

*На правах рукописи*

Рыбаков Иван Викторович

Физическое обоснование нормально  
проводящего ускоряющего резонатора  
для интенсивного линейного ускорителя  
ионов водорода

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:**

***Парамонов Валентин Витальевич***, доктор физико-математических наук, ИЯИ РАН, Отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

***Павлов Юрий Сергеевич***, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, лаборатория радиационных технологий, заведующий.

***Дюбков Вячеслав Сергеевич***, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт лазерных и плазменных технологий, доцент.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва).

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.119.01,

кандидат физ.-мат. наук,

С. В. Демидов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень разработанности темы диссертации

В настоящее время ускорители протонов и ионов водорода используются как при проведении фундаментальных исследований, так и для междисциплинарных задач. Сильноточные ускорители на средние энергии (500-800 МэВ) предназначены для исследования редких процессов в области физики ядра, но благодаря большой мощности пучка (сотни кВт) являются уникальными инструментами для прикладных работ по радиационной физике, материаловедению, медицине и др. направлениям. Действующие в мире на текущий момент такие ускорительные комплексы были введены в эксплуатацию в 1970-х – 2000-х годах. В современных условиях постройка новых ускорителей со схожими параметрами связана со значительными материальными затратами, в связи с чем проводятся работы по модернизации и ремонту существующих установок [1].

Нормально проводящие резонаторы для основных частей линейных ускорителей с относительной скоростью ионов водорода  $\beta > 0,4$  построены по схожему принципу. Они состоят из секций, построенных из бипериодической структуры, которые соединены мостовыми устройствами, питание всего резонатора осуществляется одним клистроном. Их общие характеристики определяются как типом ускоряющей структуры, так и компоновкой. Наиболее сложной является разработка первых резонаторов основных частей, в которых происходит захват пучка из начальной части на основе структуры с трубками дрейфа.

В ускорителях ионов водорода присутствует ограничение на максимальный импульсный ток пучка в  $\sim 50$  мА, вызванное ограничениями радиационной безопасности [2]. В этой связи понятие интенсивного линейного ускорителя определяется длительностью импульсов в рабочем режиме, которая на действующих установках составляет до величин  $\sim 600$  мкс. Такая высокая длительность им-

пульсов приводит к высоким потерям мощности в случае использования нормально проводящих структур, поэтому в мировой практике для интенсивных линейных ускорителей рассматриваются и сверхпроводящие структуры [3]. Однако построение сверхпроводящих резонаторов связано с необходимостью решения широкого круга технических задач, что обуславливает необходимость рассмотрения перспективных нормально проводящих структур с улучшенными характеристиками для применения в интенсивных ЛУ ионов водорода.

Одной из таких перспективных структур является Cut Disk Structure (CDS) [4]. Эта структура изначально была предложена для ускорения частиц в области высоких энергий,  $\beta \sim 1$ , и успешно апробирована в ускорителе электронов DESY PITZ [5]. Для  $\beta \sim 0,4-0,5$  в CDS было показано существенное снижение эффективного шунтового сопротивления. Однако другие ее привлекательные характеристики стимулируют интерес к рассмотрению этой структуры и при  $\beta \sim 0,5$  [6].

Практический интерес представляет ее возможное применение для замены первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН. Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) образован в 1970 году на основе решения правительства, принятого по инициативе отделения ядерной физики РАН. Он был организован для создания современной экспериментальной базы и развития исследований в области физики элементарных частиц, атомного ядра, физики космических лучей и нейтринной астрофизики. В составе института одной из основных установок является ускорительный комплекс на основе сильноточного линейного ускорителя (ЛУ) протонов и отрицательных ионов водорода, являющегося единственной установкой такого класса в Евразийском регионе. Основными направлениями и областями проводимых и перспективных исследований ускорительного комплекса являются: физика элементарных частиц; ядерная физика; нейтронная физика; физи-

ка пучков заряженных частиц и ускорительная техника; физика конденсированных сред и нано-структур, радиационное материаловедение, изучение перспективных материалов, радиационная стойкость материалов и приборов, развитие ядерных технологий, перспективные реакторы, управляемые подкритические системы (ADS) и лучевая терапия [7].

В настоящее время основными объектами в рамках ускорительного комплекса ИЯИ РАН являются: линейный ускоритель, экспериментальный комплекс, комплекс по производству медицинских радиоизотопов, комплекс инженерных и вспомогательных сооружений. Основу комплекса составляет сильноточный линейный ускоритель протонов и ионов H<sup>-</sup> со следующими основными проектными параметрами: энергия – 600 МэВ, средний ток – 500 мкА, импульсный ток – 50 мА, длительность импульса пучка – 200 мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц. Ускоритель включает инжекторный комплекс, начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ и основную часть до энергии 600 МэВ. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией 160 МэВ на комплекс производства радиоизотопов. В основной части ускорителя используется разработанная в РТИ АН СССР структура с шайбами и диафрагмами (УСЩД) [8]. Сооружение ускоряющих структур, точная обработка модулей, настройка и пайка секций, и настройка резонаторов основной части происходили непосредственно в ИЯИ. На первом резонаторе основной части ЛУ отрабатывалась технология изготовления и настройки, в ходе долговременной эксплуатации наблюдается деградация его параметров. При использовании длительности ВЧ импульса более 170 мкс происходят многократно повторяющиеся пробои, что ограничивает его применимость для работы под нагрузкой пучком высокой длительности и частоты следования импульсов [9].

Исходя из высокой стоимости изготовления единичного резонатора на основе используемой в настоящее время структуры УСЩД

в промышленности, с учетом воспроизведения технологии для мелкосерийного производства, представляется целесообразной полная замена резонатора с использованием ускоряющей структуры, не уступающей существующей по электродинамическим характеристикам и обладающей другими технологическими характеристиками, позволяющими снизить затраты на изготовление секций, упростить их настройку и сборку.

