

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Парамонов В.В.

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Ускоряющие структуры для резонаторов интенсивных линейных ускорителей ионов водорода.....	13
1.1. Построение резонаторов основной части сильноточных линейных ускорителей ионов водорода.....	13
1.2. Сравнение электродинамических характеристик бипериодических структур, применимых в начале основной части интенсивного ЛУ ионов водорода.	15
1.3. Исследование тепломеханических процессов в структурах УСШД, ACS, SCS и CDS под воздействием ВЧ нагрева. Оптимизация схемы охлаждения структуры CDS.....	23
Выводы к Главе 1.	27
Глава 2. Оптимизация параметров структуры CDS для начала основной части интенсивного ЛУ ионов водорода.....	28
2.1. Унификация размеров ячеек секций резонатора.	28
2.2. Определение допусков изготовления структуры CDS.....	35
2.2.1. Обоснование критерия выбора допусков изготовления ячеек CDS.....	35
2.2.2. Численное моделирование влияния отклонений геометрических параметров на отклонения частот и коэффициента связи в структуре CDS.	36
2.3. Вторично-электронный резонансный разряд в структуре CDS.	42
2.3.1. Аналитическая оценка возможности возникновения ВЭРР в зазоре ячейки связи структуры CDS.....	42
2.3.2. Калибровочные измерения развития ВЭРР в структуре CDS PITZ и численное моделирование ВЭРР в CDS.	47
2.3.3. Методы подавления ВЭРР в ячейках связи CDS.....	53
2.4. Методики настройки структуры CDS и контроля качества изготовления ячеек.....	57
2.4.1. Методика настройки ячеек секций.....	57
2.4.2. Методика измерений в полной сборке секции.	59
2.4.3. Методика измерений в минимальных сборках.....	61
Выводы к Главе 2.	64
Глава 3. Объединение секций CDS в резонатор.	65
3.1. Методика моделирования неоднородных систем, связанных щелями, на основе многомодового приближения.....	65

3.2. Проверка точности методики моделирования неоднородных систем, связанных щелями, на основе многомодового приближения.	68
3.3. Выбор параметров узла соединения секции CDS и мостового устройства.	70
3.3.1. Методика настройки частоты рабочей моды и разделения соседних колебаний.	70
3.3.2. Оптимизация узла соединения секции и мостового устройства для снижения потерь мощности в мостовом устройстве.	72
Выводы к Главе 3.	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	79

ВВЕДЕНИЕ

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 ~ 50 мА, вызванное соображениями радиационной безопасности [2]. В этой связи понятие интенсивного линейного ускорителя определяется длительностью импульсов в рабочем режиме, которая на действующих установках составляет до величин ~ 600 мкс [3]. Такая высокая длительность импульсов приводит к высоким потерям мощности в случае использования нормально проводящих структур, поэтому

в мировой практике для интенсивных линейных ускорителей рассматриваются и сверхпроводящие структуры [4]. 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) [5]. Эта структура изначально была предложена для ускорения частиц в области высоких энергий, $\beta \sim 1$, и успешно апробирована в ускорителе электронов DESY PITZ [6]. Для $\beta \sim 0,4-0,5$ в CDS было показано существенное снижение эффективного шунтового сопротивления [7]. Однако другие ее привлекательные характеристики стимулируют интерес к рассмотрению этой структуры и при $\beta \sim 0,5$ [8].

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 [9]. 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 [10]. Основными направлениями и областями проводимых и перспективных исследований ускорительного комплекса являются: физика элементарных частиц; ядерная физика; нейтронная физика; физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника; физика конденсированных сред и наноструктур, радиационное материаловедение, изучение перспективных материалов, радиационная стойкость материалов и приборов, развитие

ядерных технологий, перспективные реакторы, управляемые подкритические системы (ADS) и лучевая терапия [11].

В настоящее время основными объектами рамках ускорительного комплекса ИЯИ РАН являются: линейный ускоритель, экспериментальный комплекс, комплекс по производству медицинских радиоизотопов, комплекс инженерных и вспомогательных сооружений [12].

Основу комплекса составляет сильноточный линейный ускоритель протонов и ионов Н- 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 [13]. В основной части ускорителя используется разработанная в РТИ АН СССР структура с шайбами и диафрагмами (УСШД) [14]. 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 отработывалась 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 [12].

Исходя из высокой стоимости изготовления единичного резонатора на основе используемой в настоящее время структуры УСШД 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 структура CDS, ранее не применявшаяся для ускорителей 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 CDS на рабочем уровне ускоряющего поля в резонаторе. Сравнительный анализ методов подавления ВЭРР. Выбор метода подавления ВЭРР в ячейках связи CDS для резонаторов основной части интенсивного ЛУ

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

5. 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 [18]. Для моделирования связанных ВЧ тепловых процессов и влияния отклонения геометрических параметров на частотные характеристики структур использовался программный пакет ANSYS [15].

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 [15] 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 [16]. 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 многомодового 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 четырех секционный резонатор с мостовыми устройствами с использованием минимальных вычислительных ресурсов, что позволяет более точно учитывать при оптимизации параметров резонатора конструкционные особенности его отдельных элементов [17].

Научная и практическая значимость

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что разработанный эскизный проект четырех секционного 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 [18], ANSYS [15]), сравнением результатов расчётов с аналитическими оценками и экспериментальными данными.

Личный вклад автора

Автором проведено численное моделирование характеристик структур, применимых в основных частях ЛУ ионов водорода. Обоснован выбор структуры CDS для дальнейшей проработки. Проведена оптимизация параметров и унификация геометрических размеров ячеек секций первого резонатора.

Автор принял участие в экспериментальной проверке 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, подготовке и представлении публикаций по результатам работы.

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 [17, 47], 2 статьи опубликованы в периодических изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus [29, 49].

Структура и объем диссертации

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 сравнению характеристик ускоряющих структур, применимых в первом резонаторе основной части ЛУ ИЯИ РАН. Исследуются электродинамические, связанные тепломеханические и технологические характеристики структур. На основании представленных результатов обосновывается выбор структуры CDS как оптимальной для дальнейшей разработки резонаторов.

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. Приведены результаты унификации размеров ячеек секций, обоснованы выбор оптимальных допусков изготовления, методы подавления ВЭРР на рабочем уровне ускоряющего поля. Описана методика контроля частотных характеристик ячеек секций и качества их изготовления.

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. Изложена реализация методики на основе многомодового приближения, позволяющая численно рассчитывать электродинамические характеристики многосекционного резонатора в целом как неоднородной связанной системы без использования значительных вычислительных ресурсов. Приведены результаты оптимизации переходной части мостового устройства для снижения потерь мощности в мостовых устройствах.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Глава 1. Ускоряющие структуры для резонаторов интенсивных линейных ускорителей ионов водорода.

1.1. Построение резонаторов основной части сильноточных линейных ускорителей ионов водорода.

В настоящее время в мире существуют несколько ускорительных комплексов, в которых применяются сильноточные линейные ускорители протонов и ионов H^- . Они построены по схожему принципу с использованием структуры с трубками дрейфа в начальной части и бипериодической ускоряющей структуры в основной части тракта на энергию более 100 МэВ. При этом секции резонаторов основных частей связаны друг с другом с помощью мостовых устройств. Питание резонаторов осуществляется импульсными клистрономми.

В ускорителе LANSCE [19] (Лос-Аламос, США) в начальной части до энергии 100 МэВ используется структура с трубками дрейфа на частоте 201,25 МГц. В основной части ускорителя до энергии 800 МэВ используется бипериодическая структура с боковыми ячейками связи (Side Coupled Structure, SCS) на частоте 805 МГц [20]. Схема ускорительного комплекса и эскиз структуры SCS показана на рис. 1.1.

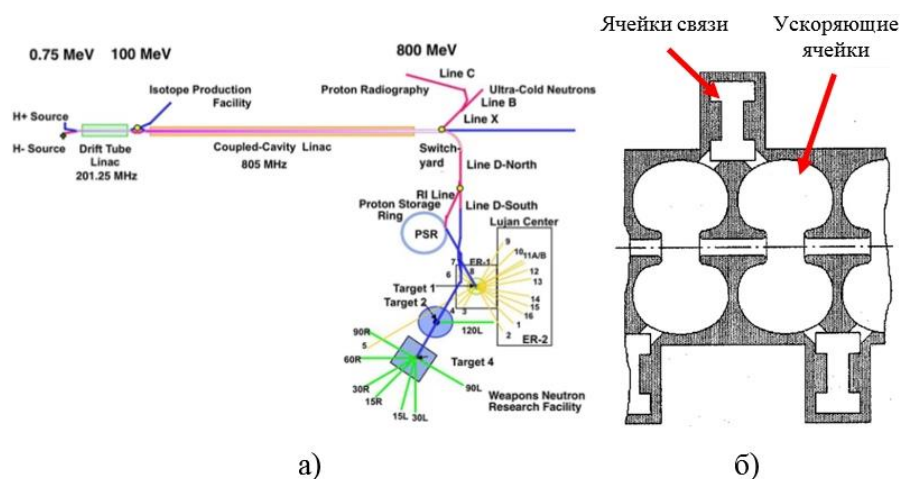


Рисунок 1.1. а) Схема ускорительного комплекса LANSCE, б) Структура SCS

Питание 44 резонаторов основной части ускорителя осуществляется клистрономми с импульсной мощностью 1,25 МВт.

В линейном ускорителе комплекса J-PARC (Япония) [3] ускорение ионов H^- до энергии 42 МэВ происходит в структуре с трубками дрейфа (DTL).

Ускорение от энергии 180 МэВ до энергии 480 МэВ происходит в резонаторах на основе структуры с кольцевыми ячейками связи (Annular Coupled Structure, ACS) [7, 21, 22]. Обзорное фото резонаторов основной части и схема структуры ACS ускорителя J-PARC показаны на рис. 1.2 [3].

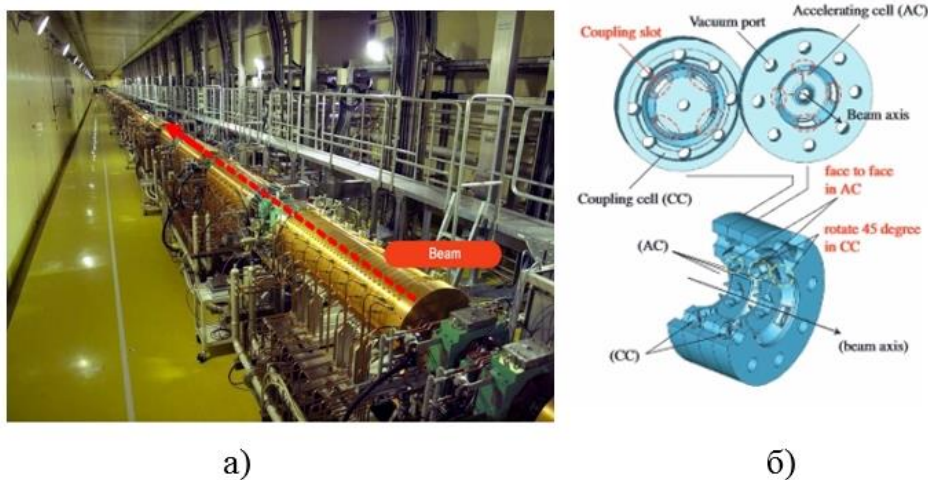


Рисунок 1.2. а) Ускоряющие резонаторы основной части на основе структуры ACS ускорителя J-PARC: а) Схема структуры ACS.

В ускорителе ИЯИ РАН [10] также используется система из начальной части ускорителя до энергии 100 МэВ на основе структуры с трубками дрейфа и основной части с резонаторами на основе бипериодической структуры с шайбами и диафрагмами (УСЩД, DAW) [23], показанной на рис. 1.3.



Рисунок 1.3. Основная часть ЛУ ИЯИ РАН, обзорное фото.

Структура резонатора в основной части ускорителя показана на примере первого резонатора основной части на рис. 1.4.

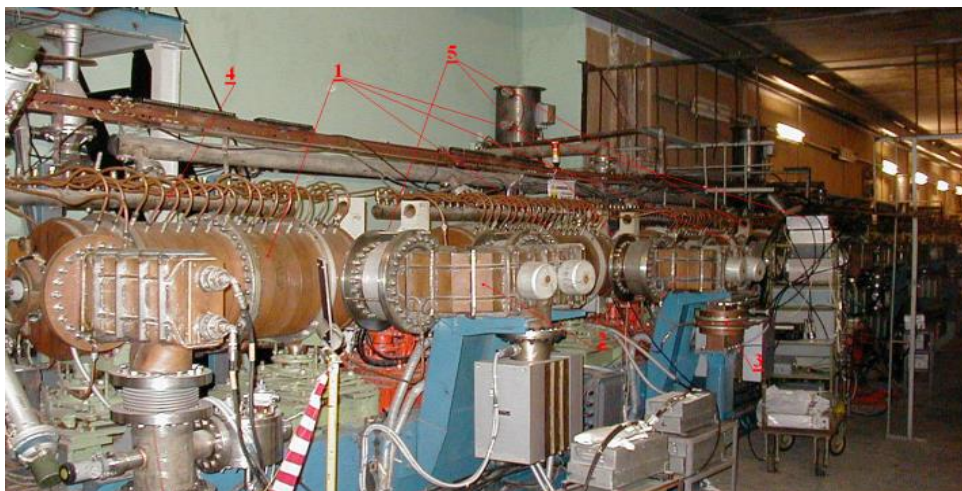


Рисунок 1.4. Первый резонатор основной части ЛУ ИЯИ РАН: 1 – ускоряющая секция, 2 – мостовые устройства, 3 – ВЧ-ввод, 4 – каналы охлаждения шайб.

Питание резонаторов осуществляется клистрономы КИУ-40 с выходной импульсной мощностью до 5 МВт через центральные мостовые устройства.

1.2. Сравнение электродинамических характеристик бипериодических структур, применимых в начале основной части интенсивного ЛУ ионов водорода.

