев Юрий Анатольевич	- доктор физико-математических наук
Строковский Евгений Афанасьевич	- доктор физико-математических наук

Специальность 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, технические науки:

Агапов Николай Николаевич	- доктор технических наук
Коваленко Александр Дмитриевич	- доктор физико-математических наук
Костромин Сергей Александрович	- доктор физико-математических наук
Шарков Борис Юрьевич	- доктор физико-математических наук
Ширков Григорий Дмитриевич	- доктор физико-математических наук

Стенограмма заседания диссертационного совета Д 720.001.02 в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина ОИЯИ 18 апреля 2019 г.

Защита диссертации Н.С.Азаряна «Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы из ниобия для электронных линаков» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**А.И.Малахов:** Начинаем второе заседание нашего совета. Присутствуют 25 членов совета из 31, то есть кворум у нас есть (минимум 21), и по специальности 5 докторов (минимум 3). В соответствии с требованиями положения ВАК мы правомочны. Объявляется защита диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника с названием, которое вы здесь видите. Соискатель - Азарян Николай Сергеевич.

Научный руководитель – Григорий Дмитриевич Ширков, здесь присутствует, доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, помощник директора нашего института. Имеется научный консультант – Игорь Леонидович Поболь, доктор технических наук, доцент, начальник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск. Официальные оппоненты: Валентин Витальевич Парамонов доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Отдела ускорительного комплекса ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», Москва. Михаил Владимирович Лалаян, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрофизические установки», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва здесь присутствуют. Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"», город Москва.

Слово Валентину Александровичу Арефьеву – учёному секретарю нашего совета для объявления о документах. Пожалуйста.

**В.А.Арефьев** (о поступивших в совет документах, связанных с защитой диссертации Н.С.Азаряна):

- Заявление председателю совета: Прошу принять к рассмотрению и защите мою диссертацию на тему «Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы из ниобия для электронных линаков» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Защита работы производится впервые. Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело и их дальнейшую обработку. Подтверждаю, что все представляемые к защите данные и результаты являются подлинными и оригинальными и, кроме специально оговоренных случаев, получены мною лично.

- Советом была назначена комиссия по предварительному рассмотрению диссертации в составе: Костромин, Коваленко, Арефьев. Комиссия рассмотрела диссертацию и пришла к заключению, что диссертация соответствует заявленной специальности и рекомендовала принять её к защите. Совет принял диссертацию к защите.

- Азарян Николай Сергеевич. Родился 13 декабря 1984 г., город Иваново. Гражданство – Российское, образование – высшее. Закончил Костромской государственный университет имени Некрасова, физико-математический факультет, обучался с 2002 по 2007 год, получил специальность «физик». Имеется копия диплома, по которому присуждена квалификация «физик» по специальности «физика».

- Далее, удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов: по специальности, философии и истории науки и английскому языку. Экзамены по английскому языку и специальности сданы на «отлично», по философии и истории науки – «удовлетворительно».

- Далее – деятельность. Студент университета, лаборант Костромского госуниверситета, снова лаборант Костромского госуниверситета, далее – инженер, младший научный сотрудник, научный сотрудник Объединённого института ядерных исследований, город Дубна.

- Владеет английским языком свободно, учёной степени и учёного звания нет, 40 научных публикаций и 2 патента.

- Имеется: отзыв ведущей организации; заключение научно-технического совета Лаборатории ядерных проблем – организации, где была выполнена диссертация; отзыв научного консультанта; отзыв научного руководителя, отзывы официальных оппонентов. Документы соответствуют требованиям Положения.

**А.И.Малахов:** Спасибо, Валентин Александрович. Есть вопросы по документам? Всё ясно, не имеем. Следующий пункт – это как раз слово соискателя. Пожалуйста, на трибуну. Николай Сергеевич, пожалуйста, вам слово!

**Н.С.Азарян:** Добрый день! Представляюсь: Николай Азарян из Лаборатории ядерных проблем. Диссертация моя посвящена технологии изготовления сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для линейных ускорителей электронов. Научный руководитель – Григорий Дмитриевич Ширков, научный консультант – Игорь Леонидович Поболь из Физико-Технического института Академии Наук Беларуси – к сожалению, не смог сегодня присутствовать. Официальные оппоненты оба присутствуют - это Валентин Витальевич Парамонов из Троицка и Михаил Лалаян из МИФИ, ведущая организация – ИТЭФ.

Работа делалась в соответствии с проблемно-тематическим планом нашего института в рамках темы по международному линейному коллайдеру ILC, которая открылась в нашем институте в 2007 г.

Конкретно работа по сверхпроводящим резонаторам были начаты в 2011 г в сотрудничестве с рядом научно-исследовательских организаций Республики Беларусь, и к 2015 г. мы изготовили три опытных образца сверхпроводящих резонаторов из ниобия, одноячеечных, на частоту 1,3 ГГц.

В работе решались следующие задачи: в первую очередь необходимо было провести расчёты геометрии профиля этого резонатора, и по расчётов дальше выпускалось техническое задание на изготовление, которое легло в основу всей работы. Затем также, было необходимо создать экспериментальную базу для производства деталей резонаторов, разработать технологию штамповки полуячеек резонаторов, отработать режимы электронно-лучевой сварки для ососбочистого ниобия. То есть в целом – освоить такую комплексную технологию обращения с ниобием.

Также необходимо было создать экспериментальную базу для СВЧ испытаний резонаторов при комнатной температуре и при температуре жидкого гелия и, в конечном итоге, провести СВЧ-испытания наших изготовленных резонаторов.

Дальше – обо всём подробнее.

Как я говорил, первым этапом было проектирование полуячеек резонаторов, проведены электродинамические расчёты резонатора на частоту 1,3 ГГц. Получен профиль в соответствии с проектными параметрами ускорителя ILC. Данный профиль идентичен описанному в имеющихся литературных источниках. Аналогично стандартному резонатору ILC сопряжение ячейки с трубкой дрейфа выполняется по эллипсу, что позволяет снизить перенапряжённость поля на 10%. Также была исследована зависимость собственной частоты резонатора от отклонения геометрических размеров от проектных параметров. В результате были заложены допуски 100 микрон при изготовлении этого резонатора. По результатам этих расчётов было изготовлено и выпущено техзадание, которое стало базисом работы по изготовлению резонаторов.

Следующим этапом мы определялись с поставщиком материала, из которого эти резонаторы надо изготавливать. Требования к ниобию для таких резонаторов очень высокие. Здесь универсальный метод, показывающий качество материала – это относительное остаточное сопротивление RRR – отношение активного сопротивления материала при комнатной температуре к сопротивлению при 4 К. Для таких резонаторов этот параметр должен быть не менее 300. Российский и Казахский ниобий тестировался в работе – он сразу отпадает по высокому содержанию примесных элементов. В Китае и в Японии имеются предприятия, которые выпускают серийно такую продукцию для сверхпроводящих резонаторов. На их образцах была проведена материаловедческая экспертиза: исследована микроструктура и качество поверхности листового материала в состоянии поставки. В результате выбранный поставщик – это китайская фирма “Ningxia”.