При этом целесообразно сохранить существующую компоновку резонатора и схему ВЧ питания без внесения существенных изменений. В этой связи необходимо рассмотрение структур, которые могут быть применены в первом резонаторе основной части – как апробированных в мировой практике, так и структуры CDS, ранее не применявшейся в ускорителях ионов водорода.

### **Цели и задачи исследования**

1. Сравнительный анализ электродинамических характеристик структур, применимых в основной части интенсивного ЛУ. Анализ по эффективности вариантов схем охлаждения рассматриваемых структур. Выбор ускоряющей структуры для дальнейшей проработки.

2. Оптимизация ускоряющей структуры по ВЧ эффективности при унификации размеров ячеек в секциях резонатора без существенного понижения электрической прочности структуры. Обоснование допусков на размеры изготавливаемых ячеек.

3. Исследование возможности возникновения вторично-электронного резонансного разряда (ВЭРР) в ячейках связи предложенной структуры на рабочем уровне ускоряющего поля в резонаторе. Сравнительный анализ методов подавления ВЭРР. Выбор метода подавления ВЭРР в ячейках связи структуры для резонаторов основной части интенсивного ЛУ

4. Разработка методики настройки ячеек секций и контроля качества их изготовления.

Адаптация методики настройки резонатора как связанной системы из секций CDS и мостовых устройств.

### **Методология и методы исследования**

Основным методом, используемым в данной работе, является численное моделирование. Для численного моделирования электродинамических характеристик ускоряющих структур, а также процесса возникновения ВЭРР использовалось программное обеспечение CST Studio [10]. Для моделирования связанных ВЧ тепловых процессов и влияния отклонения геометрических параметров на частотные характеристики структур использовался программный пакет ANSYS [11].

Проверка результатов численного моделирования проводилась с помощью их сравнения с известными аналитическими приближениями, оценками. В случае моделирования ВЭРР результаты дополнительно сравнивались с экспериментальными данными.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснована применимость структуры CDS для построения резонаторов основных частей интенсивных ЛУ ионов водорода при энергии частиц свыше 100 МэВ.
2. Впервые предложена и реализована в виде набора макрокоманд для пакета ANSYS методика оценки влияния отклонений геометрических размеров ячеек на отклонения частот ускоряющей моды, моды связи и коэффициента связи ячеек. Преимуществом данной методики является необходимость проведения только трех численных расчетов собственных частот структуры. В сочетании с известными аналитическими зависимостями данная методика существенно упрощает выбор оптимальных допусков для изготовления ячеек ускоряющей структуры.
3. Разработана и программно реализована на основе многомо-

догового приближения модель резонатора как системы неоднородных элементов, связанных щелями связи. Результаты расчетов с помощью данной модели совпадают с высокой точностью с результатами прямого численного моделирования. Методика позволяет исследовать в рамках единого расчета четырехсекционный резонатор с мостовыми устройствами с использованием минимальных вычислительных ресурсов, что позволяет более точно учитывать при оптимизации параметров резонатора конструкционные особенности его отдельных элементов.

### **Научная и практическая значимость**

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что разработанный эскизный проект четырехсекционного резонатора на основе структуры CDS обладает электродинамическими характеристиками, не уступающими существующему первому резонатору основной части ЛУ ИЯИ РАН на основе структуры УСШД. Благодаря меньшим поперечным размерам затраты на его производство будут меньшими по сравнению с существующими аналогами. Оптимизированы методики настройки и контроля качества изготовления ячеек секций, существенно упрощающие настройку секций резонатора. Новый резонатор на основе структуры CDS может быть установлен без внесения изменений в остальные системы ЛУ ИЯИ РАН.

### **Достоверность**

Достоверность результатов численного моделирования, представленных в диссертации, подтверждается использованием апробированного в мировой практике программного обеспечения (CST Studio, ANSYS), сравнением результатов расчётов с аналитическими оценками и экспериментальными данными.

## **Личный вклад автора**

Автором лично проведено численное моделирование как электродинамических, так и связанных тепломеханических характеристик рассматриваемых ускоряющих структур. На всех этапах работы автором проводилась обработка полученных результатов и их подготовка к публикации.

При непосредственном и решающем участии автора проведена экспериментальная проверка результатов численного моделирования ВЭРР в действующем резонаторе CDS ускорителя DESY PITZ, по результатам которой была откалибрована методика численного моделирования ВЭРР и предложены методы его подавления в структуре CDS.

На основе оптимизированных автором методик обоснованы выбор оптимальных допусков изготовления структуры CDS и настройка узла связи секций резонатора с мостовыми устройствами.

На всех этапах работы автор участвовал в обсуждении результатов исследований, приведении их в соответствие с существующими физическими моделями. Автор принимал участие в подготовке всех публикаций по материалам диссертации, некоторые из них подготовлены им самостоятельно.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты численного моделирования ускоряющих структур, применимых в основной части интенсивного ЛУ. Обоснование выбора структуры CDS как оптимальной по комплексу характеристик и затратам на изготовление.

2. Результаты оптимизации параметров структуры CDS, результаты унификации размеров ячеек секций резонатора. Выбор допусков изготовления структуры CDS. Результаты анализа возможности развития ВЭРР и выбор метода его подавления.

3. Обоснование методики настройки ячеек секций до пайки и контроля качества их изготовления.

4. Реализация методики на основе многомодового приближения для моделирования характеристик четырехсекционного резонатора с мостовыми устройствами.