В данном параграфе проведено сравнение характеристик ускоряющих структур, которые могут быть использованы в первом резонаторе основной части интенсивного ЛУ. Исследовались ускоряющие структуры, как апробированные в мировой практике: УСЩД (DAW), ACS, SCS, так и новая разработка – структура Cut Disk Structure (CDS) [5]. Поперечные размеры и устройства рассматриваемых структур на одной рабочей частоте можно оценить из приведенного на рис.1.5 эскиза.

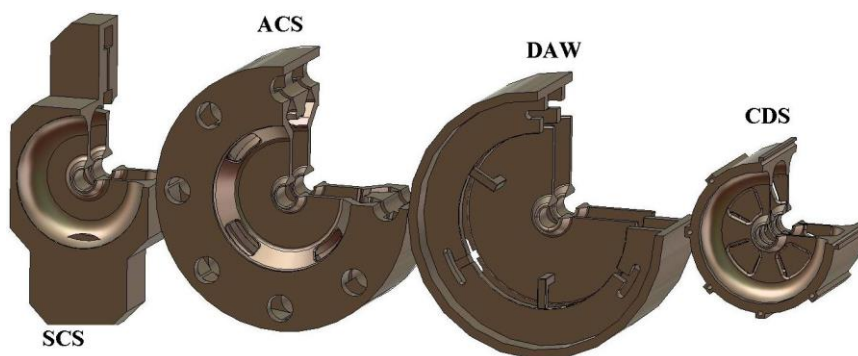


Рисунок 1.5. Эскиз рассматриваемых структур на одной рабочей частоте.

Расчет электродинамических характеристик этих структур проводится для частоты рабочего колебания 991 МГц, фазовой скорости первой секции $\beta=0,4313$ и принятого для первого резонатора радиуса апертуры 17 мм, $E_{s,max}$ не более $1E_k$ по критерию Килпатрика, темп ускорения $E_0 T \cos(\varphi_s)=2,0$ МВ/м, синхронная фаза $\varphi_s=33^\circ$ [10]. Все эти структуры являются компенсированными, поэтому проводилось согласование частот моды связи и рабочей моды с точностью не хуже 100 кГц. Электродинамические характеристики, по которым проводилось сравнение структур, приведены в табл. 1.1 [24, 25, 26].

Таблица 1.1. Электродинамические характеристики, по которым исследовались структуры ACS, SCS, CDS, УСШД.

Параметр	Формула
Коэффициент связи $K_{св}$	$K_{св} = \frac{f_{\pi}^2 - f_0^2}{f_{\pi}^2 + f_0^2}$
Шунтовое сопротивление $R_{ш.}$	$R_{ш.} = \frac{\left[\int_0^1 E_z(z) dz \right]^2}{P_{пот} * l}$
Эффективное шунтовое сопротивление $R_{ш.эфф.}$	$R_{ш.эфф.} = \frac{\left \int_0^1 E_z(z) \exp(i\frac{2\pi}{\beta\lambda}z) dz \right ^2}{P_{пот} * l}$
Коэффициент пролетного времени T	$T = \frac{\left \int_0^1 E_z(z) \exp(i\frac{2\pi}{\beta\lambda}z) dz \right }{\int_0^1 E_z(z) dz}$
Коэффициент перенапряжения $K_{перенапр.}$	$K_{перенапр.} = \frac{E_{s,max}}{E_z * T}$

В качестве опорной была принята структура УСШД, разработанная в РТИ АН СССР [23]. Схема структуры УСШД по чертежам РТИ представлена на рис. 1.6.

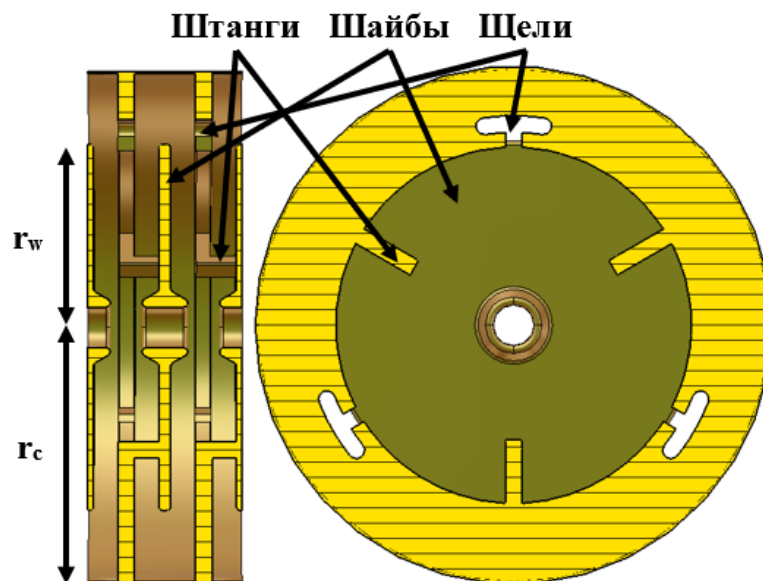


Рисунок 1.6. Схема структуры УСШД по чертежам РТИ АН СССР.

Поскольку в ускоряющей структуре УСШД есть штанги, необходимые для крепления шайб, и щели, необходимые для смещения паразитных колебаний по частоте, расчет электродинамических характеристик УСШД велся поэтапно:

1. Расчет модели структуры без штанг и щелей. В результате были определены настроечные размеры, частоты рабочей моды и моды связи, коэффициент связи, добротность, шунтовое сопротивление, коэффициент пролетного времени.

2. В модель вводятся штанги в соответствии с чертежами РТИ РАН, при этом фиксировалось, насколько они изменяют частоты рабочей моды и моды связи. Проведена подстройка частотных характеристик.

3. Вводятся щели для устранения влияния паразитных колебаний. Выбором размеров щелей проводилось удаление паразитных колебаний из полосы ~ 10 МГц от рабочего колебания [27].

4. В структуре применяются два радиуса скругления трубки дрейфа и проводится окончательная настройка частотных характеристик. Расчет проводился для структуры без штанг и щелей для получения максимально возможных для УСШД величин $R_{ш.эфф.}$, Q , T .

Характеристики УСШД, полученные на этих четырех этапах представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Расчетные параметры структуры УСЩД.

Параметр	Структура по чертежам РТИ			Структура с оптимизированной трубкой дрейфа, без штанг и щелей
	Без штанг и щелей	Со штангами без щелей	Со штангами и щелями	
Радиус шайбы r_w , мм	152,10	151,50	151,50	145,50
Радиус резонатора r_c , мм	210,30	203,10	203,10	210,80
Частота рабочей моды и моды связи, МГц	991,00±0,05			
k_c	0,55	0,50	0,50	0,55
Коэффициент влияния радиуса шайбы, МГц/мм	-	15,62	16,12	34,73
Q	24054	19606	20808	23407
$R_{ш.}$, МОм/м	40,20	27,08	34,81	42,61
$R_{ш.эфф.}$, МОм/м	27,35	18,41	23,65	30,76
T	0,83	0,83	0,82	0,85
$K_{перенапр}$	4,96	5,66	5,83	5,34

При введении штанг происходит сдвиг частоты рабочей моды на 0,9%, уменьшение $R_{ш.эфф.}$ на 32,7%, Q на 18,5%. Это связано с влиянием паразитных колебаний и увеличением общей внутренней поверхности структуры.

При введении щелей подстройкой их размеров удается достичь увеличения $R_{ш.эфф.}$ на 22,1% и Q на 5,8% по сравнению со структурой УСЩД со штангами без щелей.

Структура без установленных штанг и щелей с оптимизированной трубкой дрейфа по сравнению со структурой, разработанной РТИ РАН, обладает $R_{ш.эфф.}$ большим на 11,1%, k_c на 1,0%, T на 2,9%. В дальнейшем данный вариант структуры УСЩД будет использоваться в качестве эталонного.

Для структуры с оптимизированной трубкой дрейфа проведен расчет электродинамических характеристик в программе двухмерного моделирования MultiMode [28]. В табл. 1.3. приведены полученные в программе двухмерного моделирования MultiMode характеристики структуры в сравнении с трехмерным моделированием в CST [18].

Таблица 1.3. Сравнение характеристик структуры УСШД.

Параметр	MultiMode	CST studio
Частота рабочей моды, МГц	991,00	989,82
Частота моды связи, МГц	991,00	990,97
$R_{ш.эфф.}$, МОм/м	29,62	30,76
T	0,85	0,85

Различие в $R_{ш.эфф.}$ составляет 3,7%, в T – 0,01%. Различие в частоте рабочей моды составляет 0,12%, в частоте моды связи – 0,003%.

Расчет электродинамических характеристик ACS, SCS и CDS проводился для варианта структур, настроенного на рабочую частоту 991 МГц и радиус апертуры 17 мм, соответствующие первому резонатору основной части ЛУ ИЯИ РАН. Поперечные размеры структур и полученные электродинамические характеристики приведены в Табл. 1.4 в сравнении с эталонным вариантом УСШД.

Таблица 1.4. Сравнение характеристик предложенных структур.

Параметр	УСШД эталон	ACS	SCS	CDS
Длина, мм	65,24			
Ширина, мм	425,67	405,35	211,79	211,54
Высота, мм	425,67	405,35	465,74	211,54
k_c	0,56	0,054	0,042	0,164
Q	23407	15834	16998	14738
$R_{ш.эфф.}$, МОм/м	30,76	28,66	30,04	31,16
T	0,85	0,84	0,84	0,86
$K_{перенапр}$	9,30	9,40	8,81	9,00

Структуры обладают схожей эффективностью использования ВЧ мощности, определяемой величиной эффективного шунтового сопротивления. При этом структура CDS обладает вдвое меньшими поперечными размерами [29].

На Рис. 1.7 приведены дисперсионные характеристики рабочих видов колебания структур УСШД, ACS, SCS и CDS.

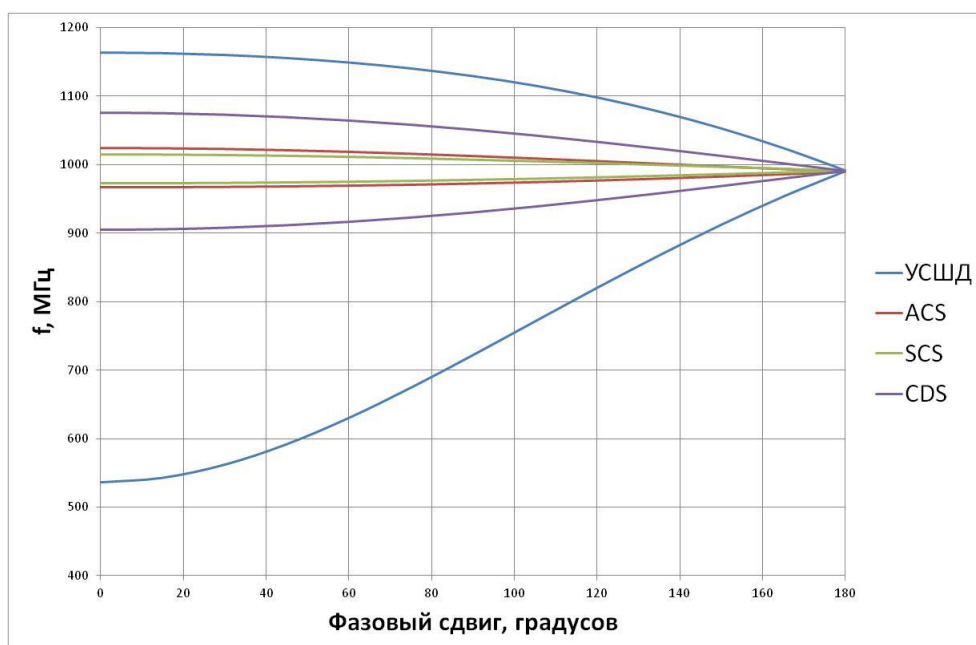


Рисунок 1.7. Дисперсионные характеристики рабочих видов колебания характеристики структур УСШД, ACS и SCS, CDS.

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, как это показано на рис. 1.8 [30].

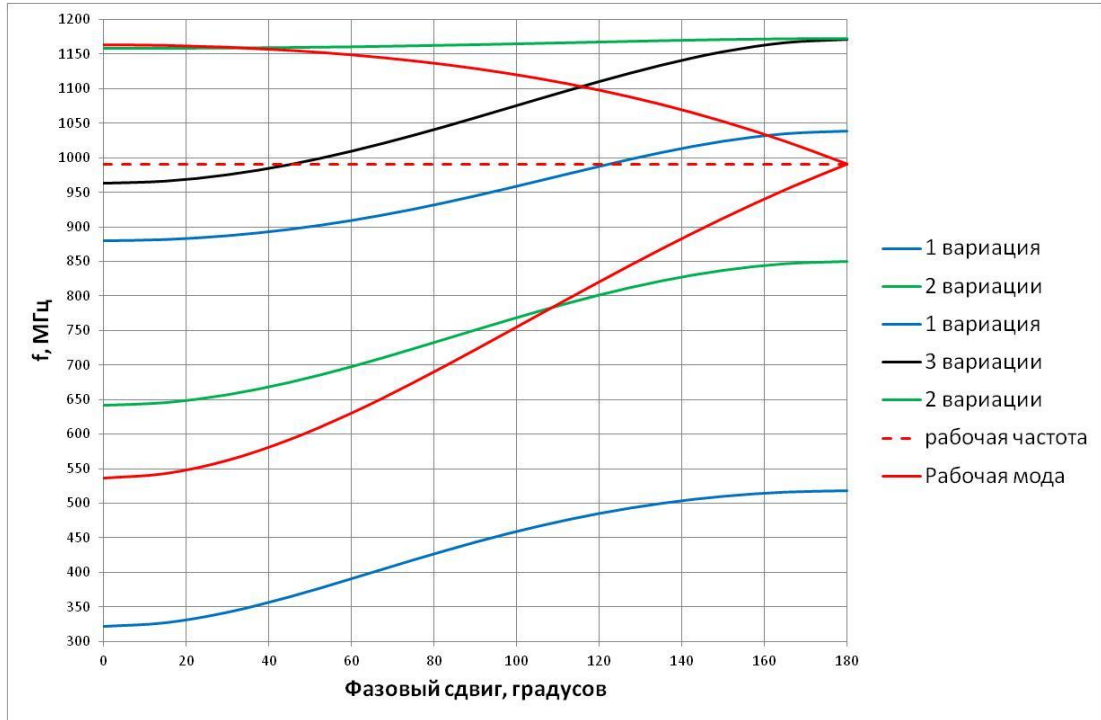


Рисунок 1.8. Дисперсионная характеристика структуры УСШД в окрестности рабочего колебания, $\beta=0,4313$.