Для очистки материала от загрязнений, вносимых на различных технологических этапах, применялось химическое травление методом ВСП – это химическое травление в

стандартной смеси кислот: плавиковой, азотной и фосфорной. Были отработаны режимы травления и определены ключевые параметры процесса для удаления поверхностных загрязнённых слоёв и для очистки материала перед операцией электронно-лучевой сварки.

Теперь к изготовлению деталей резонатора. Базовой деталью резонатора является полуячейка. Для штамповки полуячейки из листового материала был применён метод гидроударной штамповки ниобия. Здесь, в отличие от стандартных инструментальных штампов, где применяется пуансон и матрица, роль выполняет жидкость. Это исключает возможность травмирования внутренней рабочей поверхности резонатора и исключает возможность загрязнения резонатора штамповой оснасткой. К тому же, так как это динамический и быстрый процесс, то ввиду высокой скорости деформации, весь объём металла при штамповке находится в пластическом состоянии, что обеспечивает точное копирование детали по матрице без остаточного пружинения.

Для ниобия такой метод применялся впервые, поэтому предварительные испытания проводились на модельных материалах. Проведённые статические испытания на разрыв показали, что механические свойства ниобия находятся между соответствующими характеристиками для меди и алюминия, и эти материалы были выбраны нами в качестве модельных для отработки всех этапов изготовления резонаторов на доступных материалах.

Проведены динамические испытания ниобия при гидроударном нагружении. Здесь впервые для ниобия была применена такая технология и впервые получена диаграмма штампуемости ниобия таким методом. Определена предельная степень вытяжки для ниобия - 1,92 при энергии удара 400 кДж/м<sup>2</sup>. И также, этот параметр лежит между соответствующими значениями для меди и алюминия, что медью и алюминием, что подтверждает правильность выбора модельных материалов.

Для изготовления полуячеек резонатора была спроектирована и изготовлена необходимая штамповая оснастка. На модельных материалах отработаны режимы штамповки полноразмерных полуячеек. Отклонения в контролируемых размерах в районе экватора резонатора и сопряжения резонатора с трубкой дрейфа – это 207 и 78 мм – не превысили 100 мкм. В результате, с первой заготовки были отштампованы полуячейки для ниобиевого резонатора.

Дополнительно возникшая работа – так, как прежде культуры обращения с ниобием мы не имели, а материал оказался довольно вязким и труднообрабатываемым, провели дополнительные исследования по отработке режимов механической обработки резанием осебочистого ниобия. Также была сконструирована и изготовлена технологическая оснастка для обработки деталей резонаторов перед сваркой. Здесь показаны детали изготовленных у нас резонаторов и резонатор в сборе, готовый к сварке. Таким образом, были отработаны все технологические процедуры изготовления деталей для одноячеечного резонатора.

Для соединения деталей резонаторов применялась электронно-лучевая сварка. Это традиционный метод, который практически не вносит загрязнения в сварные швы, и, собственно, наиболее пригодный для изготовления таких резонаторов. Исследования проводились в Физико-техническом институте Академии наук Беларуси в Минске – там

имеется машина для электронно-лучевой сварки, параметры которой здесь представлены. Были на листовом материале отработаны режимы электронно-лучевой сварки для ниобия, которые здесь представлены. Её параметры здесь представлены. Анализ микроструктуры сварного соединения показал характерный рост поликристаллического зерна в зоне термического влияния, отсутствие инородных включений в сварном шве и равномерное распределение микротвёрдости поперёк сварного соединения, равное микротвёрдости в основном материале.

Анализ качества полученных сварных соединений исследовался путём сравнения резистивных характеристик трёх серий образцов. Первая серия – это исходный листовой ниобий, вторая серия – это также листовой ниобий, по которому прошли электронным лучом с параметрами, соответствующими режиму сварки, и третья серия образцов – это непосредственно сами сваренные образцы ниобия. Экспериментально смотрелись следующие параметры при охлаждении: это температура критического перехода в сверхпроводящее состояние, ширина температурного перехода, критическое магнитное поле и ширина магнитного перехода. В экспериментах было установлено, что характеристики проплавленных и сваренных образцов идентичны, а их незначительное отклонение от контрольных образцов носят естественный характер и не принципиально относительно сверхпроводящих свойств для изготовления резонаторов.

Для сварки всех деталей резонатора уже в единое конечное изделие также была спроектирована и изготовлена технологическая оснастка. Определены режимы сварки для всех деталей резонатора, здесь они представлены в виде таблицы, а геометрия сварки – на рисунке. Таким образом, были отработаны все этапы технологического цикла изготовления резонаторов и в конечном итоге, изготовлены 5 одноячеечных резонаторов: 2 из модельных материалов и 3 ниобиевых.

СВЧ-испытания резонаторов проводились на малой мощности. На основе векторного анализатора был создан стенд для СВЧ-испытаний для комнатной температуры и для температуры жидкого гелия. Здесь представлены измеренные средние значения собственной частоты для трёх ниобиевых резонаторов. При криогенных испытаниях достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость. Измеренная величина нагруженной добротности не менее  $10^9$ , что по сути являлось пределом имевшейся у нас измерительной аппаратуры. Для этих СВЧ-испытаний было разработано устройство связи, которое оказалось весьма удачным и обеспечило хорошее согласование с измерительным трактом с коэффициентом стоячей волны близким к единице. Его конструкция была запатентована как полезная модель.

В итоге: разброс в измеренной резонансной частоте порядка 1% в ниобиевых резонаторах в криогенных испытаниях и обусловлен в первую очередь нестабильностью давления в имевшемся у нас криостате. Более показательным – разброс порядка сотых процента для ниобиевых резонаторов в испытаниях при комнатной температуре, где флуктуации давления так не влияют ввиду их отсутствия. Таким образом, высокая повторяемость резонансной частоты подтверждает высокую точность изготовления геометрии резонаторов.

Теперь переходим к выводам. В первую очередь – это общий вывод – завершён комплекс работ, обеспечивший создание оригинальной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц. В созданной партии

однорячейных резонаторов была достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость и получена высокая повторяемость частоты резонаторов. Максимальное измеренное значение добротности изготовленного резонатора составило  $2.5 \cdot 10^9$ .

Теперь переходим к выводам, подкреплённым публикациями в рецензируемых изданиях.

Были определены геометрические параметры резонатора для частоты 1.3 ГГц в соответствии с проектными параметрами ИС. По результатам расчётов было разработано Техническое Задание, которое стало основой изготовления однорячейных резонаторов. Это было опубликовано в «Письмах в ЭЧАЯ» в 2012 г.