5. Результаты численного моделирования настройки и оптимизации узла соединения секции и мостового устройства при ограничении потерь мощности ВЧ мощности.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты работы представлены на российских и международных конференциях и опубликованы в сборниках трудов:

1. Международная конференция ЛаПЛАЗ 2017, 2018, 2020 гг., НИЯУ МИФИ, Москва.

2. Российская конференция Russian Particle Accelerator Conference 2016, Санкт-Петербург.

3. Российская конференция Russian Particle Accelerator Conference 2018, Протвино.

4. 12-й Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященный памяти В.П. Саранцева, Алушта, Крым.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из которых 2 статьи – в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ [26, 27], 2 статьи опубликованы в периодических изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus [21, 25].

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Ее объем составляет 83 страницы, включая 43 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 56 наименований.

**Первая глава** «Ускоряющие структуры для резонаторов интенсивных линейных ускорителей ионов водорода» посвящена сравне-

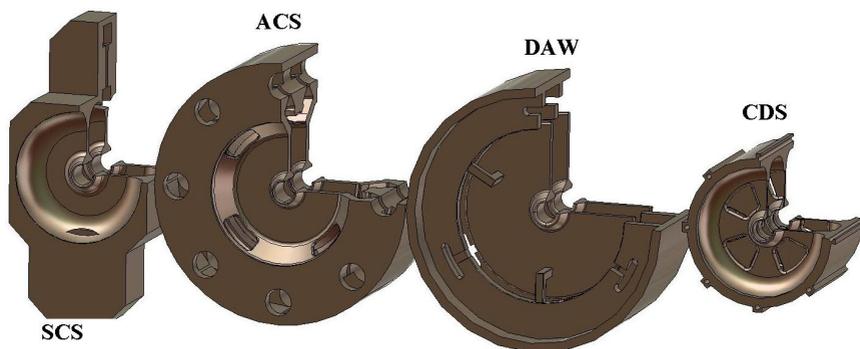


Рисунок 1. Эскиз рассматриваемых структур на одной рабочей частоте

нию характеристик ускоряющих структур, применимых в первом резонаторе основной части ЛУ ИЯИ РАН. Рассматриваются как апробированные в мировой практике структуры – Annular Coupled Structure (ACS) [12], Side Coupled Structure (SCS) [13], структура с шайбами и диафрагмами (УСШД, DAW), так и новая разработка – структура CDS. Структуры, настроенные на одну рабочую частоту 991 МГц, соответствующую первому резонатору основной части ЛУ ИЯИ РАН, показаны схематично на рис. 1.

Исследуются электродинамические, связанные тепломеханические и технологические характеристики структур. Сравнение основных электродинамических структур и их поперечных размеров приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик предложенных структур

Параметр	УСШД	ACS	SCS	CDS
Длина, мм	65,24			
Ширина, мм	425,67	405,35	211,79	<b>211,54</b>
Высота, мм	425,67	405,35	465,74	<b>211,54</b>
Коэффициент связи $k_c$	0,56	0,054	0,042	0,164
Добротность $Q$	23407	15834	16998	14738
Эффективное шунтовое сопротивление $R_{ш.эфф.}$ , МОм/м	<b>30,76</b>	<b>28,66</b>	<b>30,04</b>	<b>31,16</b>

Структуры обладают схожей эффективностью использования ВЧ мощности, определяемой величиной эффективного шунтового сопротивления. При этом структура CDS обладает вдвое меньшими поперечными размерами. По величине коэффициента связи подавляющее преимущество имеет структура УСШД, для которой он составляет более 0,5. Но в окрестности рабочего колебания УСШД присутствуют паразитные колебания с вариациями поля по азимуту с учетом расщепления от штанг. Подавление влияния этих колебаний требует введения в структуру дополнительных элементов, таких как щели, усложняющих изготовление и настройку резонатора. При этом структура CDS обладает коэффициентом связи, достигающим 0,16, втрое превышающим таковой у структур ACS и SCS, что является промежуточным значением.

Для сравнения выбранных структур с точки зрения эффективности схем охлаждения, в их модели были добавлены тестовые варианты каналов охлаждения в соответствии с геометрией конкретной структуры. В таблице 2 приведены результаты моделирования связанных тепломеханических процессов в предложенных структурах под действием тепловых нагрузок, соответствующих рабочему режиму первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН.

Таблица 2. Результаты моделирования тепломеханических процессов

Параметр/структура	УСШД	ACS	SCS	CDS
Макс. разность температур, С	14,98	37,21	8,53	3,10
Смещение частоты ускоряющей моды, кГц	-86,19	-61,36	-101,74	-46,80
Смещение частоты моды связи, кГц	219,71	123,90	101,74	165,10
Полоса запираения $f$ , кГц	305,90	185,26	203,48	211,90

Структура CDS не уступает аналогам по величине смещения частот рабочей моды и моды связи под действием ВЧ тепловых нагрузок. Используемые при расчетах варианты схемы охлаждения обеспечивают величины смещения частот, при которых поло-

са запираания не превышает разумной величины 400 кГц [5]. При этом в структуре CDS может быть использована схема охлаждения с только внутренними каналами, что упрощает ее изготовление и позволяет исключить из конструкции резонатора паяные соединения «вода-вакуум».

По совокупности сравнения электродинамических характеристик, поперечных размеров и эффективности схемы охлаждения структура CDS является оптимальным вариантом для дальнейшей разработки первого резонатора основной части интенсивного ЛУ ионов водорода.

Во **второй главе** «Оптимизация параметров структуры CDS для начала основной части интенсивного ЛУ ионов водорода» представлены результаты оптимизации параметров структуры CDS для первого резонатора основной части ЛУ.