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.

1.3. Исследование тепломеханических процессов в структурах УСШД, ACS, SCS и CDS под воздействием ВЧ нагрева. Оптимизация схемы охлаждения структуры CDS.

В рабочем режиме первого резонатора основной части, например ЛУ ИЯИ РАН, каждый период структуры в секциях испытывает ВЧ тепловые нагрузки со средней мощностью до 0,5 кВт с учетом двукратного запаса. При отсутствии эффективного отвода этой тепловой мощности жидкостью в каналах охлаждения, в структуре возникают механические деформации, приводящие к смещению частоты рабочей моды и моды связи, которые приводят к увеличению величины полосы запираения свыше допустимой величины $\delta f=400$ кГц [26]. Для обеспечения стабильности работы структуры необходимо обеспечить отвод мощности ВЧ потерь жидкостью в каналах охлаждения, при котором полоса запираения не будет превышать эту величину.

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. Диаметр каналов охлаждения и скорость потока воды выбирались из условия обеспечения турбулентного течения с числом Рейнольдса более 10000. Температура в каналах фиксировалась на уровне 27 °С, обеспечивая коэффициент теплопередачи $\alpha=9,20 \cdot 10^3$ Вт/м²К.

В программе ANSYS [15] производился расчет электромагнитных полей, тепловых нагрузок, связанных механических деформаций и сдвигов частот рабочей моды и моды связи, вызываемых тепловыми деформациями [31].

Для структуры УСШД реализован вариант схемы охлаждения, соответствующий используемому в настоящее время на ускорителе ИЯИ РАН. Схематичное изображение моделей структур с тестовыми каналами охлаждения приведено на рис. 1.9.

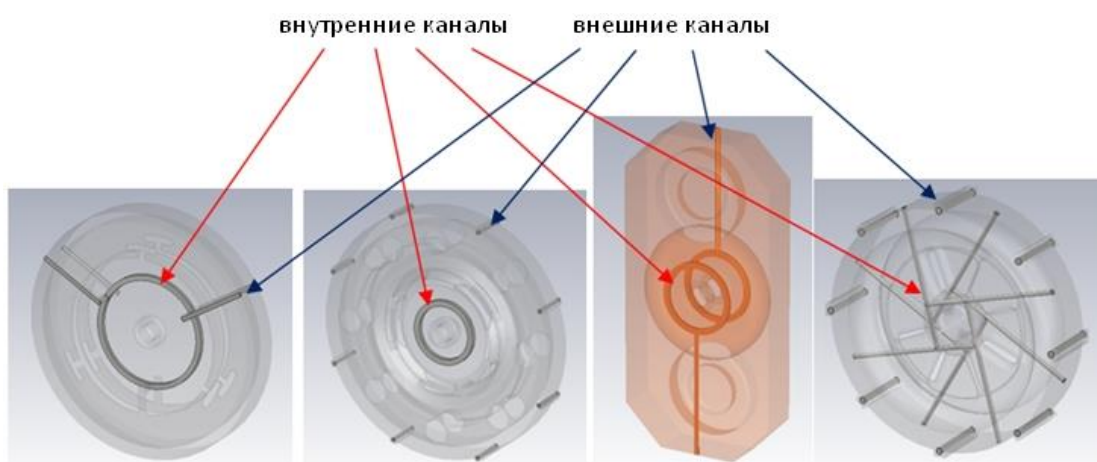


Рисунок 1.9. Схемы охлаждения структур УСЩД, ACS, SCS и CDS.

В табл. 1.5 приведены основные результаты моделирования связанных тепломеханических процессов в исследуемых структурах.

Таблица 1.5. Результаты моделирования тепломеханических процессов.

Параметр/структура	УСЩД	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 запирания δf , 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, соответствующих рабочему режиму первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН [29]. Использованные при расчетах варианты схемы охлаждения

обеспечивают величины смещения частот, при которых полоса запираания не превышает 400 кГц [32].

Для структуры CDS, как новой разработки, было рассмотрено три варианта схемы охлаждения: с только внешними каналами, с только внутренними каналами и с внутренними и внешними каналами охлаждения. На рис. 1.10 приведено сравнение распределений максимальных температур в рабочем режиме первого резонатора с учетом двукратного запаса по мощности тепловых нагрузок для различных вариантов схем охлаждения структуры CDS [33].

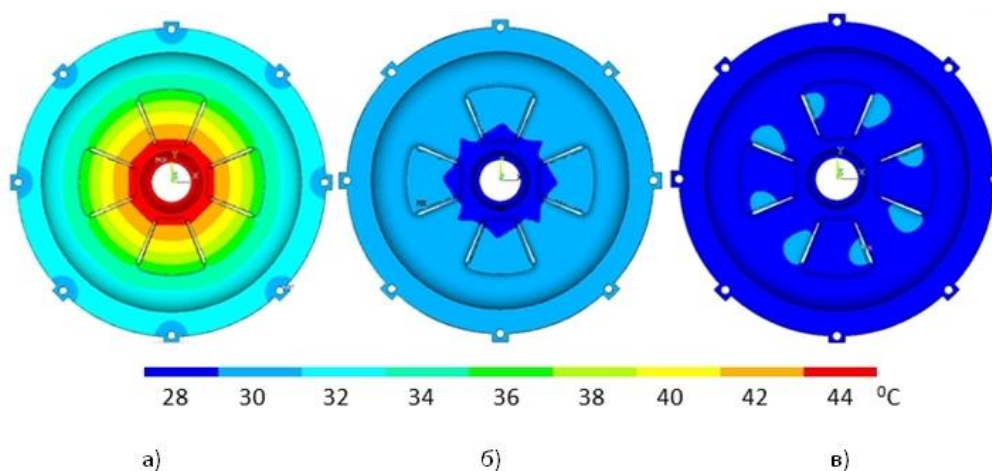


Рисунок 1.10. Распределение максимальных температур в структуре CDS при использовании различных вариантов каналов охлаждения: а) только внешние каналы, б) только внутренние каналы, в) внутренние и внешние каналы

В табл. 1.6 приведены полученные значения максимальной разности температур в структуре и смещения частот ускоряющей моды и моды связи при использовании различных вариантов системы охлаждения [34].

Таблица 1.6. Сравнение вариантов системы охлаждения CDS.

Параметр/вариант	Только внешние каналы	Только внутренние каналы	Внутренние и внешние каналы
Максимальная разность температур, °С	15,24	3,30	2,10
Смещение частоты ускоряющей моды, кГц	-324,70	-49,30	-46,80
Смещение частоты моды связи, кГц	1131,20	171,70	165,10
Полоса запирания δf , кГц	1455,90	221,00	211,90

При использовании только внешних каналов охлаждения происходит сильный нагрев трубки дрейфа, ее деформация и смещение частот ускоряющей моды и моды связи, при которых полоса запирания превышает $\delta f=400$ кГц. При использовании системы из только внутренних каналов и внутренних и внешних каналов величина полосы запирания не превышает $\delta f=400$ кГц, при этом разница в величине δf между этими вариантами системы охлаждения составляет 4,1%.

Основываясь на малых поперечных размерах структуры CDS и рассчитанных величинах смещения частот ускоряющей моды и моды связи при использовании только внутренних каналов охлаждения, секции для резонатора могут быть произведены без использования внешних каналов охлаждения. При этом в секциях отсутствуют паяные соединения «вода-вакуум», что повышает надежность структуры в эксплуатации [35].

Выводы к Главе 1.

1. Структура CDS обладает электродинамическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям первого резонатора основной части ЛУ. В сравнении с другими предложенными структурами она обладает вдвое меньшими поперечными размерами, что существенно удешевляет изготовление резонатора.

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

3. Использование в структуре CDS схемы охлаждения с внутренними каналами позволяет обеспечить приемлемые значения максимальной температуры и смещения частот ускоряющей моды и моды связи. При этом в резонаторе отсутствуют паяные соединения «вода-вакуум».

Глава 2. Оптимизация параметров структуры CDS для начала основной части интенсивного ЛУ ионов водорода.

2.1. Унификация размеров ячеек секций резонатора.

Исходя из мировой практики изготовления многосекционных резонаторов следует, что использование различных геометрических размеров ячеек для секций приводит к значительному увеличению стоимости изготовления резонатора. Поэтому исследована возможность использования четырех секций резонатора с унифицированными параметрами ячеек, с достижением суммарного шунтового сопротивления резонатора, не уступающего расчетному значению для используемой в настоящее время структуры УСШД, которое составляет 133 МОм [23].

Геометрические параметры структуры CDS, используемые далее показаны на рис. 2.1.

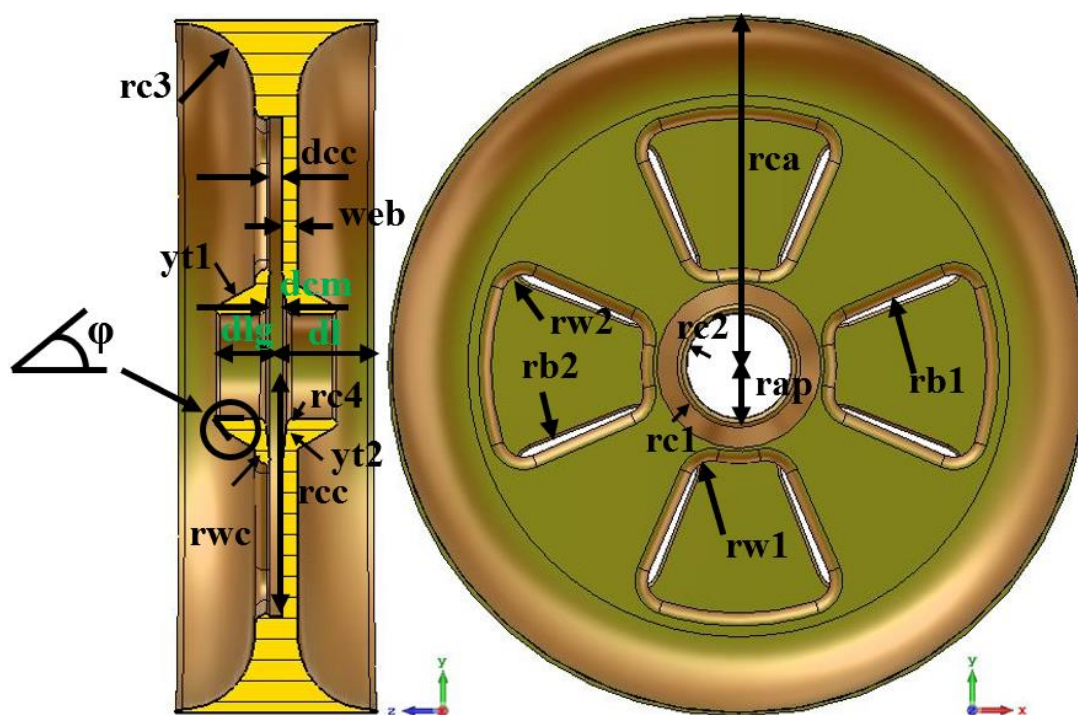


Рисунок 2.1. Геометрические параметры структуры CDS.

Параметр длины зазора dl_g связан с длиной полупериода структуры dl через линейный коэффициент α :

$$dl_g = dl * \alpha. \quad (2.1)$$

Влияние параметров трубки дрейфа на шунтовое сопротивление резонатора носит единый характер для любых видов бипериодических

структур. Поэтому для выбора оптимальных параметров трубки дрейфа использовались результаты, полученные в программе Multi Mode для структуры УСШД. При оптимизации эффективного шунтового сопротивления вводятся два радиуса скругления трубки дрейфа, что позволяет увеличить его на величину порядка 1% без потерь в других характеристиках структуры [34].

На рис. 2.2 приведены графики зависимости полного шунтового сопротивления резонатора от отношения максимального значения напряженности электрического поля на поверхности $E_{s,max}$ к пределу Килпатрика $E_{килл.}$, который для частоты 991 МГц составляет 28,508 МВ/м и является характеристикой электрической прочности структуры [36]. Эти зависимости построены для вариантов структуры с геометрическими размерами, позволяющими получить наибольшие значения полного шунтового сопротивления резонатора из четырех секций.