Впервые в практике создания сверхпроводящих резонаторов был предложен и реализован метод гидроударной штамповки ниобиевых полуячеек. Создана экспериментальная база для полного производственного цикла изготовления резонаторов, которая ранее отсутствовала в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц. Экспериментальным путём впервые получена диаграмма штампуемости особоочистого 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  $0.42 \text{ МДж/м}^2$ . Достигнута высокая точность изготовления полуячеек при серийном производстве резонаторов. Конкретно, обеспечена точность 100 мкм в контролируемых проектных диаметрах полуячеек 207 и 78 мм. Было опубликовано в «Письмах в ЭЧАЯ» в 2016 г.

Реализованы режимы электронно-лучевой сварки особоочистого ниобия, отвечающие современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов. Анализ микроструктуры сварных швов свидетельствует о достижении сварного соединения высокого качества по отсутствию инородных включений, по размеру поликристаллического зерна, и по распределению микротвердости. Измерены критические температура и магнитное поле сверхпроводящего перехода в образцах сварного соединения. Отклонение этих характеристик от цельнолистового ниобия не превышает 10 %, что является естественным следствием высоколокального термического воздействия электронным лучом и не существенно относительно сверхпроводящих свойств резонатора. Опубликовано в «Физике низких температур» в 2015 г.

Также, в ходе работы параллельно был предложен и обоснован метод измерения высоких добротностей для резонаторов. Существенное преимущество этого метода является его неинвазивность – здесь 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 численном моделировании определены стартовые условия монотронной генерации в резонаторе на 1.3 ГГц, найдены значения необходимой величины тока пучка электронов. Было опубликовано в «Письмах в ЭЧАЯ» в 2012 г.

В ходе работы запатентовано и изготовлено устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора. Достигнутый уровень согласования

соответствует  $KCB = 1.01$ , что соответствует передаче в резонатор фактически всей подаваемой мощности. Запатентовано в виде «Патента на полезную модель» в 2013 г.

В ходе работы создана экспериментальная база для исследований одноячеечных СВЧ-резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Были выполнены СВЧ испытания опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных впервые с применением технологии гидроударной штамповки. Измеренные значения добротности более  $10^9$  подтвердили стабильное достижение сверхпроводимости. Конкретно – максимальное измеренное значение добротности составило  $2.5 \cdot 10^9$  на частоте 1.29 ГГц при измеренном  $KCB = 1.0001$ . Это было опубликовано в 2017 г. в «Инженерно-физическом журнале» Академии наук Беларуси.

Спасибо за внимание!

**А.И.Малахов:** Спасибо, Николай Сергеевич! Пожалуйста, вопросы? У меня вопрос такой: на диком западе такие резонаторы как изготавливают? Каким методом?

**Н.С.Азарян:** Изготавливают инструментальными штампами «пуансон-матрица» - традиционно. Это серийная технология, которую можно раздать на большое количество предприятий, которые уже готовы.

**А.И.Малахов:** А характеристики резонаторов – такие же?

**Н.С.Азарян:** Характеристики до конца мы не смогли сравнить – это отражено в отзыве ведущей организации в вопросе – я прокомментирую. Мы измерили то, что мы смогли измерить, всё остальное измерить мы не смогли.

**А.И.Малахов:** Пожалуйста, вопросы?

**Д.Т.Мадигожин:** Частота, наверное, зависит от геометрии – так?

**Н.С.Азарян:** Да, конечно.

**Д.Т.Мадигожин:** Когда вы переходите к температуре 4 К, наверное, есть сокращении размеров. Это учтено?

**Н.С.Азарян:** Да, учтено.

**Д.Т.Мадигожин:** Я имею в виду – там у вас была одна и та же центральная частота, но разный разброс.

**Н.С.Азарян:** Разброс здесь статистический по очень низкой статистике из трёх резонаторов, то есть, это между измеренной собственной добротностью в трёх резонаторах. При комнатной температуре у нас внешние условия стабильны, и на геометрию никак не влияют. А в криогенных испытаниях давление в криостате не такое стабильное, как в атмосфере и в результате флуктуации давления влияют на геометрию резонатора, что приводит к разбросу более высокому у резонансной частоты.

**Д.Т.Мадигожин:** То есть этот эффект, на самом деле, больше, чем температурные сокращения? (Колебания, связанные с давлением)

**Н.С.Азарян:** У нас – да.



**Г.Д.Ширков:** Самое главное, что у нас был образец, который вполне был воспроизведён.

**Н.С.Азарян:** Да.

**Г.Д.Ширков:** Можно я прокомментирую?

**А.И.Малахов:** Нет, нельзя – у нас будет дискуссия, а сейчас вопрос к докладчику.

Так, Георгий Левонович, Вопрос?

**Г.Л.Мелкумов:** Скажите пожалуйста, где реально, если есть предполагается использование того, что вы сделали, и в каких масштабах.

**Н.С.Азарян:** Конкретно, данные резонаторы для ILC – неизвестно, будут ли вообще использованы для ILC, так как сам проект стоит под вопросом. Такие резонаторы сейчас используются, не наши – изготовленные на промышленных предприятиях очень большими сериями за короткие сроки, в XFEL...

**Г.Д.Ширков:** Надо сказать – они используются в XFEL, и они ...

**Н.С.Азарян:** ... используются в XFEL, а результаты этой работы...

**Г.Д.Ширков:** ... и во FLASH ...

**Н.С.Азарян:** И во FLASH, да ... Изначально во FLASH.

**Г.Д.Ширков:** А разработаны были ...

**А.И.Малахов – Г.Д.Ширкову:** Ну ты же у нас уже защитился. Ты же защищённый. А теперь слушаем уровень человека, понимаешь?

**В.А.Арефьев:** Так, товарищи, давайте порядок соблюдать. Сейчас вопросы к докладчику. Он отвечает.

**Г.Л.Мелкумов:** Где будут использованы?

**Н.С.Азарян:** Сами результаты этой работы сдали заделом для другой работы, которая началась уже здесь на площадке ЛФВЭ для изготовления уже четвертьволновых резонаторов с другой геометрией – это сверхпроводящие резонаторы для планируемого инжектора ионов в ускорительный комплекс НИКА. Я в этой работе уже не участвую, но продолжение этой работы перешло сюда на площадку ЛФВЭ.

**Г.Л.Мелкумов:** И в каких масштабах?

**Н.С.Азарян:** Насколько я знаю, планируется изготовить четыре резонатора, но уже не опытные резонаторы, а резонаторы для инжектора – для рабочего ускорителя.

**А.И.Малахов:** Спасибо. Ещё вопросы, пожалуйста?

Если нет, то сейчас переходим к выступлениям, если они желают, научного руководителя. Григорий Дмитриевич, пожалуйста!