Для упрощения и удешевления изготовления резонатора была произведена унификация некоторых настроечных размеров структуры для всех четырех секций. При этом резонатор CDS не уступает существующему в ЛУ ИЯИ РАН резонатору УСЩД по характеристике полного шунтового сопротивления. На основе проведенной унификации размеров ячеек секций построен проектный технический рисунок структуры CDS для первой секции резонатора с учетом толщины стенок, необходимой для размещения внутренних каналов охлаждения, представленный на рис. 2.

Для определения величины допусков изготовления секций резонатора использовалась методика [15], использующая пакет численного моделирования ANSYS. С помощью внутренних средств пакета рассчитываются частоты, распределение поля для ускоряющей моды и моды связи рабочего вида колебания  $\pi$ . Поверхность структуры разбивается на нумерованные в соответствии с внутренним алгоритмом ANSYS поверхности, соответствующие геометрическим параметрам. С помощью макрокоманд ANSYS при необходимости

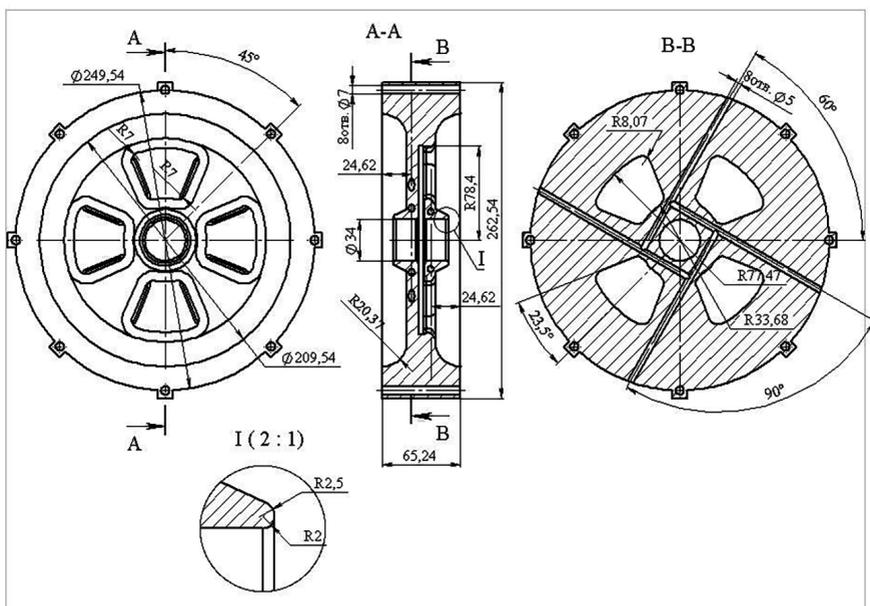


Рисунок 2. Технический рисунок структуры CDS для первой секции резонатора основной части

сравниваются распределения полей исследуемых видов колебаний и рассчитываются величины смещений частот и коэффициентов связи для каждой из поверхностей [17]. При расчете задавалось условное смещение поверхностей в 1 мм. В дополнение к этому несколько макрокоманд могут быть использованы для визуализации возмущений, вносимых в поле. На рис. 3 показаны распределения плотности для чувствительности ускоряющей моды, моды связи и коэффициента связи структуры CDS к смещению поверхностей. Из таких распределений наглядно видно те части поверхности структуры, которые оказывают наибольшее влияние на перечисленные выше параметры.

На величину смещения частоты ускоряющей моды наибольшее влияние оказывают параметры, связанные с радиусом ускоряющей ячейки, радиусами скругления трубки дрейфа и окон связи. На

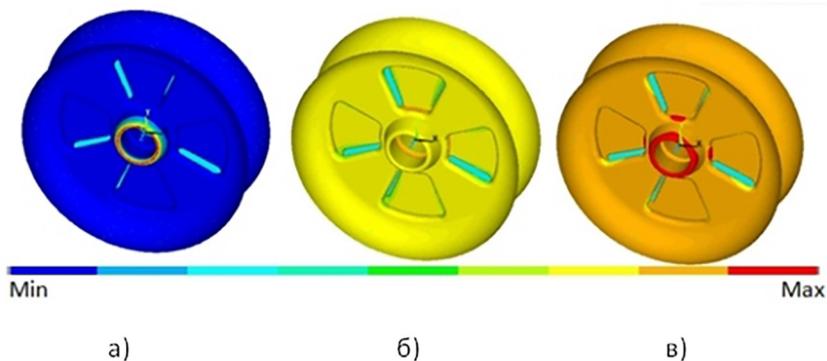


Рисунок 3. Распределение плотности чувствительности ускоряющей моды (а), моды связи (б) и коэффициента связи (в) к смещению поверхностей структуры CDS.

смещение моды связи – радиус ячейки связи, длина ячейки связи, радиусы скругления окна связи. На смещение коэффициента связи наибольшее влияние оказывают длина ячейки связи, параметры трубки дрейфа и окон связи. Оптимальный допуск изготовления определялся с помощью величины отношения полосы заперения к рабочей частоте и составил 50 мкм. Такой допуск легко реализуем на современном оборудовании с цифровым управлением.

Для обеспечения стабильности работы резонатора исследована возможность развития вторично-электронного резонансного разряда (ВЭРР) и методов его подавления вблизи рабочего уровня ускоряющего поля в структуре CDS. Использовались аналитическая оценка [7] и численное моделирование ВЭРР.

Впервые структура CDS была использована на ускорителе электронов DESY PITZ, расположенном в Цойтене, Германия. Результаты аналитической оценки, численного расчета и экспериментального исследования ВЭРР в структуре CDS PITZ использованы в качестве опорных для дальнейшего моделирования в CDS.