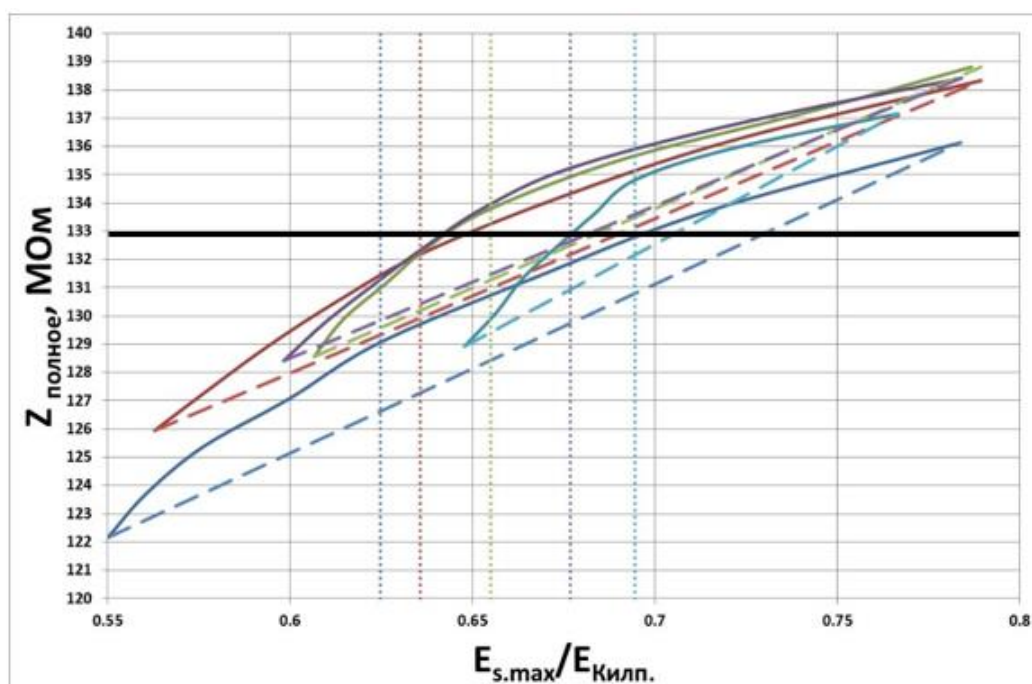


Рисунок 2.2. Зависимость полного шунтового сопротивления резонатора от отношения максимальной напряженности электрического поля к пределу Килпатрика.

С возрастанием максимальной напряженности поля возрастает и величина полного шунтового сопротивления, превышая искомый предел 133 МОм. Исходя из такого характера зависимости, рассматривались параметры

трубки дрейфа, при которых обеспечивается суммарное шунтовое сопротивление резонатора не менее $Z_{\text{полное}}=133$ МОм. На рис. 2.2 эти параметры соответствуют максимальному приросту в шунтовом сопротивлении при относительно невысоком значении максимальной напряженности электрического поля. На рис. 2.3 приведен график зависимости суммарного шунтового сопротивления резонатора от угла раскрытия трубки дрейфа ϕ (рис. 2.1) без подстройки частот ускоряющей моды и моды связи до рабочего значения.

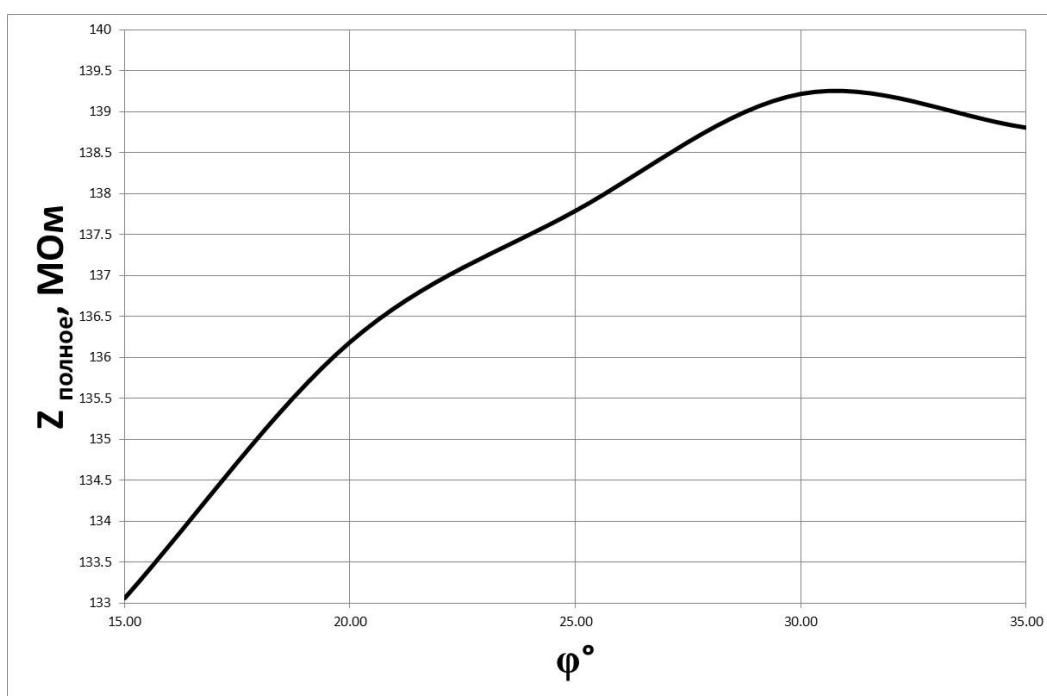


Рисунок 2.3. Зависимость полного шунтового сопротивления резонатора от угла раскрытия трубки дрейфа.

Наибольшее полное шунтовое сопротивление резонатора достигается при $\phi=30^\circ$. Радиусы скругления трубки дрейфа составляют $r_{c1}=2,00$ мм и $r_{c2}=2,20$ мм соответственно.

При данных параметрах ϕ , r_{c1} , r_{c2} путем моделирования были получены характеристики структуры для четырех секций резонатора с $\beta=0,4313 - 0,4489$. При этом для достижения частоты ускоряющей моды 991 МГц можно использовать как радиус ускоряющей ячейки r_{ca} , так и коэффициент α с фиксированным радиусом ускоряющей ячейки. Результаты

моделирования, полученные для двух вариантов подстройки частоты ускоряющей моды при $r_{c1}=2,00$ мм и $r_{c2}=2,20$ мм, приведены в табл. 2.1, 2.2.

Таблица 2.1. Результаты моделирования CDS для четырех секций при переменном r_{ca} , $r_{c1}=2,00$ мм, $r_{c2}=2,20$ мм, $\phi=30^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{килл}$	$Z_{полное}/Z_{полное.расч}$, %
0,4313	0,32	113,52	76,86	24,21	0,69	-1,95
0,4373		114,30	76,90	24,84	0,67	
0,4434		112,71	76,68	25,54	0,68	
0,4489		113,34	76,70	26,05	0,68	

Таблица 2.2. Результаты моделирования CDS для четырех секций при фиксированном r_{ca} , $r_{c1}=2,00$ мм, $r_{c2}=2,20$ мм, $\phi=30^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{килл}$	$Z_{полное}/Z_{полное.расч}$, %
0,4313	0,307	113,50	76,85	24,14	0,69	-2,36
0,4373	0,312		76,81	24,76	0,67	
0,4434	0,317		76,75	25,39	0,68	
0,4489	0,321		76,71	25,95	0,68	

При использовании параметров, соответствующих оптимумам зависимостей, приведенных на рис. 2.2, не удается достичь полного шунтового сопротивления резонатора CDS, равного расчетному значению для резонатора УСШД.

Для достижения необходимой величины полного сопротивления резонатора необходимо использование параметров, при которых увеличивается отношение максимальной напряженности электрического поля к пределу Килпатрика. Для точки на рис. 2.2 с максимальным полным сопротивлением резонатора DAW это отношение составляет 0,79. При этом радиусы скругления трубки дрейфа составляют $r_{c1}=1,40$ мм и $r_{c2}=1,60$ мм

соответственно, $\phi=25^\circ$. Результаты для такого набора параметров представлены в табл. 2.3, 2.4.

Таблица 2.3. Результаты моделирования CDS для четырех секций при переменном r_{ca} , $r_{c1}=1,40$ мм, $r_{c2}=1,60$ мм, $\phi=25^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{килл}$	$Z_{полное}/Z_{полное.расч}$ %
0,4313	0,30	112,60	78,10	25,07	0,80	+1,32
0,4373		112,92	78,10	25,66	0,79	
0,4434		112,36	77,98	26,37	0,78	
0,4489		112,98	78,00	26,87	0,78	

Таблица 2.4. Результаты моделирования CDS для четырех секций при фиксированном r_{ca} , $r_{c1}=2,00$ мм, $r_{c2}=2,20$ мм, $\phi=25^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{килл}$	$Z_{полное}/Z_{полное.расч}$ %
0,4313	0,293	112,72	78,10	25,06	0,80	+1,24
0,4373	0,298		78,07	25,65	0,79	
0,4434	0,303		78,01	26,33	0,78	
0,4489	0,308		77,98	26,85	0,78	

При использовании радиусов скругления трубки дрейфа $r_{c1}=1,40$ мм и $r_{c2}=1,60$ мм достигается полное шунтовое сопротивление резонатора, превышающее расчетное значение структуры УСШД даже при использовании единого радиуса ускоряющей ячейки.

Однако изготовление трубки дрейфа с радиусами скругления, разница между которыми составляет менее 0,50 мм, связано с трудностями соблюдения размеров и допусков изготовления. Поэтому были рассмотрены варианты трубки дрейфа с радиусами $r_{c1}=2,00$ и $r_{c2}=2,50$ мм; и $r_{c1}=1,50$ и $r_{c2}=2,00$ мм.

При использовании радиусов $r_{c1}=2,00$ мм и $r_{c2}=2,50$ мм потеря в общем шунтовом сопротивлении составляет более 2% по отношению к эталонному варианту УСЩД.

В табл. 2.5, 2.6 приведены результаты для структуры с радиусами скругления $r_{c1}=1,50$ мм и $r_{c2}=2,00$ мм, $\phi=30^\circ$.

Таблица 2.5. Результаты моделирования CDS для четырех секций при переменном r_{ca} , $r_{c1}=1,50$ мм, $r_{c2}=2,00$ мм, $\phi=30^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{кипп}$	$Z_{полное}/$ $Z_{полное.р}$ асч, %
0,4313	0,31	113,02	77,14	24,95	0,74	+0,61
0,4373		112,99	76,79	25,32	0,74	
0,4434		112,64	76,99	26,35	0,74	
0,4489		112,61	76,94	26,63	0,73	

Таблица 2.6. Результаты моделирования CDS для четырех секций при фиксированном r_{ca} , $r_{c1}=1,50$ мм, $r_{c2}=2,00$ мм, $\phi=30^\circ$.

β секции	α	r_{ca} , мм	r_{cc} , мм	$Z_{эфф}$, МОм/м	$E_{s,max}/E_{кипп}$	$Z_{полное}$ $/Z_{полно}$ е.расч, %
0,4313	0,30	112,82	76,66	24,75	0,74	+0,12
0,4373	0,29		76,56	25,53	0,74	
0,4434	0,32		76,99	25,98	0,74	
0,4489	0,31		76,95	26,45	0,73	

При использовании радиусов скругления $r_{c1}=1,50$ мм и $r_{c2}=2,00$ мм удается достичь необходимого значения полного сопротивления резонатора также при использовании унифицированного радиуса ускоряющей ячейки $r_{ca}=112,82$ мм.

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. 2.4.

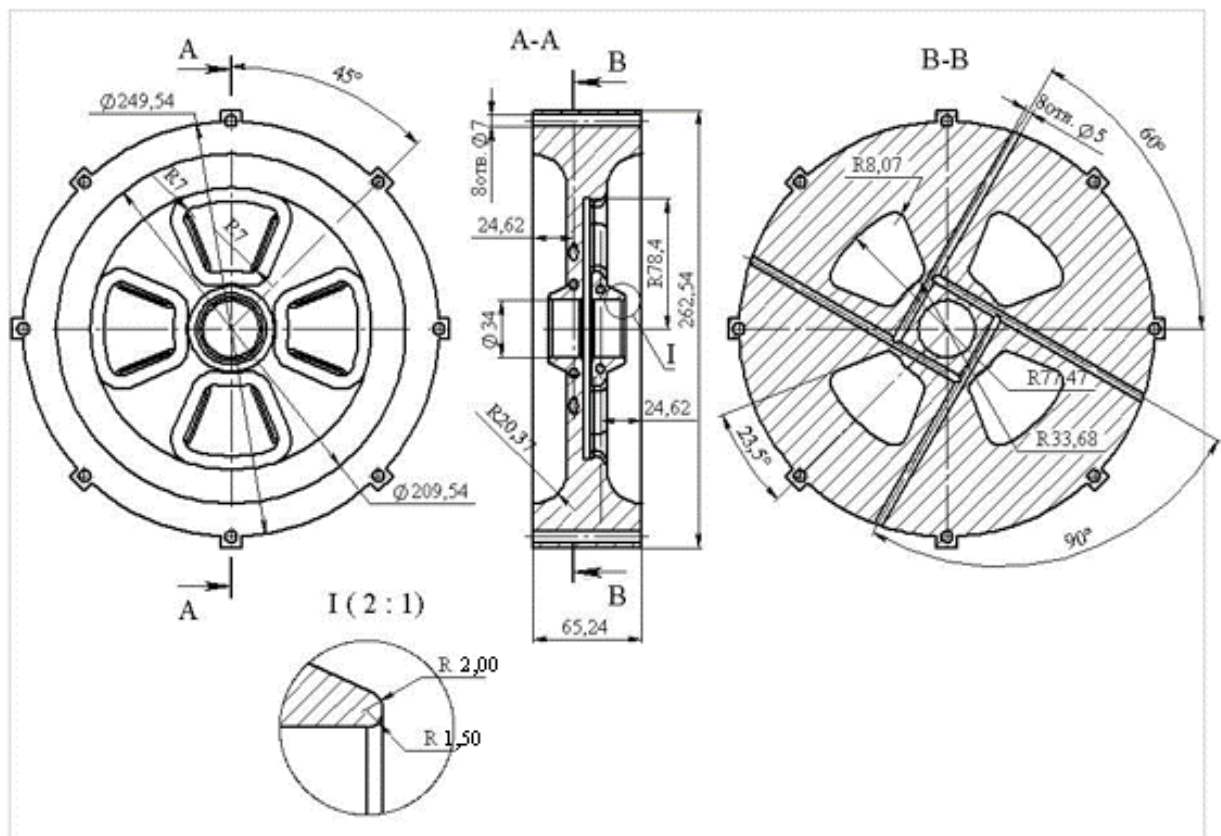


Рисунок 2.4. Технический рисунок структуры CDS для первой секции резонатора основной части.

На рисунке приведены как внешние, так и внутренние каналы охлаждения. Однако с учетом результатов сравнения эффективности вариантов системы охлаждения, применимых в первом резонаторе, внешние каналы могут быть исключены из проекта для упрощения изготовления структуры.

2.2. Определение допусков изготовления структуры CDS.