**Г.Д.Ширков:** Прежде всего, я должен сказать о значимости этой работы. Она связана с тем, что она выполнялась в рамках нашего участия в проекте ILC. И, как известно, те резонаторы, которые были разработаны для ILC – это был проект TESLA в Германии в 90-е годы, который не пошёл. Но реализован сейчас уже XFEL и FLASH, сейчас FLASH-2 строится. И там ускорительные секции, в каждой из которых по 9

резонаторов. И таких, если по несколько километров ускоритель, и 9 резонаторов имеем здесь, то это тысячи и тысячи резонаторов. Так что задача была воспроизвести технологию, с чем соискатель справился очень успешно. И в коллаборации с нашими коллегами в Минске удалось разработать новую технологию создания и получить параметры очень близкие к тому, что было. У нас были образцы этих резонаторов, которые нам любезно предоставили наши коллеги, которые участвовали в XFEL и ILC.

Ну и благодаря этому соискатель смог проявить свои замечательные качества очень пунктуального, очень тщательного работника. Ну и что надо сказать, я думаю, тоже не менее важно: это – не единственный сюжет его научной биографии. Он долго работал и занимался расчётами в группе Элкуно Аврумовича Перельштейна, и фактически, там у него была подготовленная работа. Сейчас он очень успешно занимается вместе Юлианом Арамовичем (Будаговым) совершенно уникальным прибором – инклинометром, который позволяет мерить и угловые и пространственные смещения поверхности Земли. И тут, я думаю, в принципе, уже может быть скоро материал подобной диссертации. Но сегодня мы рассматриваем эту работу – это законченная работа высокого качества, в которой соискатель, или ... Мне так и хочется сказать «подсудимый», поскольку мы тут фактически судим его работу ... проявил себя очень успешно. И я считаю, что он вполне достоин и заслуживает присуждения ему кандидатской степени. Буду голосовать «за», и прошу вас тоже поддержать. Спасибо!

**А.И.Малахов:** Спасибо, Григорий Дмитриевич!

Так, у нас, значит, ещё имеется консультант научный, но как было сказано, не смог приехать из Белоруссии – Игорь Леонидович Поболь. Но есть его, как это называется ...

**В.А.Арефьев:** Отзыв, да

**А.И.Малахов:** Отзыв на диссертацию. Можно его посмотреть, может заключительную часть – что он там пишет?

**В.А.Арефьев** (зачитывает отзыв): Вот отзыв научного консультанта. Первая часть его относится к вопросам постановки задачи и измерениям в разработке технических заданий и так далее. Я зачитаю выводы, какие делает научный консультант.

Николай Сергеевич Азарян является соавтором 16-ти публикаций, из них 5 – в рецензируемых журналах и 1 патент. Представлено 12 научных докладов, в том числе на международных конференциях. Основная часть публикаций и докладов по теме диссертации подготовлена им лично.

В процессе работы Николай Сергеевич Азарян показал себя высококвалифицированным научным сотрудником, являясь основным исполнителем от ОИЯИ по разработке научных и технологических основ изготовления сверхпроводящих резонаторов, он выполнял также роль координатора по планированию научной работы, взаимодействию всех участвующих в работе научно-исследовательских организаций Беларуси и контактам с зарубежными профильными центрами.

Результаты, полученные в выполненной работе, послужили основой для проводимых в настоящее время разработке и изготовлении совместными усилиями учёных России и Беларуси сверхпроводящих резонаторов для протонного инжектора ускорительного комплекса НИКА в ОИЯИ. Кроме того, они являются составной частью

программы Союзного государства России и Беларуси «Ускорительный комплекс на основе сверхпроводящих резонаторов».

Выполненная Николаем Сергеевичем Азаряном диссертационная работа «Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы из ниобия для электронных линаков» полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.20, а автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Автореферат диссертации хорошо представляет содержание диссертационной работы, которая выполнена на высоком научном уровне, отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и заслуживает положительной оценки.

Научный консультант, начальник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы Государственного научного учреждения Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент, Поболь Игорь Леонидович.

**А.И.Малахов:** Спасибо! Ну что, теперь мы переходим к официальным отзывам.

**В.А.Арефьев** (зачитывает отзыв): Ведущая организация – Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт – Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова".

Применение сверхпроводимости для разработки высокочастотных ускоряющих резонаторов во многом определяет современное развитие ускорительной техники. Высокая эффективность сверхпроводящих резонаторов делает необходимым их использование при разработке и реализации крупномасштабных ускорительных комплексов, таких как, например Международный Линейный Коллайдер, установка на пучках редких изотопов, а также проект DERICA в Объединённом институте ядерных исследований. Таким образом, является актуальным проведение работ, направленных на разработку и создание технологии изготовления сверхпроводящих высокочастотных структур для ускорителей заряженных частиц. В диссертационной работе Азаряна решён комплекс важных научно-технических задач по созданию оригинальной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов на частоту 1,3 ГГц из особоистого ниобия для электронных линейных ускорителей.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует ее названию и специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Автореферат полностью соответствует опубликованным работам, содержанию диссертации и отражает ее основные положения.

Новизна результатов диссертации не вызывает сомнений. Предложенный и реализованный метод изготовления полуячеек резонатора посредством гидроударной штамповки ниобия ранее не применялся в мировой практике изготовления сверхпроводящих резонаторов. Полученная в работе диаграмма штампуемого особоистого листового ниобия при гидроударном нагружении и ключевые параметры процесса также являются важными новыми результатами принципиального научного значения. Новизна разработанного в работе устройства связи подтверждена патентом.

Личный вклад автора в диссертационную работу является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке задач, результаты, приведенные в диссертации, получены при его непосредственном участии, а ряд результатов получен самим автором.

По работе могут быть сделаны следующие замечания:

Первое: Одним из важных вопросов создания сверхпроводящих ВЧ-резонаторов является вопрос подготовки поверхности резонаторов. В работе этому вопросу практически не уделено внимания.

Второе: Хорошая повторяемость значения собственной частоты на резонаторах опытной партии является положительным фактом, но это только первый шаг. Хотелось бы увидеть результаты измерений на рабочих уровнях мощности.

Тем не менее, данные замечания не изменяют несомненно положительной оценки диссертационной работы Азаряна по степени актуальности, новизне полученных результатов и практической ценности. Созданная технология удовлетворяет современным критериям производства сверхпроводящих ниобиевых резонаторов, а экспериментальные исследования опытной серии таких резонаторов, впервые изготовленных с применением гидроударной штамповки, показали достижение в них стабильной сверхпроводимости и реализацию жёстких производственных допусков.

Технология, разработанная в ходе реализации диссертационной работы может быть востребована как в международных, так и в отечественных проектах современных научных установок на базе линейных ускорителей, как электронов, так и ионов. В частности, данная технология уже адаптируется для создания четвертьволновых сверхпроводящих резонаторов в рамках проекта НИКА. Рассматриваемый в Дубне проект установки DERICA, а также проект многодисциплинарной установки BELA в НИЦ «Курчатовский институт»-ИТЭФ, также предполагают использование данной технологии при создании линейных ускорителей на сверхпроводящих резонаторах.