Результаты расчетов показали возможность развития ВЭРР в структуре CDS для ЛУ ИЯИ РАН на рабочем уровне ускоряюще-

го поля  $E_0 T = 2 - 2,5$  МВ/м при использовании меди бескислородной для изготовления ячеек секций [23].

Для подавления разряда на рабочем уровне может быть использована апробированная методика подавления ВЭРР в структуре с помощью введения знакопеременной расстройки соседних ускоряющих ячеек для создания напряжения электрического поля в ячейке связи, превышающего верхний порог возникновения ВЭРР. Определенная численным моделированием величина расстройки составила  $\Delta f_a = \pm 1,2$  МГц. В результате численного моделирования распределения поля в тестовой модели, состоящей из 18 периодов CDS со знакопеременной расстройкой частот соседних ускоряющих ячеек на  $\pm 1,2$  МГц относительное изменение амплитуды ускоряющего поля между соседними ускоряющими ячейками составляет  $E_z^{n+1}/E_z^n \gg 1\%$ . Величина эффективного шунтового сопротивления структуры с введением знакопеременной расстройки снижается в пределах  $< 0,5\%$ , что является допустимым с учетом расчетного запаса по величине полного шунтового сопротивления резонатора.

Для сохранения унифицированности геометрических параметров структуры в секциях и упрощения настройки резонатора до пайки также рассмотрена методика подавления ВЭРР, позволяющая нарушить условие резонансного движения электронов путем изменения геометрии плоского зазора ячейки связи. Эта методика теряет свою эффективность при повышенном коэффициенте вторичной эмиссии. Для существенного снижения коэффициента вторичной эмиссии возможно нанесение покрытия из золота на внутреннюю поверхность ячеек связи CDS. Однако это приведет к существенному удорожанию изготовления секций резонатора [26].

Описана методика настройки ячеек секций CDS до пайки и контроля качества их изготовления. Для настройки частоты ускоряющей моды в структуру вводится дополнительное кольцо трапецеидального сечения. Настройка частоты моды связи в ячейках возможна только с помощью увеличения радиуса ячейки связи.

В связи с нелинейностью зависимости коэффициента влияния длины настроечного кольца на частоту ускоряющей моды, настройка ячеек на рабочее значение частот должно проводиться за несколько этапов. На каждом этапе проводится определение частот секции и ячеек для уточнения текущего значения коэффициента влияния настроечного кольца и его возможной аппроксимации. В полной сборке секции измеряется средняя частота ускоряющей моды. Средняя величина полосы запираения определяется с помощью дополнительно измеренных частот колебаний, ближайших к рабочему на дисперсионной характеристике. Средняя частота моды связи по секции определяется косвенно как сумма средней частоты ускоряющей моды и полосы запираения. Для контроля полученных величин частот ускоряющей моды и моды связи отдельных полу ячеек необходимо провести серию измерений собственных частот в минимальных сборках структуры, состоящих из двух полу ячеек, закороченных проводящими пластинами. Схема такой сборки структуры CDS показана на рис. 4.

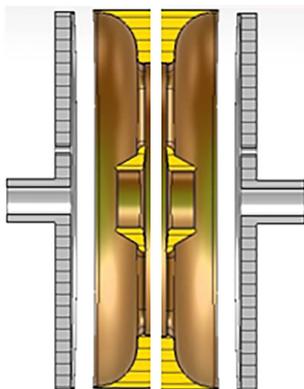


Рисунок 4. Минимальная сборка структуры CDS

В минимальной сборке возможно измерение частот трех колебаний – рабочей  $\pi$ -моды и двух  $0$ -мод, частота моды связи определяется с помощью расчета величины ее отклонения от средней

величины по полной сборке секции. Для измерения частоты ускоряющей моды в полу ячейках проводится серия измерений в трех минимальных сборках, что позволяет в дальнейшем настраивать знакопеременное смещение частоты рабочей моды для подавления ВЭРР. Точность методики подтверждается результатами численного моделирования минимальной сборки с дополнительным возмущением поля [25].

**Третья глава** «Объединение секций CDS в резонатор» посвящена вопросу соединения четырех секций разрабатываемого резонатора с тремя мостовыми устройствами и снижения потерь ВЧ мощности в мостовых устройствах.

Общая длина первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН составляет более 13,5 метров, как показано на рис. 5.

Численное моделирование полного резонатора современными программными средствами при задействовании разумных вычислительных ресурсов не обеспечит необходимой точности расчета. При этом индивидуальная настройка секций и мостовых устройств

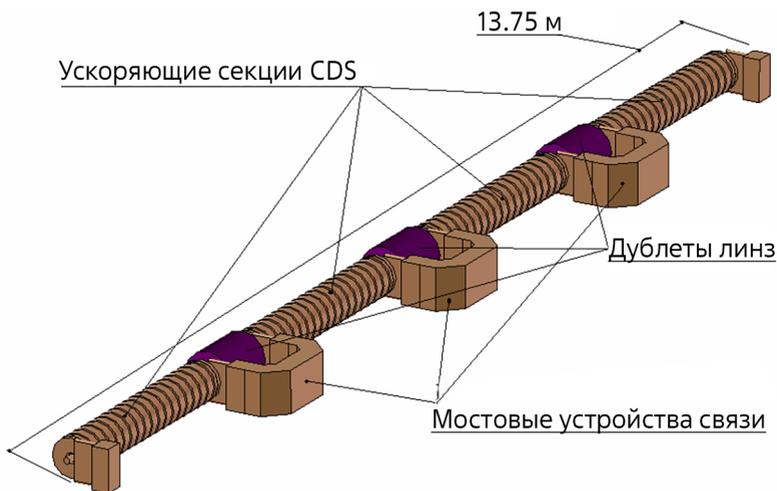


Рисунок 5. Резонатор на основе секций CDS

в рамках единой системы потребует проведения множественных итераций моделирования, занимающих длительное время.