2.2.1. Обоснование критерия выбора допусков изготовления ячеек CDS.

Для упрощения и удешевления изготовления резонатора была произведена унификация некоторых настроечных размеров структуры для всех четырех секций. При этом резонатор CDS не уступает существующему по характеристике полного шунтового сопротивления. Определение допусков изготовления рассматривалось на примере первой секции резонатора, состоящей из 18 периодов.

Для определения оптимальных допусков изготовления резонатора требуется расчет влияния возмущения, вносимого в электромагнитное поле структуры отклонениями в геометрических размерах. Это влияние определяется величиной дисперсии ускоряющего поля [30]:

$$\sigma_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N_p}, \quad (2.2)$$

где N_p – количество ускоряющих зазоров, E_i – напряженность поля в i -ом зазоре. В качестве относительной оценки дисперсии ускоряющего поля можно использовать выражение, приведенное в [16]:

$$\sigma_E^2 = \sigma_{E_f}^2 + \sigma_{E_k}^2, \quad (2.3)$$

где $\sigma_{E_f}^2$ – дисперсия, вызываемая смещением частот ускоряющей моды и моды связи, а $\sigma_{E_k}^2$ – дисперсия, вызываемая смещением коэффициента связи:

$$\sigma_{E_f}^2 \approx \frac{16\sigma_{f_a}^2}{k_c^4} \left(\sigma_{f_c}^2 \frac{N_p^3 + 4N_p^2 + 6N_p}{12} + \left(\frac{\delta f}{f_a} \right)^2 \frac{N_p^3 + 4N_p^2 + 6N_p}{3} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma_{E_k}^2 = \sigma_{k_c}^2 \frac{N_p + 2}{3}, \quad (2.5)$$

где $\delta f = f_c - f_a$ – ширина полосы запираения, при этом $\sigma_{f_{a,c}}$ и σ_{k_c} определяются как:

$$\sigma_{f_{a,c}} = \frac{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f_{a,c}}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}}{f_{a,c}}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_{k_c} = \frac{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial k_c}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}}{k_c}, \quad (2.7)$$

где σ_{x_i} – дисперсия геометрического параметра, допуск параметра при этом составляет $\delta x_i = \pm 3\sigma_{x_i}$. Отклонение в частотах ускоряющей моды и моды связи определяется как интеграл поля по поверхности структуры, поделенный на энергию, запасенную в колебаниях:

$$\frac{\delta f_{a,c}}{f_{a,c} \delta x_i} = \frac{\int_{S_i} (\epsilon_0 \vec{E}_{a,c}^2 - \mu_0 \vec{H}_{a,c}^2) d\vec{S}}{4W_{a,c}}, \quad (2.8)$$

где $W_{a,c}$ – энергия, запасенная в ускоряющей моде и моде связи. δx_i в дальнейшем принималось условно равным 1 мм.

В компенсированных структурах коэффициент связи можно определить из выражения [37]:

$$\frac{\beta_g}{\beta} = \frac{\pi k_c}{4} \quad (2.9)$$

$$\beta_g = \left| \frac{\pi \beta \int_{V_0} (\mu_0 \vec{H}_a \vec{H}_c - \epsilon_0 \vec{E}_a \vec{E}_c) dV}{\sqrt{2W_a W_c}} \right|, \quad (2.10)$$

где β_g – групповая скорость, $W_a = W_c$. Отклонение коэффициента связи можно определить соответственно:

$$\delta k_c = \frac{\int_{S_i} (\epsilon_0 \vec{E}_a \vec{E}_c - \mu_0 \vec{H}_a \vec{H}_c) d\vec{S}_i \Delta x_i}{\sqrt{2W_a W_c}}. \quad (2.11)$$

Допустимой величиной σ_E , выбранной исходя из требований динамики частиц, является 1% [26].

2.2.2. Численное моделирование влияния отклонений геометрических параметров на отклонения частот и коэффициента связи в структуре CDS.

Для определения величины допусков изготовления секций резонатора использовалась ранее описанная методика [16], использующая пакет численного моделирования ANSYS [15]. С помощью внутренних средств пакета рассчитываются частоты, распределение поля для ускоряющей моды и моды связи рабочего вида колебания π .

Поверхность структуры разбивается на нумерованные в соответствии с внутренним алгоритмом ANSYS поверхности, соответствующие геометрическим параметрам, как это показано на рис. 2.5.

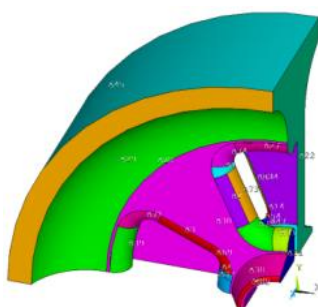


Рисунок 2.5. Разбиение структуры CDS на поверхности в ANSYS.

С помощью макрокоманд ANSYS при необходимости сравниваются распределения полей исследуемых видов колебаний и рассчитываются величины смещений частот и коэффициентов связи для каждой из поверхностей согласно уравнениям (2.8), (2.11) [38]. При расчете задавалось условное смещение поверхности в 1 мм. В дополнение к этому несколько макрокоманд могут быть использованы для визуализации возмущений, вносимых в поле. На рис. 2.6 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.

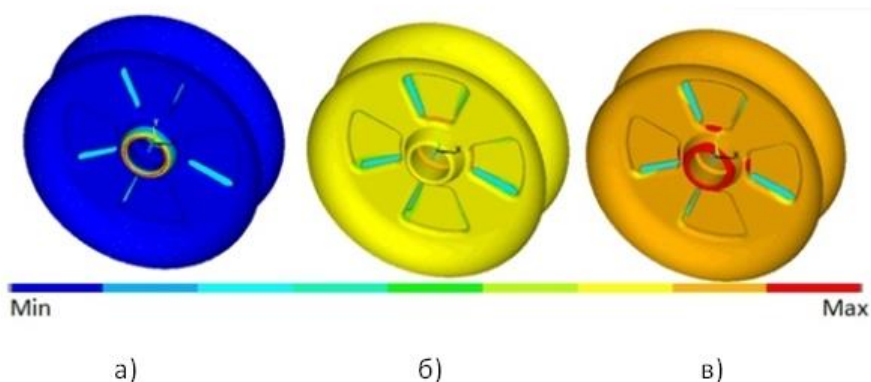


Рисунок 2.6. Распределение плотности чувствительности ускоряющей моды (а), моды связи (б) и коэффициента связи (в) к смещению поверхностей структуры CDS.

В таблице 2.7 приведены полученные значения относительных смещений частот ускоряющей моды и моды связи, и коэффициента связи для геометрических параметров структуры, обозначенных на рис. 2.1.

Таблица 2.7. Влияние геометрических параметров на величины относительных отклонений.

Размер x_i , мм	Описание	$(1/f_a) * \delta f_a / \delta x_i$, 1/мм	$(1/f_c) * \delta f_c / \delta x_i$, 1/мм	$\delta k_c / \delta x_i$, 1/мм
dcc=2,00	Ширина ячейки связи сверху	-0,48	-3,31	13,12
dcm=2,50	Ширина ячейки связи снизу	-0,10	104,94	→0,00
rap=17,00	Радиус апертуры	1,45	1,21	→0,00
rb1=8,00	Радиус скругления окна связи 1	-1,35	-19,92	5,19
rb2=2,00	Радиус скругления окна связи 2	-0,27	-16,26	→0,00
rc1=1,50	Радиус скругления трубки дрейфа снизу	7,64	0,02	0,01
rc2=2,00	Радиус скругления трубки дрейфа сверху	9,09	0,03	→0,00
rc3=30,00	Радиус скругления ускоряющей ячейки	-12,72	-0,10	→0,00
rc4=2,00	Нижний радиус скругления ячейки связи	0,01	11,80	→0,00
rcc=76,66	Радиус ячейки связи	-0,15	-3,50	→0,00
rw1=36,64	Радиус окна связи снизу	0,16	-2,68	-1,04
rw2=74,70	Радиус окна связи сверху	-1,00	-6,67	4,46
rwc=7,00	Радиус скругления окна связи 3	-0,60	-6,98	-1,77
web=12,00	Толщина стенки	-2,63	-0,58	-0,01
yt1=21,17	Соединение трубки дрейфа 1	1,59	-0,27	-2,89
yt2=26,64	Соединение трубки дрейфа 2	1,60	-0,27	-7,79
rca=112,82	Радиус ускоряющей ячейки	-12,72	-0,10	→0,00

На величину смещения частоты ускоряющей моды наибольшее влияние оказывают параметры, связанные с радиусом ускоряющей ячейки, радиусами скругления трубки дрейфа и окон связи. На 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. При допусках изготовления 30, 50, 80 мкм в CDS для ИЯИ значения σ_{kc} , σ_{fa} , σ_{fc} составляют соответственно:

Таблица 2.8. Значения σ_{kc} , σ_{fa} , σ_{fc} при различных допусках.

Допуск, мкм	σ_{kc}	σ_{fa}	σ_{fc}
30	0,001143	0,000227	0,001093
50	0,001904	0,000379	0,001821
80	0,003047	0,000606	0,002914

Оптимальный допуск изготовления определяется с помощью величины $\delta f/f_a$, рассчитанной по формуле (2.8). На рис. 2.7 изображена зависимость допустимой величины $\delta f/f_a$ от величины допуска. Величиной допустимой полосы запирания определяется сложность настройки структуры.

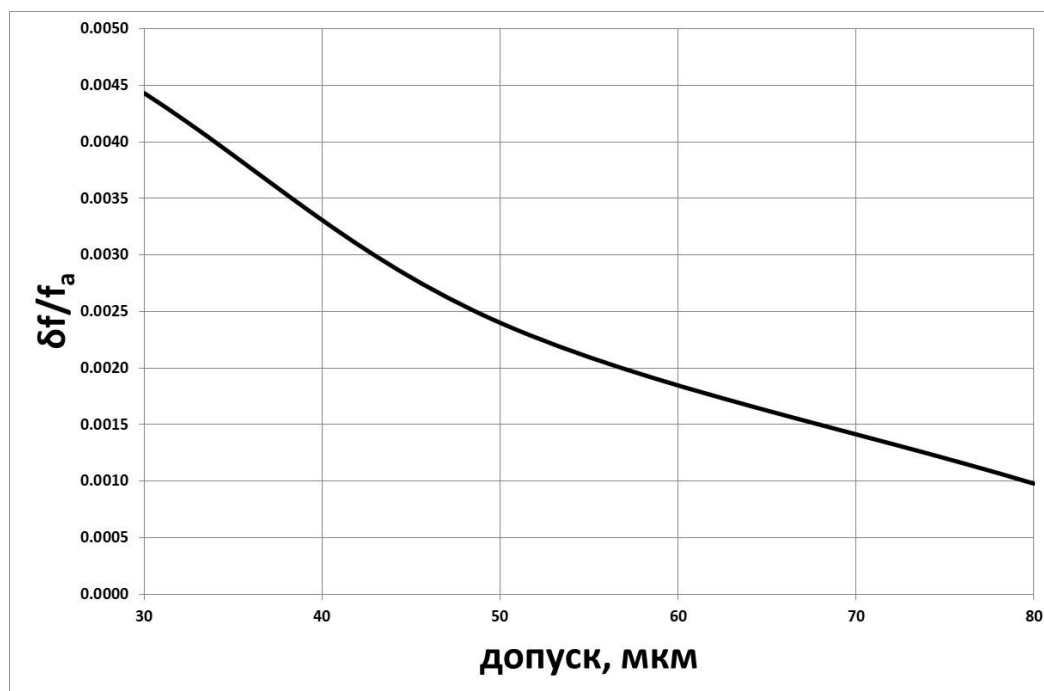


Рисунок 2.7. Зависимость допустимой величины отношения полосы запирания к рабочей частоте от величины допуска, $K_c=0,16$.

Для допуска изготовления 50 мкм, легко реализуемого на современном оборудовании с цифровым управлением, величина полосы запирания исходя только из условия однородности поля составляет ~ 2.5 МГц. В реальности она ограничивается другими эффектами. Расчетная добротность на ускоряющей моде и моде связи соответственно $Q_a=14870$, $Q_c=3927$. После изготовления разумно ожидать добротность в 80% от расчетной, что составляет $Q_a=11900$,

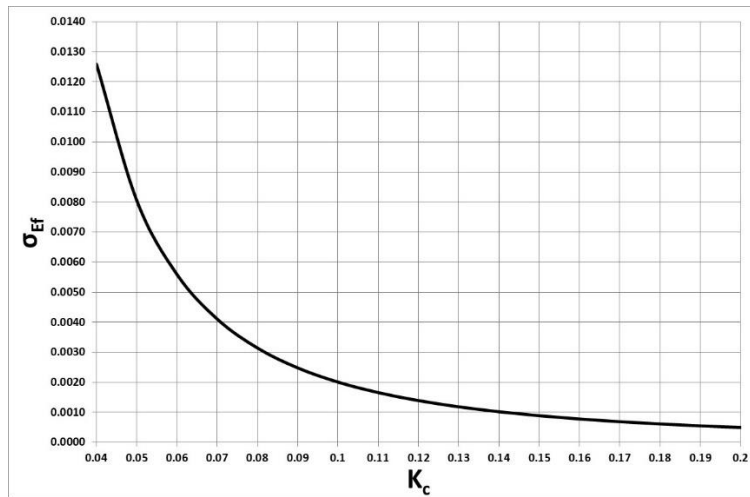
$Q_c=3140$. Кроме того, рабочее колебание должно быть согласовано с ВЧ-трактом, нагруженная добротность рабочего колебания будет в 2,3 раза ниже, что составляет $Q_H=5175$. Поэтому ожидаемая ширина резонансных кривых для рабочего колебания будет составлять 191,486 кГц, для колебания связи - 315,561 кГц. Для распространения ВЧ-мощности вдоль резонатора без искажения фазы необходимо перекрытие резонансных кривых рабочего колебания и колебания связи на уровне не ниже $1/\sqrt{2}$ [38]. Поэтому допустимой шириной полосы запираения является 505 кГц из соображений передачи ВЧ-мощности. Для более реалистичной полосы запираения 400 кГц [26] ожидаемая величина σ_E составляет:

Таблица 2.9. Значения дисперсии поля при различных допусках, $\delta f=400$ кГц.