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 Николая Сергеевича Азаряна является самостоятельной завершенной квалификационной работой и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук согласно пунктам 9-14 Положения о присуждении ученых степеней. Автор диссертации, Азарян Николай Сергеевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертации Азаряна Николая Сергеевича «Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы из ниобия для электронных линаков» и утвержден на заседании секции №3 Ученого совета НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ 11 марта 2019 г., протокол №.2

Текст отзыва составлен заместителем директора по научной работе по ускорительному направлению НИЦ «Курчатовский институт»-ИТЭФ, кандидатом

физико-математических наук Кулевым Тимуром Вячеславовичем. Утверждён директором НИЦ «Курчатовский институт»-ИТЭФ, доктором физико-математических наук Егорычевым.

**А.И.Малахов:** Спасибо! Там кое-какие критические замечания были – ответьте пожалуйста.

**Н.С.Азарян:** Да, там первое замечание касается качества поверхности...

**А.И.Малахов:** Поверхности. Подготовке поверхности.

**Н.С.Азарян:** ... подготовке внутренней поверхности резонатора. Да, действительно для таких резонаторов – очень высокие требования к качеству внутренней поверхности резонаторов. В диссертации имеется параграф, посвящённый химическому травлению внутренней поверхности резонаторов, касающийся исключительно только очистки материала от загрязнений и снятию шероховатостей после листового проката на исходном материале. Кроме этого, действительно, для таких резонаторов применяются различные технологии улучшения рабочей поверхности – это электро-полировка, которую хотели сделать, но не сделали, так как не уложились в финансирование на создание дополнительно установки для электрохимической полировки. Существуют технологии «тренировки» поверхности на высокой мощности, но у нас также не было технической возможности осуществить такие эксперименты на имеющейся аппаратуре.

**А.И.Малахов:** Так, ещё один – второе замечание.

**В.А.Арефьев:** Замечание касается... «Хотелось бы увидеть результаты измерений повторяемости значений собственной частоты на рабочих уровнях мощности».

**Н.С.Азарян:** Согласен с замечанием полностью. К сожалению, на рабочем уровне мощности при градиенте ускоряющего напряжения 35 МВ/м у нас не было также технической возможности провести эксперименты. Изначально планировались такие эксперименты в Фермилабе и была договорённость, но в ходе работы по политическим причинам такая возможность у нас в 2014 г. закончилась.

**А.И.Малахов:** Спасибо. Хорошо. У нас ещё один отзыв из ЛЯПа.

**В.А.Арефьев** (зачитывает отзыв): Заключение Научно-технического совета Лаборатории ядерных проблем, как организации, где была выполнена диссертационная работа.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность: ускорители частиц на базе сверхпроводящих ускоряющих структур находят широкое применение во всех, многих областях современной физики. Прежде всего – это экспериментальная физика элементарных частиц, где ускорители служат основным инструментом исследований.

Изготовление сверхпроводящих резонаторов – это комплексный высокотехнологичный процесс, в котором задействованы последние достижения в криогенике, вакуумной технике, химии, материаловедении, СВЧ-технике. На сегодняшний день в странах-участницах ОИЯИ отсутствуют серийные технологии

изготовления сверхпроводящих резонаторов, и в первую очередь в работе ставилась задача освоения зарекомендовавших себя технологий с целью обеспечения проекта ИЛС дополнительным производителем резонаторов в ОИЯИ и в странах-участницах.

Научная новизна: предложен и реализован принципиально новый метод формирования ниобиевых полуячеек гидроударной штамповкой, ранее не применявшийся для изготовления СВЧ-резонаторов. Разработано и запатентовано уникальное устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора и оптимальную передачу СВЧ-мощности в резонатор.

Практическая ценность 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, что 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 НИКА.

Далее отмечаются результаты работы, в получение которых соискатель внёс определяющий вклад – это:

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

Экспериментально исследованы свойства ниобия разных производителей. Выполнена серия экспериментов по химическому травлению ниобия для отработки режимов химической очистки материал.

Спроектирована специализированная технологическая оснастка для ключевых этапов производства деталей резонаторов, отработаны режимы электронно-лучевой сварки резонатора. Впервые получена диаграмма штампуемости осочистого ниобия для метода гидроударной штамповки.

Разработано и запатентовано устройство связи для СВЧ-испытаний резонаторов. Выбраны и реализованы методики СВЧ-измерений. Созданы экспериментальные стенды и проведены испытания готовых резонаторов.

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. При его непосредственном участии выполнено научное планирование всех этапов НИОКР, обеспечившее создание первой опытной серии сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц. Подавляющее число публикаций и докладов по теме диссертации подготовлены и представлены лично автором.

Достоверность представленных в диссертации 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 сначала были отработаны на готовом одноячеечном ниобиевом резонаторе, полученном в

рамках международного сотрудничества по программе ILC. Этот резонатор был принят в качестве эталонного образца.

При выполнении работы был получен патент, основные результаты опубликованы в пяти рецензируемых статьях. Всего результаты представлены в 16 научных публикациях, в 12 докладах, в том числе на международных конференциях.

Далее список основных работ, перечень.

Заключение: Проведённые исследования обеспечили создание оригинальной технологии производства ниобиевых резонаторов, которая полностью удовлетворяет требованиям по точности, качеству и экономичности, предъявляемым к изготовлению сверхпроводящих ниобиевых резонаторов. В созданной партии одноячеечных резонаторов достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость и получена высокая повторяемость частоты резонаторов, изготовленных по разработанной технологии.

Диссертационная работа Азаряна Николая Сергеевича «Сверхпроводящие резонаторы для электронных линаков» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата наук по специальности 01.04.20 – «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Заключение принято на заседании научно-технического совета Лаборатории ядерных проблем, присутствовало на заседании 38 членов НТС из полного состава 40 человек. Результаты голосования: «за» - 35 , «против» - нет, «воздержалось» - 3. Протокол от 24 мая 2018 г. Отзыв составлен доктором физ.-мат. наук Карамышевой, подписан председателем НТС ЛЯП Шелковым, учёным секретарём Госткиным, и утверждён директором Лаборатории ядерных проблем – доктором Бедняковым.

**А.И.Малахов:** Так, всё. Замечания там, по-моему, я не услышал. Дальше, тогда, у нас официальный оппонент. Согласно тому, как написано в автореферате, у нас первым – Валентин Витальевич Парамонов, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Отдела ускорительного комплекса ... Институт ядерных исследований РАН, город Москва. Пожалуйста, Валентин Витальевич, вам слово!