Для моделирования резонатора как единой системы из секций и мостовых устройств предложена методика на основе многомодового приближения, оперирующая интегральными характеристиками элементов системы – собственными частотами и величинами напряженности магнитного поля секций и мостовых устройств на щели связи [19]. Особенностью методики является возможность использования полученных прямым численным моделированием характеристик элементов неоднородной связанной системы, что позволяет более точно учитывать детали их конструкции. Распределение поля в секции, мостовом устройстве и щели связи представляется как сумма полей собственных мод с соответствующими частотами:

$$\bar{H}^c = \sum_n h_n^c \bar{H}_n^c, \quad \mu_0 \int_{V_c} \bar{H}_n^c \bar{H}_n^{c*} dV = 2W_0 \quad (1)$$

$$\bar{H}^b = \sum_k h_k^b \bar{H}_k^b, \quad \mu_0 \int_{V_b} \bar{H}_k^b \bar{H}_k^{b*} dV = 2W_0 \quad (2)$$

$$\bar{E}^s = \sum_m e_m^s \bar{E}_m^s, \quad \varepsilon_0 \int_{V_s} \bar{E}_m^s \bar{E}_m^{s*} dV = 2W_0 \quad , \quad (3)$$

где  $h_n^c$ ,  $h_k^b$ ,  $e_m^s$  – амплитудные коэффициенты,  $V_c$ ,  $b$ ,  $s$  – объем элемента,  $W_0$  – энергия, запасенная в колебаниях. Связь секции с рабочей модой вида  $E_{01}$  и волновода на моде  $TE_{10}$  осуществляется по магнитному полю, при этом колебание щели  $TE_{210}$  имеет ноль магнитного поля по центру и дает нулевой коэффициент связи. Следующая за ней мода  $TE_{310}$  имеет частоту много выше полосы пропускания секции, поэтому в щели рассматривается только первая мода  $TE$ . Для результирующих колебаний неоднородной связанной системы может быть составлена система уравнений, учитывающая

взаимное возбуждение как между модами разных элементов (секций и мостов), так и в рамках каждого элемента:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_n^c \frac{(\omega^2 + \gamma_{(c,c)}^{(n,n)} \omega^2 - \omega_n^{c^2})}{\omega^2} + \sum_{i \neq n} \gamma_{(b,c)}^{(n,i)} h_i^b + \sum_{i \neq n} \gamma_{(c,c)}^{(n,i)} h_i^c + = 0 \\ h_m^b \frac{(\omega^2 + \gamma_{(b,b)}^{(m,m)} \omega^2 - \omega_m^{b^2})}{\omega^2} + \sum_{i \neq m} \gamma_{(b,c)}^{(m,k)} h_i^c + \sum_{i \neq m} \gamma_{(b,b)}^{(m,k)} h_i^b + = 0 \end{array} \right. , \quad (4)$$

где  $\gamma_{b,c}$  – коэффициенты связи между модами в секции и мостовом устройстве,  $\gamma_{c,c}$  – коэффициенты связи между модами в секции,  $\gamma_{b,b}$  – коэффициенты связи между модами в мостовом устройстве. Такая система уравнений является задачей на собственные значения вида  $A^*x=l^*B^*x$ , где  $A, B$  – квадратные матрицы,  $x$  – амплитудные коэффициенты. Решение данной задачи находится численно с помощью стандартных проверенных методик. Для решения системы (4) в случае модели, состоящей из секции CDS и отрезка волновода, методика была программно реализована на языке Fortran с использованием матричной процедуры NAG F02BJF [18].

Для проверки точности методики на основе многомодового приближения рассмотрена система, состоящая из трех периодов CDS с упрощенной геометрией ячеек, соединенной прямоугольной щелью с отрезком волновода прямоугольного сечения, как это показано на рис. 6.

В рамках моделирования длина патрубка  $l_2$  варьировалась в пределах 150÷550 мм имитируя различные положения настроечного плунжера мостового устройства [19]. На рис. 7 приведены зависимости частот результирующих мод системы от длины патрубка.

Результаты численного моделирования и моделирования на основе многомодового приближения на всем рассмотренном промежутке длины патрубка  $l_2$  совпадают с максимальным отклонением по частоте 1 МГц, что вполне достаточно для анализа общих закономерностей поведения частотных характеристик связанной