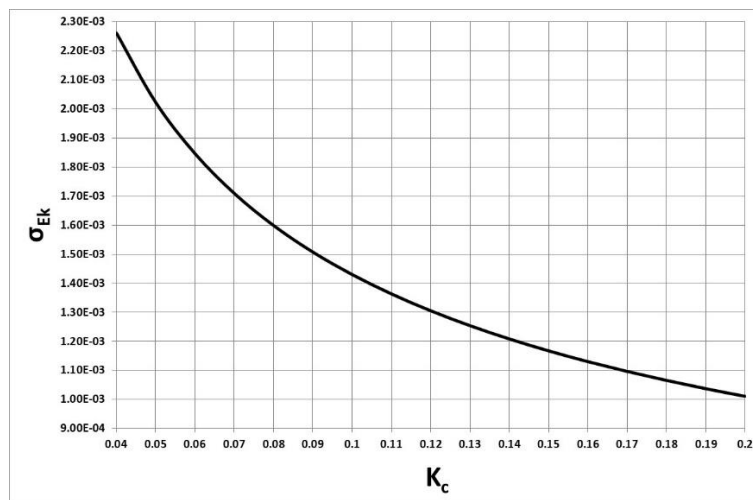
Допуск, мкм	$\sigma_E \cdot 10^{-3}$
30	1,48
50	2,53
80	4,30

На рис. 2.8 построены зависимости дисперсии частоты, коэффициента связи и ускоряющего поля от величины коэффициента связи при величине ширины полосы запираения $\delta f=400$ кГц.

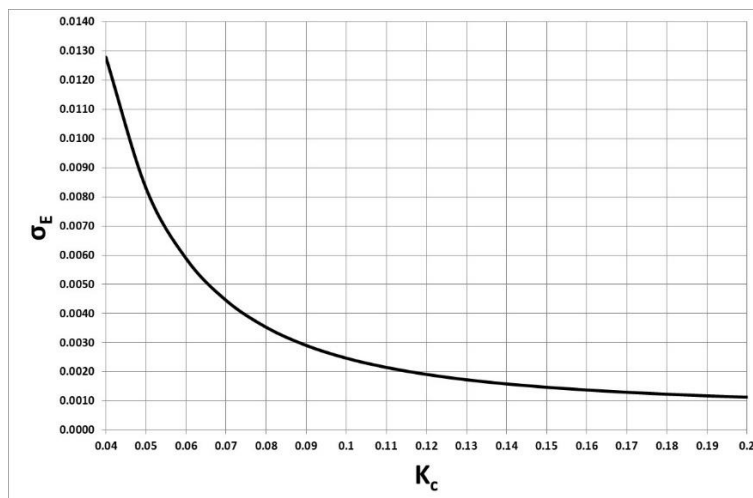
Наибольшее влияние в дисперсию ускоряющего поля вносит смещение частоты рабочей моды. При этом при уменьшении коэффициента связи ниже 0,1 происходит увеличение дисперсии ускоряющего поля на порядок. При коэффициенте связи менее 0,05 величина дисперсии ускоряющего поля превышает 1% при допустимой ширине полосы запираения 400 кГц. Это обосновывает важность высокого коэффициента связи более 0,1 применительно к бипериодическим ускоряющим структурам и разумность реализованного в структуре CDS $k_c \approx 0,16$.



а)



б)



в)

Рисунок 2.8. Зависимость дисперсии поля от смещения частоты (а), дисперсии поля от смещения коэффициента связи (б), дисперсия ускоряющего поля (в) от величины коэффициента связи κ_c , $\delta f = 400$ кГц.

2.3. Вторично-электронный резонансный разряд в структуре CDS.

2.3.1. Аналитическая оценка возможности возникновения ВЭРР в зазоре ячейки связи структуры CDS.

Для обеспечения стабильности работы резонатора необходимо исследовать возможность развития вторично-электронного резонансного разряда (ВЭРР) и методов его подавления вблизи рабочего уровня ускоряющего поля [36].

Впервые структура CDS была использована на ускорителе электронов DESY PITZ [39], расположенном в Цойтене, Германия. Основными задачами данного ускорительного комплекса являются исследование формирования сгустков высокой яркости, тестирование и оптимизация компонентов для лазеров на свободных электронах и линейных коллайдеров. Схема текущей конфигурации комплекса представлена на рис. 2.9 [6].

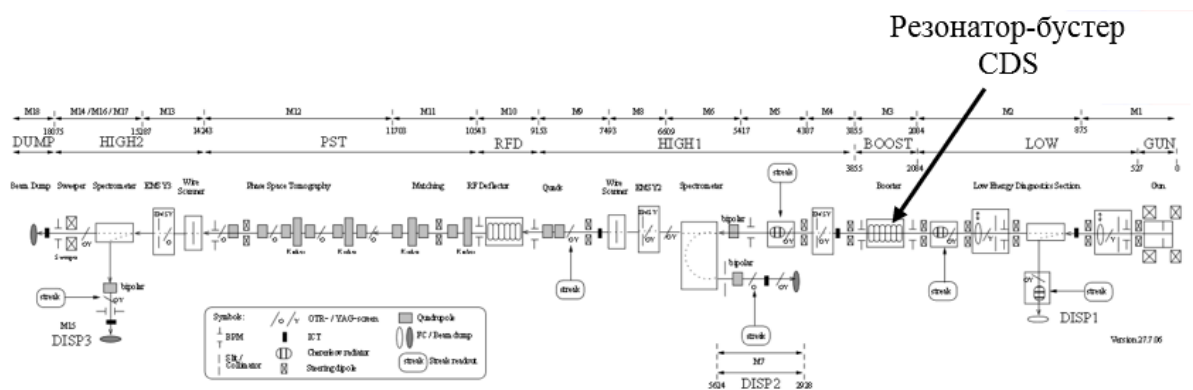


Рисунок 2.9. Схема установки DESY PITZ.

В состав установки входит резонатор-бустер на основе структуры CDS, состоящий из 14 периодов (ячеек). Эта структура используется на уровне ускоряющего поля E_0T до 14 МВ/м, рабочая частота составляет 1300 МГц, максимальная длительность ВЧ импульса 900 мкс, частота следования импульсов 5 Гц [35]. Схема резонатора представлена на рис 2.10.

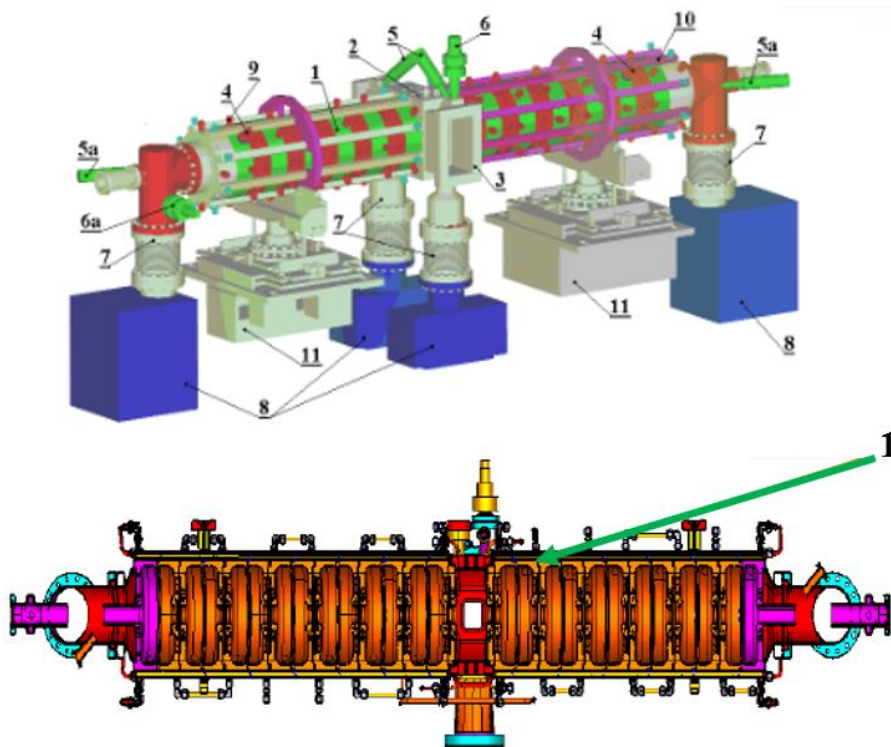


Рисунок 2.10. Схема резонатора-бустера CDS PITZ: 1 – ячейки структуры, 2 – ячейка ввода мощности, 3 – патрубки ввода мощности, 4 – ВЧ-зонды, 5, 5а – фотоумножители, 6, 6а – измерители вакуума, 7 – устройства откачки, 8 – ионные насосы, 9 – выходы внутренней системы охлаждения, 10 – внешние каналы охлаждения, 11 – опоры и устройства юстировки

Ввод мощности в резонатор осуществляется вблизи центральной ячейки, пиковая импульсная мощность клистрона составляет 8,6 МВт.

Результаты аналитической оценки, численного расчета и экспериментального исследования ВЭРР в структуре CDS PITZ могут быть использованы в качестве опорных для дальнейшего моделирования в CDS.

Для передачи энергии вдоль резонатора и возбуждения в нем ускоряющей моды требуется также возбуждение моды связи [38]. Мода связи возбуждается с коэффициентом затухания αd . Расчет коэффициента затухания на период проводился по формуле (2.12).

$$\alpha d = \left(1 + \frac{I_b U_a}{P_a}\right) \frac{\pi \beta}{2 \beta_g Q_a}, \quad (2.12)$$

где для случая резонатора CDS PITZ ток пучка $I_b=0$, $\beta=1$, групповая скорость $\beta_g=0,057$, добротность на ускоряющей моде $Q_a=23624$. Коэффициент затухания на период (ячейку) структуры αd составил 0,00118. Так как в

ускорителе PИTZ питание резонатора происходит вблизи центральной ячейки, при расчетах для моды связи использовался коэффициент от $\alpha d = 1 * 0,00118$ до $7 * \alpha d = 0,00826$ в зависимости от удаления ячейки относительно ввода мощности. В дальнейшем множитель перед αd обозначен как N – номер ячейки, $N=1$ соответствует ячейке, наиболее удаленной от ввода мощности.

В структуре CDS ячейка связи представляет собой цилиндрический зазор, соединенный с ускоряющей ячейкой окнами связи, как показано на рис. 2.11. Не смотря на расположение окон связи под углом 90° , исключить наличие области с параллельно расположенными поверхностями, в которой высока вероятность возникновения ВЭРР, вблизи трубки дрейфа конструктивно невозможно [40].

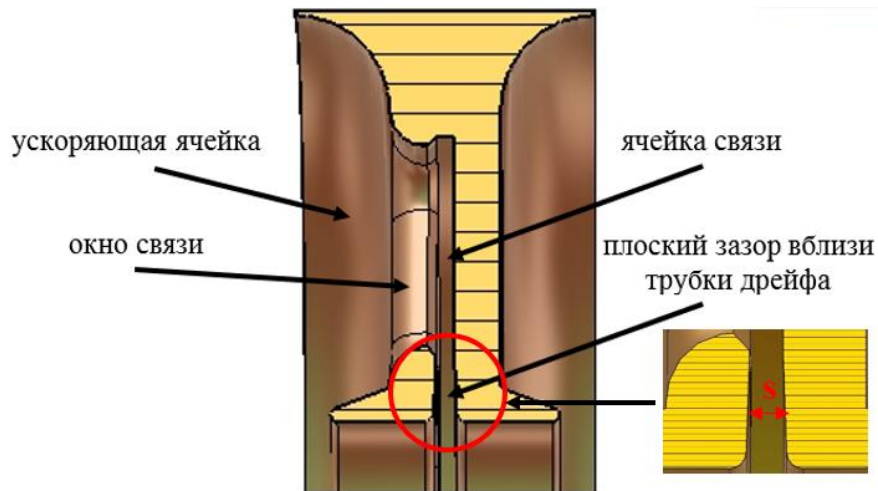


Рисунок 2.11. Схема периода структуры CDS.

Для случая плоского зазора ячейки связи структуры CDS изучена возможность возникновения ВЭРР 1-го порядка ($n_p=1$), при возникновении которого время пролета электронов между плоскостями соответствует одному полупериоду ВЧ поля $0,5 * T_{вч}$ и образуется наибольшее число вторичных электронов по сравнению с ВЭРР высших порядков [36].

В аналитическом приближении напряжение, необходимое для развития ВЭРР 1 порядка рассчитывается по формуле [36]:

$$U = 4\pi^2 (fs)^2 \frac{m}{e} \left(\frac{1+K_v}{1-K_v} \pi n \cos\psi + 2\sin\psi \right)^{-1}, \quad (2.13)$$

где f – частота, s – длина зазора, K_v – отношение скорости первичного электрона к скорости вторичного, ψ – фаза поля вылета вторичных электронов.

ВЭРР в плоском зазоре возникает в областях, образуемых величинами $f \cdot s \cdot U$, которые изображены на рис. 2.12 [36].

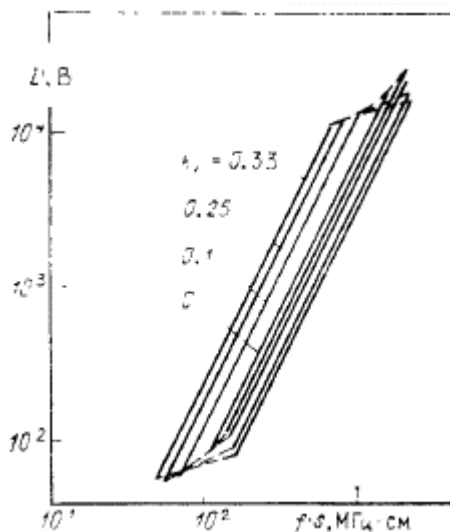


Рисунок 2.12. Области существования ВЭРР 1-го порядка при различных величинах K_v

Для численного расчета ВЭРР использовались параметры вторичной эмиссии бескислородной меди (МБ) [41, 42]. График зависимости коэффициента вторичной эмиссии КВЭ (Secondary Emission Yield, SEY) от энергии первичного электрона при условии падения под прямым углом приведен на Рис. 2.13.