**В.В.Парамонов:** Я представляю Институт, где ускоритель является нормально-проводящим. У нас в Троицке 600 МэВ-ный линак. Это линак протонов на энергию 600 МэВ, средний ток – полмиллиампера. То есть, он был сооружён, так сказать, сейчас полностью работает. Но нет у нас в России сверхпроводящих линаков. Но, тем не менее, моя научная специальность – это ускоряющие структуры. И, находясь в деле, так сказать, больше сорока лет, имею достаточно мощное научное сотрудничество зарубежное. Я могу как-то оценивать. Разрешите мне походить немного вокруг да около, а потом я выйду напрямик на эту диссертацию.

Время быстро летит, и всего лишь, как-то не так давно – лет 20 назад, мы рубились: какой вариант ускоряющей структуры будет – нормально-проводящий, или сверхпроводящий. Я лично участвовал в таких баталиях. Это было в Цукубе при разработке ускоряющей структуры их протонного линака на участке от 180 МэВ до 400 МэВ. И это был, обратите внимание, 2002 год. Тогда ещё не было SNS-а, и не было

решения об ILC, сверхпроводимости, как говорится. И времена были такими, что вот есть отработанные варианты нормально-проводящие. Отполированные. Вы знаете, как парусник – совершенство. И есть развивающаяся сверхпроводимость, которая перспективна. Но вот надо принимать решение сейчас. И вот, наверное тогда в 2002 году мы одержали последнюю победу в нормальной проводимости. Нормально проводящий вариант был принят.

Тогда для ILC рассматривалось два варианта: это, так называемый S-band, значит SLAC и Фермилаб вместе с КЕК-ом, и сверхпроводящий вариант TESLA. Решение было отдано на суд, так сказать, экспертов, которые, вообще говоря, были не ускорительщики, а которые были, вот, здоровые такие... Ну, «smart-people», ... авторитеты. И в сентябре 2004 года последовало решение, что Международный линейный коллайдер ILC будет реализован на сверхпроводящей технологии.

Но очень быстро люди поняли, что вопрос здесь не только в коллайдере ILC. Во-первых, те лаборатории, которые вели исследования на нормально-проводящие структурах, очень быстро переориентировались. Тот же Фермилаб, тот же КЕК – моментально, в течение двух недель. Но потом люди поняли, что вот эта TESLA – это не только коллайдер ILC. И TESLA сейчас позиционирует себя, как технологическую коллаборацию. Потому что, вот всё это развитие показало, что развивается новая технология, и применение этой технологии позволяет в уникальных физических установках получить те параметры, которые нормально-проводящие резонаторы получить не могут.

Это в общем. Но в частности, из этого следует содержание диссертации соискателя несколько шире, понимаете, заявленного названия. Там речь идёт, в общем-то говоря, о технологической находке, которая не только для электронных линаков. Понимаете, если эллиптические резонаторы рассматривать, то сейчас общепринята точка зрения, что эти резонаторы наиболее подходят для ускорения с относительной скоростью больше 0,5, и рабочая частота выше 600 МГц. Понимаете, а какая там будет частица – электрон, ядро тяжёлое, или ... это уже другой вопрос. Поэтому, значит, речь идёт о технологии.

И если посмотреть, вот люди поняли, что освоение этой технологии – новая возможность. Вернее, я уже сказал – формулировать это надо так, что применение этих технологий СВЧ-сверхпроводимости позволяют получить такие результаты, которые с нормальной проводимостью – недостижимы. Это для класса машин.

Теперь, что касается другого несколько. Так выяснилось, что очень большое различие в направлениях развития ускоряющих структур есть – между нормально-проводящими и сверхпроводящими. Ну, на нормально-проводящих я останавливаться не буду, а в сверхпроводящих – основное значение имеют вопросы материаловедения и технологии изготовления. Чистой технологии.

Насколько это важно. Вот я могу привести пример, который видел сам. В середине августа было, в четвёртом году, озвучено решение о том, что ILC будет сверхпроводящим. Тут же Фермилаб, который до этого исповедовал нормально-проводящие, заявил, что переориентируется. С середины сентября в DESY была команда, ну скажем так: «по обмену опытом». Под руководством Марка Чемпиона. Это группа, человек, наверное, из 20-ти. И они заимствовали опыт. Какой: документацию,



готовые образцы, действующие станки, установки. Значит, в конце концов, они даже позаимствовали полный криостат с четырьмя, вот секциями, как вы сказали из девяти штук. Это было в 2004 году.

А вот после у них 6 лет были публикации такие: ну вот чего-то..., ц-ц..., ну вот... И только в десятом году они объявили, что они освоили достигнутые технологии, достигли уровня, и будут двигаться дальше. Сейчас Фермилаб – один из признанных лидеров в разработке ускоряющих структур на основе сверхпроводимости. А что касается, вот вопрос применения, то пал последний мятежник, ну или сопротивление последние – SLAC. Он в последнюю очередь принял, но вот лазер на свободных электронах LCLS-2 будет сверхпроводящим. Хотя они у себя не развивают эту технологию, а будут закупать.

Ну вот, что касается... Вот это я хотел сказать, что очень важно – освоение и разработка технологических аспектов. И причём это, вот то, что определяет актуальность этой диссертации как научной, значит, поиск возможных решений. Так и значение этой диссертации, результатов этой диссертации для, скорее, физики и техники ускорителей в нашей стране, и в частности, вот в вашей организации. Потому что те результаты, которые получены – они, в общем-то, применимы не только для эллиптических резонаторов, которые для высоких энергий. То есть это – вопросы изготовления, вообще говоря, технологии, материаловедения, и технологии изготовления ну практически, любых.

Сейчас вот популярны две или три разновидности этих резонаторов, и при изготовлении всех их используется одни и те же приёмы. Ну, как-то так – одни и те же приёмы. И вот результаты работы материаловедческой – они применимы здесь, поэтому вполне естественно, что говорится, что вот результаты уже применяются для изготовления четырёх четвертьволновых резонаторов, которые в линии инжектора лёгких ионов в НИКА. Но надо ещё понимать, что если бы... Почему я очень рад, что такая работа есть – потому что если бы её не было – ну вот те проекты, все остальные, вот проект DERICA, который у вас рассматривается – без сверхпроводимости здесь – его рассматривать ... Ну можно рассматривать, но развивать можно только со сверхпроводимостью здесь. Моё вот такое мнение, потому что сверхпроводимость надо иметь «in house». Альтернатива – это только покупать. Ну, вряд ли здесь ... Это вопрос уже более политический, но крайне важно иметь такие работы.

Если речь идёт о рассмотрении другого проекта – вот нейтронный источник. Если там упоминается как драйвер – ускоритель протонов где-то на энергию, там где-то уже в районе 500-600 МэВ, значит, и с приличной мощностью пучка. То тоже без сверхпроводимости не обойтись. Иначе на эти установки будут работать все электростанции Федерального округа Центрального, что нам никто не позволит. Поэтому, я считаю, что работа, вот эта вот, интересная, важная, и то, что в ней рассмотрено – направление, результаты. Эта гидроударная штамповка – действительно, такого не было, в этом методе есть свои преимущества. Естественно, было бы крайне ценно и полезно довести до логического конца – испытаниям на высоком уровне, чтобы у вас была, так сказать, на руках, полная карта. Чтобы, так сказать не было вопросов – там уж конечный судья – это высокий ВЧ. Ну, не высокий уровень. Уровень в как раз у сверхпроводимости – там низкий. Но, рабочий уровень.