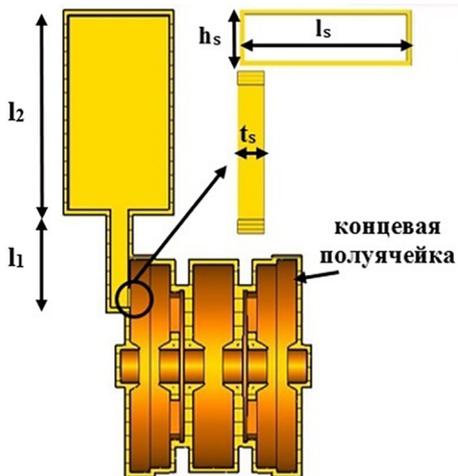


Рисунок 6. Калибровочная модель из трех периодов CDS и отрезка волновода

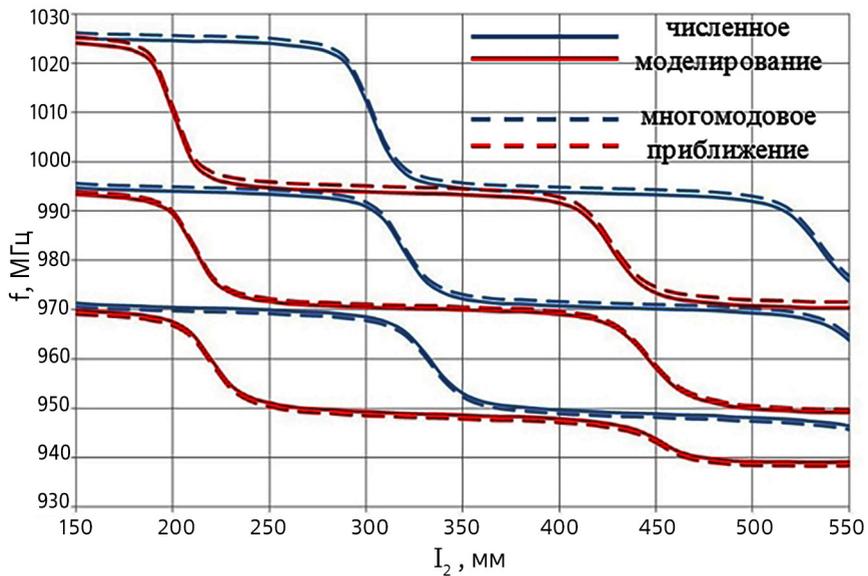


Рисунок 7. Сравнение результатов численного моделирования и моделирования на основе многомодового приближения.

системы. Таким образом методика на основе многомодового приближения обеспечивает высокую точность определения параметров резонатора как неоднородной связанной системы и может быть использована для моделирования настройки параметров узлов соединения секций с мостовыми устройствами [27].

Для снижения потерь мощности в мостовом устройстве, приводящих к уменьшению шунтового сопротивления в существующем первом резонаторе основной части ЛУ ИЯИ РАН на основе секций УСШД установлено отношение потерь мощности в мостовом устройстве к потерям мощности в секции не превышающее 8% [8]. При использовании в переходной части мостового устройства отрезка волновода прямоугольного сечения, в новом резонаторе CDS это отношение составляет не менее 9%. Для уменьшения потерь мощности в мостовых устройствах предложено использовать в переходной части мостового устройства модифицированный отрезок волновода, разделенный на четыре равные по длине части с постепенным уменьшением его толщины  $t_M=20$  мм в два раза, как показано на рис. 8.

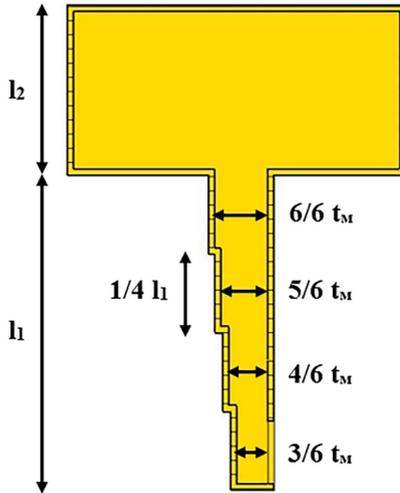


Рисунок 8. Модифицированная переходная часть мостового устройства

При использовании модифицированного переходного участка мостового устройства удается достичь меньшего значения отношения мощностей потерь, которое при длине  $l_1=170$  мм и длине щели  $l_s=70$  мм составляет 5,7%.

Полученные результаты показывают, что при использовании модели на основе многомодового приближения можно осуществить анализ и моделирование неоднородной связанной системы из четырех неравнозначных секций CDS, связанных тремя мостовыми устройствами с вводом мощности в центральный мост.

**В Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

проведенное исследование показало применимость бипериодической структуры CDS для резонаторов интенсивных линейных ускорителей ионов водорода, в частности первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН.

Структура CDS обладает электродинамическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям первого резонатора, в сравнении с другими структурами, апробированными на действующих ускорителях ионов водорода, она обладает вдвое меньшими поперечными размерами, что существенно удешевляет изготовление резонатора. Использование схемы охлаждения с только внутренними каналами позволяет обеспечить приемлемые значения максимальной температуры внутренней поверхности и ширины полосы запирающего. В конструкции секций резонатора отсутствуют паяные соединения «вода-вакуум».

По результатам оптимизации электродинамических характеристик найдено сочетание геометрических характеристик CDS, при которых обеспечивается как достаточная величина полного шунтового сопротивления резонатора, так и допустимая максимальная напряженность электрического поля на поверхности, не превышающая предел Килпатрика. С учетом малого изменения скорости

частиц в секциях поперечные размеры ячеек секций унифицированы для снижения затрат на изготовление резонатора.

С помощью предложенной и программно реализованной методики оценки влияния изменения геометрических размеров на частотные характеристики структуры обоснованы допуски изготовления нового резонатора CDS, легко реализуемые на современном металлообрабатывающем оборудовании с цифровым управлением. Данная методика применима как для би-периодических, так и для моно периодических ускоряющих структур, ее преимуществом является необходимость проведения только трех численных расчетов собственных частот структуры.

На действующем резонаторе CDS PITZ в DESY (Цойтен, Германия) проведены калибровочные измерения для методики численного моделирования вторично-электронного резонансного разряда, показавшие достаточную точность ее результатов. С ее помощью показана возможность возникновения ВЭРР на рабочем уровне ускоряющего поля в структуре CDS для ИЯИ РАН. Для подавления ВЭРР предложены как апробированная в мировой практике методика, предполагающая введение знакопеременного смещения частот соседних ускоряющих ячеек секций для увеличения напряжения в плоском зазоре ячейки связи сверх порога возникновения ВЭРР, так и методика, направленная на нарушение условия резонансного движения электронов в зазоре.

Для настройки секций в целом, а также частот полу ячеек и знакопеременного смещения частот ускоряющих ячеек для подавления ВЭРР описана методика настройки секций CDS до пайки и контроля их частотных характеристик.