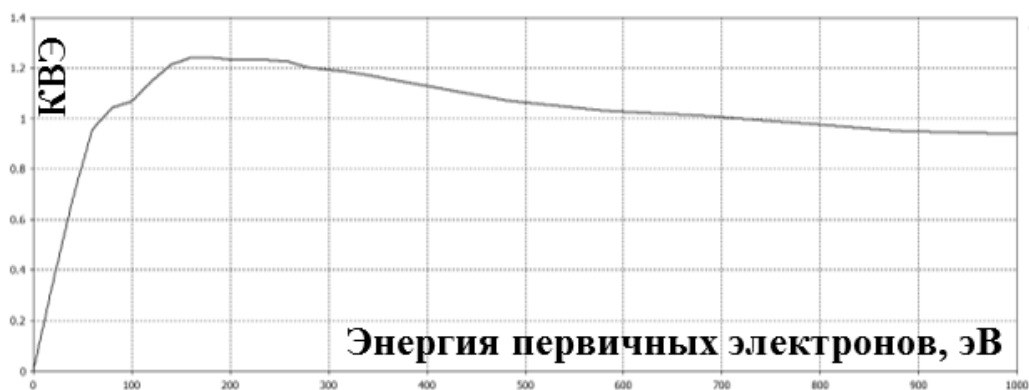


Рисунок 2.13. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии (SEY) меди бескислородной (МБ) от энергии первичных электронов.

Максимальный коэффициент вторичной эмиссии достигается при энергии первичных электронов порядка 150 эВ.

Напряжение электрического поля в плоском зазоре ячейки связи вблизи трубки дрейфа (рис. 2.11) определялось с помощью численного расчета в CST по формуле:

$$U_3 = \frac{E_0 T}{E_0 T_{CST}} * N * \alpha d * U_{3\text{ CST}}, \quad (2.14)$$

где $E_0 T$ – темп ускорения в МВ/м, $E_0 T_{CST}$ – темп ускорения, полученный численно в CST с учетом запасенной энергии $W_0=1$ Дж, $U_{3\text{ CST}}$ – напряжение в плоском зазоре ячейки связи:

$$U_{3\text{ CST}} = \int_{s_3} E_c ds_3, \quad (2.15)$$

где s_3 – длина зазора, E_c – напряженность электрического поля моды связи в центральной части зазора (рис. 2.11), полученная численным расчетом.

При численном моделировании ВЭРР отношение $E_0 T / (E_0 T)_{CST}$ использовалось как понижающий коэффициент для получения искомой величины напряженности поля ускоряющей моды и моды связи с учетом нормирования CST на $W_0=1$ Дж.

В рабочих режимах резонатора CDS PITZ напряжение ВЭРР в плоском зазоре ячейки связи для структуры CDS PITZ составило $U_3=332,85$ В при уровне ускоряющего поля $E_0 T=12$ МВ/м и $N=1$ и $U_3=5441,09$ В при $E_0 T=14$ МВ/м и $N=7$.

В условиях расчета K_v условно принималось равным 0,25 (исходя из максимального коэффициента вторичной эмиссии при энергии первичных электронов 150 эВ) и $\psi=0$, напряжение в зазоре, при котором возникает ВЭРР составляет $U=(1,1 - 2,0)$ кВ. По аналитической оценке, это свидетельствует о возможности развития ВЭРР в зазоре ячейки связи CDS PITZ на уровнях ускоряющего поля до $E_0 T=6$ МВ/м.

В структуре CDS для основной части интенсивного ЛУ, например ЛУ ИЯИ РАН, коэффициент затухания на период структуры αd также рассчитывался по формуле (2.12), где $I_b=50$ мА, $\beta=0,4313$, групповая скорость $\beta_g=0,055$, мощность потерь на ускоряющей моде $P_a=1,819*10^4$ Вт, добротность $Q_a=14700$, и составил $\alpha d=1,03*10^{-3}$. При расчете напряжения в плоском зазоре

в дальнейшем использовался коэффициент N от 1 до 40 в зависимости от удаления ячейки относительно точки ввода мощности.

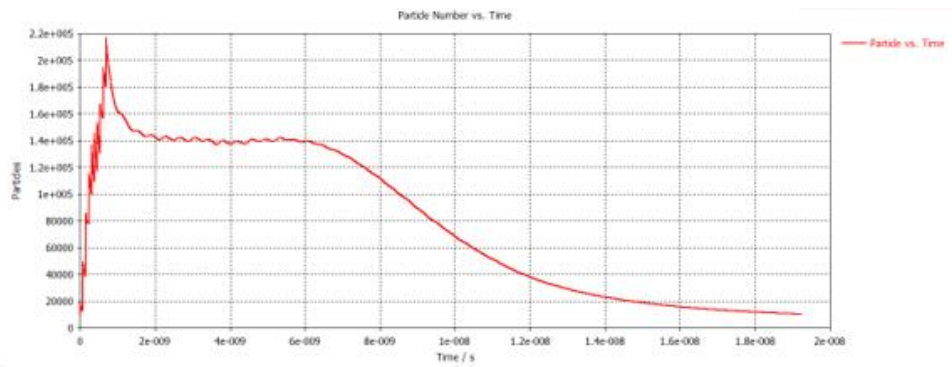
Напряжение в зазоре составляет $U_3=80,80$ В при $E_0T=2,0$ МВ/м и $N=1$ и $U_3=5730,00$ В при $E_0T=3,5$ МВ/м и $N=40$. В аналитическом приближении напряжение, необходимое для развития ВЭРР рассчитано по формуле (2.13). При $K_v=0,25$ и $\psi=0$, область напряжений, при которых возникает ВЭРР, составляет от $U=670$ В до $U=1100$ В. Таким образом, аналитическая оценка показывает, что развитие ВЭРР в резонаторе CDS ИЯИ РАН возможно при уровне ускоряющего напряжения 2 МВ/м и $N=12$, а также при $E_0T=2,5$ МВ/м и $N=10$, что соответствует рабочим уровням поля в резонаторе.

2.3.2. Калибровочные измерения развития ВЭРР в структуре CDS PITZ и численное моделирование ВЭРР в CDS.

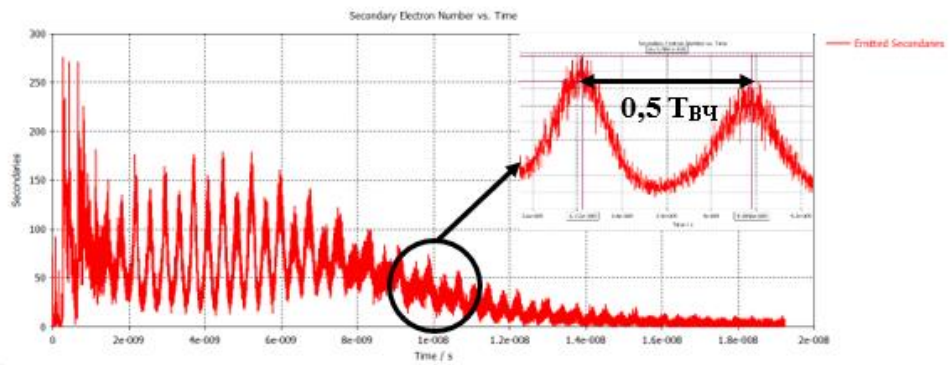
Ввод мощности в резонатор подразумевает наличие в структуре одновременно и ускоряющей моды, и моды связи. Поэтому в численном моделировании использовались ускоряющая моды и мода связи с соответствующими для исследуемого уровня E_0T коэффициентами. Для моделирования ВЭРР использовался модуль Particles-in-cells (PIC) CST studio [18, 43]. Источник начальных электронов располагался на всей внутренней поверхности структуры. Инжекция начальных электронов производилась в течение одного периода поля $T_{вч}$ в виде 10 равнозначных импульсов [44]. Время расчета составило $25 T_{вч}$. В модели использована зависимость КВЭ меди бескислородной (рис. 2.13).

Расчеты были проведены с использованием модели, состоящей из двух периодов (ячеек) структуры CDS. В случае резонатора-бустера PITZ моделирование проводилось при E_0T до 14 МВ/м и $N=1 - 7$.

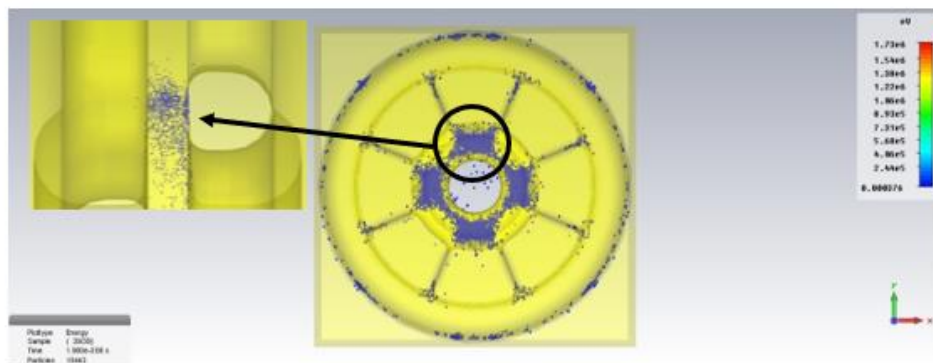
Общее число электронов в структуре снижается со временем расчета на всех исследованных уровнях E_0 . На рис. 2.14 приведены графики зависимости общего числа электронов и их расположение при $E_0T=4$ МВ/м и $N=7$.



а)



б)



в)

Рисунок 2.14. Результаты расчетов для двух периодов структуры CDS PITZ, $E_0T=4$ МВ/м, $N=7$: а) зависимость общего числа электронов от времени, б) зависимость числа вторичных электронов от времени, в) распределение электронов в структуре после 25 Твч

После 25 Твч электроны остаются в зазорах ячеек связи и имеют энергию, достаточную для развития ВЭРР. Временной промежуток между моментами максимумов вылета вторичных электронов составляет 0,5 Твч, что соответствует времени пролета при ВЭРР 1-го порядка. Однако, из-за

недостаточной величины КВЭ бескислородной меди роста общего числа электронов и количества вторичных электронов не происходит [45].

Согласно опыту эксплуатации резонатора-бустера CDS на ускорителе DESY PITZ и проведенным калибровочным измерениям, ВЭРР в ячейках структуры возникает при низком уровне входной мощности и соответствующем уровне E_0T от 2,0 МВ/м до 4,5 МВ/м, что подтверждается искаженной формой сигнала отраженной мощности с датчиков (рис. 2.10 пункт 4). Форма сигнала отраженной мощности при $E_0T=2,0$ МВ/м приведена на рис. 2.15.

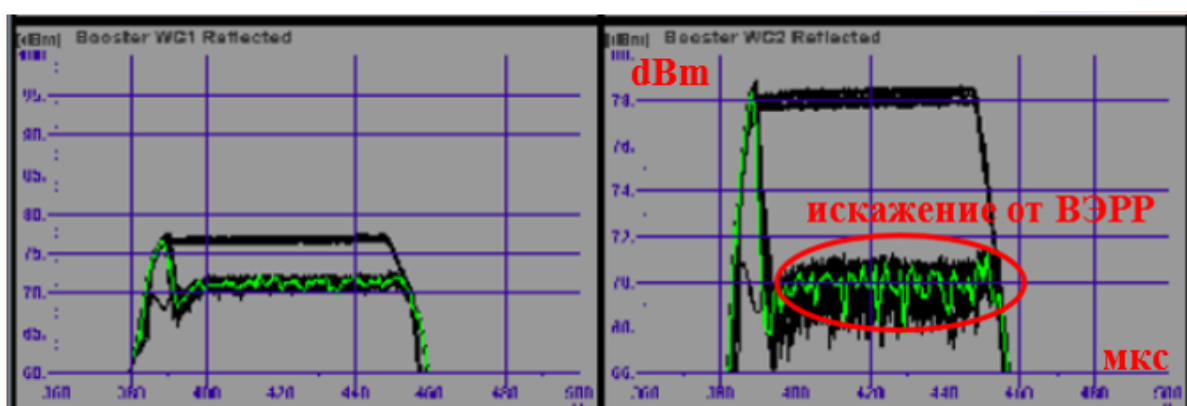


Рисунок 2.15. Форма сигналов отраженной мощности резонатора CDS PITZ при $E_0T=2,0$ МВ/м.

При этом на уровнях E_0T до 6 МВ/м с помощью датчиков-цилиндров Фарадея регистрируется увеличенная интенсивность темновых токов, как это показано на рис. 2.16 [46].