Теперь, что касается диссертации. Ну, о содержании я говорить я, наверное, не буду – здесь много говорится, рассматривается. Работа хорошо структурирована. Она написана грамотным языком, и мне понравилась такая структура. Вы знаете – вот такое общезначимое исследование: определение задачи, выбор методов решения, решение с использованием... то есть это – экспериментальное решение с использованием современных... самых современных приборов, и мотивированный и логически обоснованный вывод по данной работе. Такие выводы присутствуют на каждой части, поэтому ещё раз повторю узловые результаты. То есть, по моему, эту работу... в ней безусловно, получены результаты, которые следует квалифицировать как важные, содействующие вот, или позволяющие решить крупную задачу. По положению кандидатской – это содействующее. Решение крупной задачи – ну здесь, по моему, это совершенно ясно – эти результаты содействуют созданию сверхпроводящих резонаторов, что, вообще говоря, определяет решение наших крупных задач – установок таких, и уже дальнейшее фундаментальное исследование.

Написано хорошим языком, вполне достаточная апробация. Ну, вот направление этой диссертации – оно полностью удовлетворяет, её вот вписыванию в рамки нашей специальности, то есть это по технике ускорителей заряженных частиц, сейчас. Автореферат соответствует содержанию. Ну и в целом, эта работа соответствует требованиям положения и за цикл экспериментальных исследований, проведённым на высоком научно-техническом уровне, который показывает, в общем, то, что специалист у нас уже достаточно грамотный такой исследователь, понимаете – сложившийся исследователь. И полученные результаты – эту диссертацию следует оценить положительно, и автору её присудить степень кандидата технических наук. Здесь у меня сомнений нет.

**А.И.Малахов:** Всё, да? Спасибо, Валентин Витальевич! Ну, замечания?

**В.В.Парамонов:** А, замечания... Вы знаете, ну здесь замечание я бы ... Здесь начало работы, здесь проделан такой большой кусок, что как-то с замечаниями ...

**А.И.Малахов:** Ну нет, так нет...

**В.В.Парамонов:** Пожелание есть вот. Пожелание разобраться – там три точки, три резонатора. Вот две рядом, а одна выброшена. Вот объясните – почему.

**А.И.Малахов:** Спасибо.

**Н.С.Азарян:** Да, действительно, вот оппонент заметил. Как-то мы проигнорировали, прошли мимо, что два резонатора – первый и третий изготовленный – они действительно по частоте ещё лучше, чем то, что я показал здесь на слайде – между собой согласуются. Низкая статистика – вообще никакая на двух резонаторах, но у них очень близкая частота. А у третьего резонатора она отклонена. Вот после вопроса оппонента в отзыве, который я прочитал, я распаковал эти резонаторы, посмотрел. Второй, действительно, чуть-чуть меньше этих резонаторов – не в размере. Просто геометрически я его промерил. И есть небольшое биение. Работа эта... Последний резонатор мы измеряли в 2015 г. в декабре. Когда второй резонатор измеряли – в криогенных при зажиме, перед откачкой, фланца, сварка не выдержала, и сорвался

фланец с трубки дрейфа. Пришлось разбирать, немножко подрезать и переваривать. Поэтому, действительно, да – у этого резонатора частота чуть-чуть поменьше...

**А.И.Малахов:** Понятно.

**Н.С.Азарян:** ... повыше.

**А.И.Малахов:** Ну что, тогда у нас следующий оппонент – Михаил Владимирович Лалаян, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрофизические установки», МИФИ. Пожалуйста, Михаил Владимирович!

**М.В.Лалаян:** Спасибо! Я с вашего разрешения отзыв зачитывать не буду – основные положения скажу.

**А.И.Малахов:** Ваше право.

**М.В.Лалаян:** Основные моменты озвучу.

Ну, собственно, чему посвящена работа – мы уже неоднократно сегодня слышали. Это разработка собственной технологии производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов. Эта технология, ну и вообще говоря, такие вот ускорители... Собственно сама проблематика производства таких вот сверхпроводящих резонаторов, кроме чисто научной и большой достаточно, существенной составляющей, имеет и большую чисто технологическую и производственную. Такой комплекс технологических и производственных задач, без решения которых это направление ускорительной техники просто развиваться не может, потому что не получится нормально функционирующая установка.

Собственно, это направление, если попытаемся посмотреть чем занимаются вокруг нас – во всех крупнейших ускорительных центрах во всём мире исследованиями в этой области, частности, которым посвящена работа, выделяется крайне большое внимание, потому что это единственная, по факту, технология, которая позволяет получить пучки заряженных частиц с прецизионными параметрами на установках, которые работают в непрерывном, или близком к таковому, режимам. Соответственно, такие вот возможности в свою очередь открывают пути для самого широкого использования таких вот установок, начиная от физики высоких энергий, и заканчивая возможными применениями в энергетике.

Собственно, в рамках решения поставленной задачи, Николай Сергеевич выполнил полный объём работ, полный цикл работ, начиная от численного моделирования и разработки формы, разработки геометрии ускоряющего резонатора, до постановки всего комплекса производственных и ... производств... Всего комплекса производственных, скажем так – решения производственных вопросов и метрики резонаторов и экспериментального определения их электродинамических, в первую очередь, характеристик.

В результате были изготовлены и протестированы три сверхпроводящих резонатора, которые по результатам полностью уложились в те требования, которые к ним предъявлялись. Все этапы работы, все этапы технологической цепочки, которая является одним из самых больших, скажем так, основных результатов вот этого исследования – они достаточно подробно задокументированы и изложены в рукописи диссертации, которая, в свою очередь, адекватно отражена в автореферате.

Как таковых, недостатков, я отмечать бы не хотел. Скажем так – некоторые пожелания – чуть-чуть более подробно описать следовало бы, с моей точки зрения, методики настройки резонаторов на получение требуемых электродинамических высокочастотных характеристик, и чуть более подробно рассмотреть известную методику измерения добротности по декременту затухания, которая гораздо проще в реализации, чем предлагаемый подход по потере энергии электронного пучка.

Тем не менее, эти вот замечания принципиального характера не имеют. Под сомнения основные результаты полученной автором диссертации и ценность самой работы не умаляют и под сомнение не ставят.

Диссертация требованиям, которые предъявляет ВАК к работам подобного рода, полностью отвечает. Содержанию паспорта специальности 01.04.20 полностью соответствует, автореферат правильно отражает содержание диссертации, о содержаниям которой специалистам достаточно хорошо известно.

Считаю, что соискатель Азарян Николай Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по 01.04.20.

Спасибо!