На основе ранее предложенного многомодового приближения реализована методика для расчета параметров нового резонатора CDS как системы из секций, соединенных мостовыми устройствами. Особенностью данной методики является возможность использовать параметры отдельных компонентов резонатора, полученных

численным моделированием. Это позволяет с большей точностью учитывать конструкционные особенности отдельных элементов резонатора без задействования значительных вычислительных ресурсов. Точность предложенной методики подтверждается сравнением ее результатов с результатами прямого численного моделирования упрощенной тестовой системы. Для снижения потерь мощности в мостовом устройстве предложена модифицированная конструкция узла соединения секций с мостовыми устройствами.

### Список литературы

1. *L.V. Kravchuk*, INR proton Linac operation and applications // Nucl. Instr. and Meth. A 562, 2006, pp. 932–934.
2. *V.V. Paramonov, V.N. Leontev, A.P. Durkin, A.A. Kolomiets*, Single frequency high intensity high energy normal conducting hadron linac // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Russia, pp. 330–332.
3. *T. Khabiboulline, M. Champion, C.M. Ginsburg, V. Yakovlev*, Overview of project X superconducting RF cavities and cryomodules // Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 2315–2317.
4. *V.V. Paramonov*, The Cut Disk Accelerating structure for High Energy Linacs // Proceedings of the 1997 PAC, v.3, p.2959.
5. *V. Paramonov, A. Naboka, A. Donat et al.*, The PITZ CDS booster cavity RF tuning and start of conditioning // Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, pp.241–243.
6. *V.V. Paramonov*, The CDS parameters for proton linac with moderate heat loading // Proceedings of RuPAC-2010, Protvino, Russia, pp. 65–67.
7. *С.К. Есин, В.М. Лобашев*, Перспективы исследований на пучках сильноточных ускорителей // Труды радиотехнического института АН СССР, 1973, №16, сс. 46–56.
8. *В.Г. Андреев, В.М. Пироженко*, Параметры ускоряющей структуры для протонного линейного ускорителя на большие энергии, // Труды Радиотехн. Ин-та АН СССР. 1971, №9, сс. 36 – 43.
9. *A. Feschenko, M. Grachev, L.V. Kravchuk, V.L. Serov*, Multipurpose research complex based on the high intensity proton linac // Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, pp. 90–94.

10. CST studio // <http://www.cst.com>
11. ANSYS code // <http://www.ansys.com>
12. В.Г. Кульман, Э.А. Мирончик, В.М. Пироженко. Ускоряющая структура с кольцевыми резонаторами связи // Приборы и техника эксперимента. 1970, №4, сс. 56 – 61.
13. Нэнн Е.А., Нэнн Б.С., Помтер Д.М. Ускоряющие структуры со стоячей волной для линейных ускорителей на большие энергии // Приборы для науч. исслед. 1968, т. 39, №7. сс. 31–43.
14. Б.П. Мурин, В.Г. Кульман, Л.Г. Ломидзе, Б.И. Поляков, А.П. Федотов. Линейные ускорители ионов // Т. 2 Основные системы, Атомиздат, Москва, СССР: 1978, сс. 78–95.
15. V.V. Paramonov, A.K. Skassyrskaya, The technique for the numerical tolerances estimations in the construction of compensated accelerating structures // Proceedings of LINAC 2004, Lubeck, Germany, pp. 812-814.
16. И.Н. Сливков, Изоляция и разряд в вакууме // Атомиздат, Москва, СССР: 1972, сс. 155-163.
17. V.G. Andreev, V.V. Paramonov. The distortion of the accelerating field distribution in compensated structures due to steady-state beam loading // Proceedings of PAC95, Dallas, Texas, USA, pp. 1702-1704.
18. NAG Fortran code library // <http://www.nag.co.uk>
19. V.V. Paramonov. The multi-mode analysis of the slot-coupled accelerating structures // Proceedings 2002 Linac Conference, p.413.
20. С.К. Есин, Л.В. Кравчук, В.В. Парамонов и др. Результаты радиотехнической настройки ускоряющих секций ЛУ МФ // Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, Р-9-6-20, 1986, с. 23.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

21. I.V. Rybakov, Y.Z. Kalinin, V.N. Leontev et al., Comparison of accelerating structures for the first cavity of the main part of the INR linac // J. Phys.: Conf. Ser., vol. 747, 2016, p. 012073.
22. I.V. Rybakov, A.V. Feschenko, Y.Z. Kalinin et al., Proposal of the accelerating structure for the first cavity of the main part of INR linac // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 216–218.

23. *I.V. Rybakov, I.I. Isaev*. Estimation of multipacting in CDS structure // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 288–290.
24. *I.V. Rybakov, V.V. Paramonov, A.K. Skassyrskaya*. Manufacturing tolerances estimation for proton linac cavities // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 291–293.
25. *I.V. Rybakov, V.V. Paramonov*. The method of accelerating structure tuning and manufacturing quality control // J. Phys: Conf. Ser., vol. 941, 2017, p. 012094.
26. *Рыбаков И.В., Парамонов В.В.* Сравнение способов подавления мультипакторного разряда в ячейках связи ускоряющей структуры CDS // Ядерная физика и инжиниринг, 2018, Т. 9, № 2, сс. 200–203.
27. *В.В. Парамонов, Л.В. Кравчук, И.В. Рыбаков* Ввод ВЧ-мощности в устройство связи ускоряющего резонатора // Письма в ЭЧАЯ, 2018, Т. 15, № 7, сс. 908–913.

Научное издание

**Рыбаков Иван Викторович**

Физическое обоснование нормально проводящего ускоряющего резонатора  
для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22464 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а