**А.И.Малахов:** Спасибо, Михаил Владимирович! Так, ну с пожеланиями вы этими согласны?

**Н.С.Азарян:** Согласен.

**А.И.Малахов:** Спасибо. Так, значит, мы с отзывами закончили. Вот, ответы там прозвучали.

Теперь объявляется общая дискуссия, в которой могут участвовать все желающие. Пожалуйста, кто хочет выступить – вам слово.

Юлиан Арамович, вы что-то хотите выступить?

**Ю.А.Будагов:** Нет-нет.

**А.И.Малахов:** А куда вы пошли?

**Из зала:** Выбегает!?!

**Ю.А.Будагов:** Я хочу просто прогуляться.

**А.И.Малахов:** Просто погулять... Ну это тоже можно. ВАК не запрещает.

Так, значит кто с дискуссией хочет выступить?

Так, значит пока не видно, да...

Ну что, мы послушали диссертацию, оппонентов, руководителя. Консультанта послушали – бумажку прочитали.

В общем, у меня есть полное впечатление как голосовать. По-моему, здесь вопросов нет. Действительно, работа выполнена, в общем то, интересная, полезная, видно, что она, так сказать, будет использоваться, и методика, которая предложена – оригинальна, несомненно перспективна. Значит мы можем проголосовать

соответствующим образом, и тогда мы будем переходить к дальнейшему шагу, то есть сначала мы предоставим вам заключительное слово. Пожалуйста!

**Н.С.Азарян:** В заключение я хочу поблагодарить, в первую очередь, своих руководителей, консультанта – Григория Дмитриевича и Игоря Леонидовича, который сегодня не приехал на защиту. Также, самое важное – стоит благодарить моих научных наставников – это Юлиан Арамович Будагов – здесь прогуливается, вот. И также – бывшего коллегу из ЛФВЭ – Элкуно Ааврумовича Перельштейна, с которым я когда-то здесь в Дубне начинал работать. Всех коллег, с которыми я здесь работал в Институте – коллеги из НЭОНУ: Галину Алексеевну Карамышеву, Юрия Григорьевича Аленицкого, Сергея Костромина, Виктора Смирнова, Сергея Борисовича Ворожцова, а также коллегу из ЛЯП, с которым мы работали вместе над этой работой – это Дмитрий Львович Дёмин. И особо важно поблагодарить коллег из Минска, с которыми мы вместе работали. Вот здесь присутствует один человек – Сергей Юревич, который приехал на защиту. Это в первую очередь благодарность Михаилу Антоновичу Батурицкому, который сейчас борется с тяжёлой болезнью. Коллегам из Физико-технического института, из НПЦ Академии наук по материаловедению – Югору Канюкову и Сергею Евгеньевичу Демьянову. Из НИИЯП БГУ – бывшим сотрудникам НИИЯП БГУ – Родионовой и Карповичу. И спасибо всем присутствующим здесь за внимание, и спасибо совету за то, что дали возможность выступить и защищаться в вашем совете.

**А.И.Малахов:** Так, спасибо, Николай Сергеевич! Присаживайтесь!

**Из зала:** Можно вопрос?

**А.И.Малахов:** Какой вопрос?

**Из зала:** Лаборатория ядерных проблемММ. Два «М». А в диссертации – одно «М» или два «М»?

**А.И.Малахов:** ММ – это из-за уважения, наверное? Большого...

**Из зала:** А, понятно.

**Г.Д.Ширков:** Не придётся перезащищать диссертацию?

**А.И.Малахов:** Ну, для слушающего что?

**С.И.Тютюнников:** Главное, что не ЛФВЭ – правильно сделал.

**А.И.Малахов:** Так, давайте дальше двигаться. Значит, у нас теперь, надо значит, самое важное дело – избрать счётную комиссию. Тут вот мы посовещались в президиуме нашем. Есть предложения поучаствовать, Сергей Иванович Тютюнников, как вы?

**С.И.Тютюнников:** В следующий раз, Александр Иванович.

**А.И.Малахов:** Значит Георгий Леонович, войдёте в положение? Поможете? Так, и кто у нас ещё? И, Михаил Николаевич, вы там что-то внимательно у нас читаете, может быть поучаствуете? Михаил Николаевич, как пишем? Поучаствуете? Так, и Валентин Александрович Арефьев. Нет возражений ни у кого?

Тогда комиссия приступит к работе. Так, а значит, тем самым временем, чтобы сэкономить, я бы хотел спросить. Вот заключение всем раздали? Если есть замечания у

кого-то, то просьба высказать. Если нет замечаний, то, значит, тогда будем мы принимать в том виде, в котором написали.

Ну, я не вижу замечаний.

Теперь голосование, ребята! В прошлый раз проголосовали некоторые неправильно, то есть обводили кружками. Никаких помарок не должно быть. Вычёркивается то, что ненужно, и никаких там дополнительных знаков не надо ставить.

### **Проходит голосование**

**А.И.Малахов:** Теперь объявление ещё одно. У нас в три-тридцать опять для членов нашего уважаемого совета чай, кофе. В том же месте – дорогу переходим, второй этаж направо, холл – там чай-кофе. Так что, пожалуйста – и сок, и пирожки там, и булочки, всё свежее. Я думаю, что мы сейчас в как раз закончим. Немножко расслабимся.

### **Проходит голосование**

**Проголосовали,** Г.Л.Мелкумов вскрывает ящик для голосования, счётная комиссия подсчитывает голоса, В.А.Арефьев составляет протокол голосования.

**А.И.Малахов:** Так, уважаемые члены совета! Счётная комиссия закончила работу, готова доложить результат. Пожалуйста, Георгий Леонович, председатель.

**Г.Л.Мелкумов:** Комиссия, избрана для подсчёта голосов по диссертации Азаряна Николая Сергеевича на соискание учёной степени кандидата технических наук. Значит, присутствовало на заседании 25 членов совета, по профилю – 5 членов, роздано бюллетеней – 25, осталось нерозданных бюллетеней – 6, оказалось в урне бюллетеней - 25. «За» - 24, «против» – нет, недействительный бюллетень – 1.

**А.И.Малахов:** Мы обязаны утвердить протокол. Кто «За» - прошу проголосовать. Спасибо. Против есть? Нет. Воздержавшиеся? Нет. Протокол мы утвердили. Теперь заключение. Я опросил – было одно замечание: в п.1 раздела «диссертационный совет отмечает...» добавить слова «методом гидроштамповки». Если других нет замечаний – кто за то, чтобы утвердить это заключение? Прошу проголосовать.

**А.И.Малахов:** Спасибо. Принимается. Против нет, воздержавшихся нет. Таким образом, сейчас мы имеем полное право поздравить Николая Сергеевича с вашим решением. Заседание объявляется закрытым.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ диссертационного совета

Малахов А.И.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ диссертационного совета

Арефьев В.А.

« 7 » мая 2019 г.