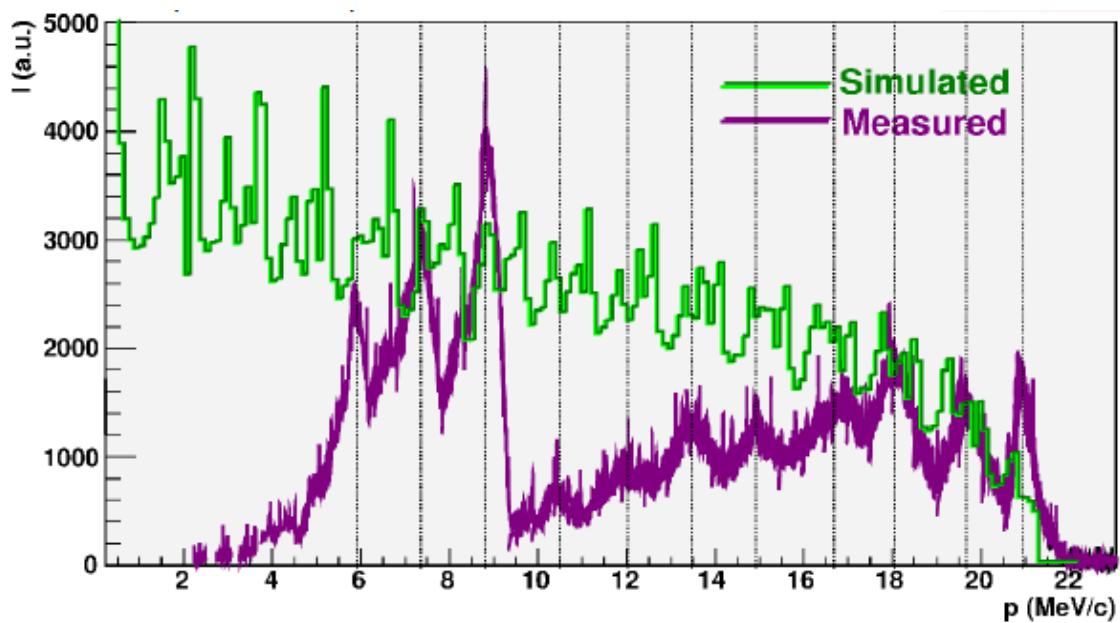
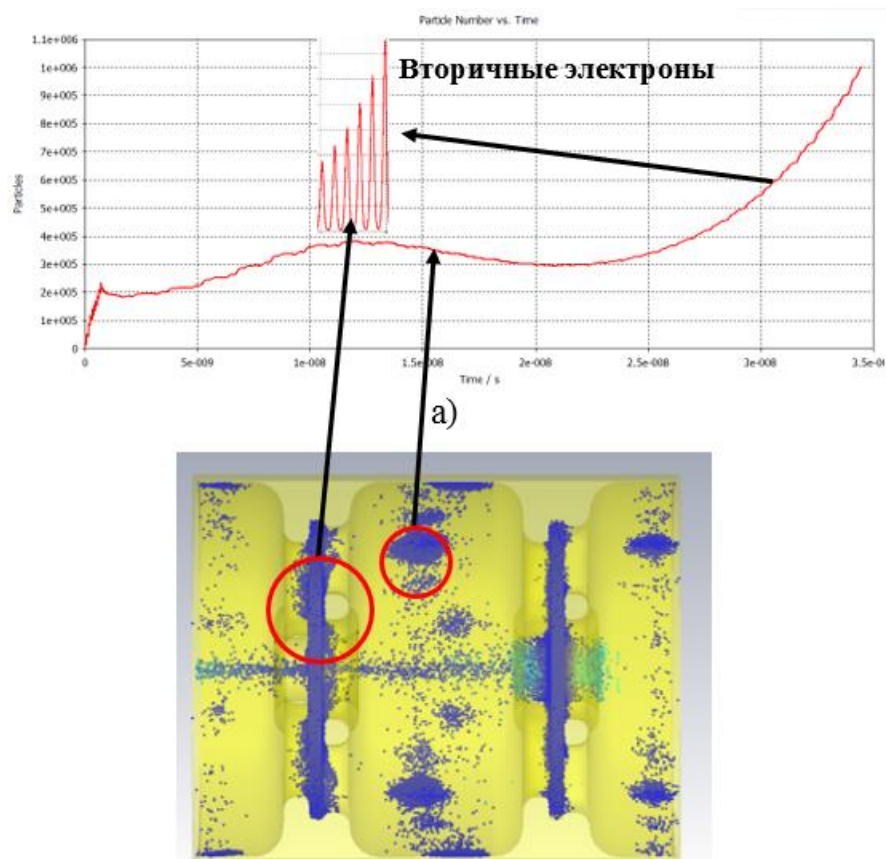


Рис. 2.16. Зависимость интенсивности темновых токов в резонаторе CDS PITZ от импульса электронов.

Исходя из этих данных выдвинуто предположение о наличии в ячейках резонатора с $N=4\div 7$ загрязнения, состоящего из гидрокарбонатной пленки, имеющей повышенный коэффициент вторичной эмиссии, что приводит к интенсивным темновым токам и развитию ВЭРР.

Проведено моделирование ВЭРР в структуре CDS PITZ с использованием увеличенного коэффициента вторичной эмиссии, имитирующего загрязнение поверхности веществом с высоким КВЭ, на уровне $E_0T=2,0$ МВ/м – 4,5 МВ/м. Для этого значения КВЭ меди бескислородной (рис. 2.13) были умножены на коэффициент 1,5. Результаты моделирования в виде графика зависимости числа электронов от времени и их распределение в структуре на уровне ускоряющего поля $E_0T=4,5$ МВ/м и $N=7$ приведены на рис. 2.17.



б)

Рисунок 2.17. Результаты моделирования ВЭРР в двух периодах структуры CDS PITZ с увеличенным КВЭ, $E_0=4,5$ МВ/м, $N=7$: а) ависимость общего числа электронов от времени, распределение электронов после $25 T_{Вч}$.

В результате моделирования было установлено, что при увеличенном коэффициенте вторичной эмиссии наблюдается развитие ВЭРР на уровнях ускоряющего поля $E_0T=2,0 - 4,5$ МВ/м и $N=4 - 7$, соответствующих результатам калибровочных измерений на резонаторе CDS PITZ. После $20 T_{Вч}$ происходит насыщение электронами плоского зазора ячейки связи и вылет вторичных электронов на ось ускорения.

Численное моделирование ВЭРР в структуре CDS для основной части интенсивного ЛУ, например ЛУ ИЯИ РАН, проводилось для рабочих уровней $E_0T=2,0 - 3,5$ МВ/м и $N=1 - 40$ в соответствии с максимальным количеством периодов структуры в секциях первого резонатора основной части. Зависимость КВЭ поверхности структуры соответствует меди бескислородной (рис. 2.13).

Моделирование на уровне ускоряющего поля $E_0T=2,0$ МВ/м показало стабильный рост числа вторичных частиц в ячейках с $N=10 - 15$ и при $E_0T=2,5$ МВ/м в ячейках с $N=8 - 12$. На рис. 2.18 показана зависимость роста числа электронов в структуре от времени расчета и распределение электронов после $40 T_{ВЧ}$ при $E_0T=2,5$ МВ/м и $N=10$.

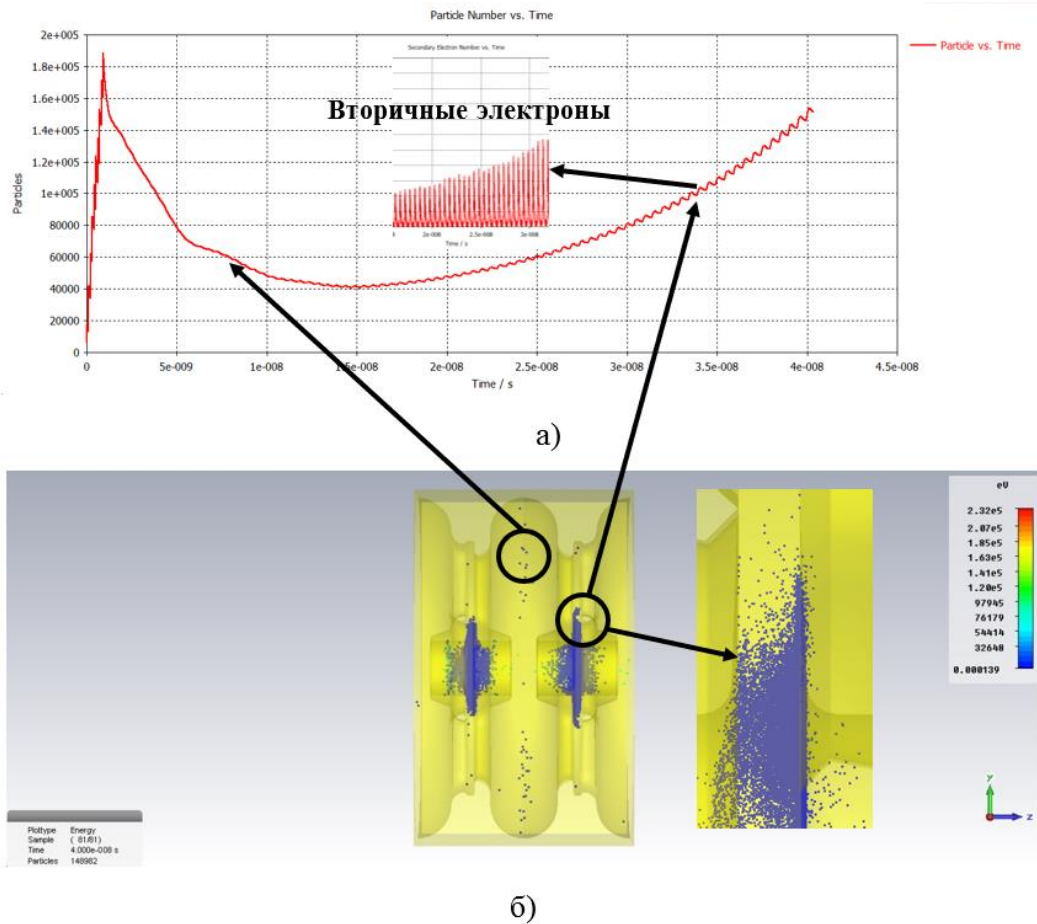


Рисунок 2.18. Результаты моделирования ВЭРР в двух периодах структуры CDS для ИЯИ РАН при $E_0T=2,5$ МВ/м и $N=10$: а) зависимость общего числа электронов от времени, б) распределение электронов после $40 T_{ВЧ}$.

Результаты расчетов показывают возможность развития ВЭРР в структуре CDS для ЛУ ИЯИ РАН на рабочем уровне ускоряющего поля при использовании меди бескислородной для изготовления ячеек секций [41, 43]. Как и в случае структуры CDS PITZ после $20 T_{ВЧ}$ происходит вылет вторичных электронов на ось ускорения.

2.3.3. Методы подавления ВЭРР в ячейках связи CDS.

Как известно [36], возникновение ВЭРР связано с выполнением одновременно двух условий: коэффициент вторичной эмиссии материала больше 1 в широком диапазоне энергии первичных электронов (рис. 2.13) и время пролета электронов составляет целое число полупериодов ВЧ поля ($0,5 T_{ВЧ}$ для ВЭРР 1-го порядка) (резонансное движение). Выполнение второго условия зависит как от напряжения электрического поля в зазоре, так и от расстояния между плоскостями (длина пробега). Подавление развития ВЭРР может быть достигнуто путем нарушения в структуре одного из перечисленных условий.

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 [36]. Оценка величины знакопеременного смещения частоты выполнена с помощью метода эквивалентных схем. Необходимая для увеличения напряжения в зазоре ячейки связи величина разности частот соседних ускоряющих ячеек составляет:

$$\Delta f_a = \frac{k \cdot k_c \cdot f_0}{4}, \quad (2.16)$$

где k – коэффициент умножения напряжения в зазоре ячейки связи, f_0 – рабочая частота структуры. В случае первого резонатора основной части для увеличения напряжения в зазоре ячейки связи выше порога ВЭРР 1,9 кВ необходимая величина расстройки частот соседних ускоряющих ячеек составляет $\Delta f_a = \pm 800$ кГц при $k=0,25$, соответствующему $E_0 T = 2,5$ МВ/м.

Величина необходимой расстройки также может быть получена также путем численного расчета в CST [18, 45]. Для этого в соседних ускоряющих ячейках используется разный радиус r_{ca} (рис. 2.1.). Полученные таким образом значения частот соседних ускоряющих ячеек и величина Δf_a рассчитываются отдельно. Напряжение в зазоре ячейки связи рассчитывается по формулам (2.14) и (2.15). Полученная таким способом необходимая

величина знакопеременной расстройки частот для соседних ячеек составила $\Delta f_a = \pm 1,2$ МГц. Введение такой расстройки и ее контроль после изготовления ячеек необходим для секций 1 и 4, наиболее удаленных от узла ввода мощности.

Для сохранения унифицированности геометрических параметров структуры в секциях и упрощения настройки резонатора до пайки рассмотрена методика подавления ВЭРР, позволяющая нарушить условие резонансного движения электронов путем изменения геометрии плоского зазора ячейки связи (рис. 2.11) – увеличивается расстояние δl между нижними гранями плоскостей, образующих зазор, как показано на рис. 2.19. Максимальная величина δl ограничивается необходимостью размещения в трубках дрейфа каналов охлаждения.

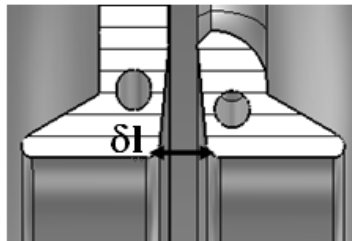


Рисунок 2.19. Изменение геометрии плоского зазора ячеек связи CDS.

Уравнение движения электрона в однородном электрическом ВЧ поле между плоскостями зазора и его решение имеют вид:

$$\dot{x}(t) = \dot{x}_0 + \frac{eE}{m\omega} [\cos \psi_0 - \cos(\omega t + \psi_0)] \quad (2.17)$$

$$x(t) = \dot{x}_0 t + \frac{eE}{m\omega^2} [\sin \psi_0 + \omega t \cos \psi_0 - \sin(\omega t + \psi_0)] \quad , \quad (2.18)$$

где E – напряженность электрического поля в зазоре, ω - частота поля, ψ_0 – фаза столкновения электрона с плоскостью зазора. Из формул 2.17 и 2.18 при заданной длине пробега электрона и напряженности поля можно получить фазу ВЧ-поля, при которой произойдет столкновение электрона с противоположной плоскостью.

Для различных величин δl построены диаграммы зависимости фазы ψ_0 ВЧ-поля момента столкновения электрона с плоскостью от времени пролета, нормированного на период ВЧ поля $T_{вч}$. Диаграммы построены для рабочего

уровня ускоряющего поля $E_0T=2,5$ МВ/м, начальной энергии электрона 10 эВ и изображены на рис. 2.20.

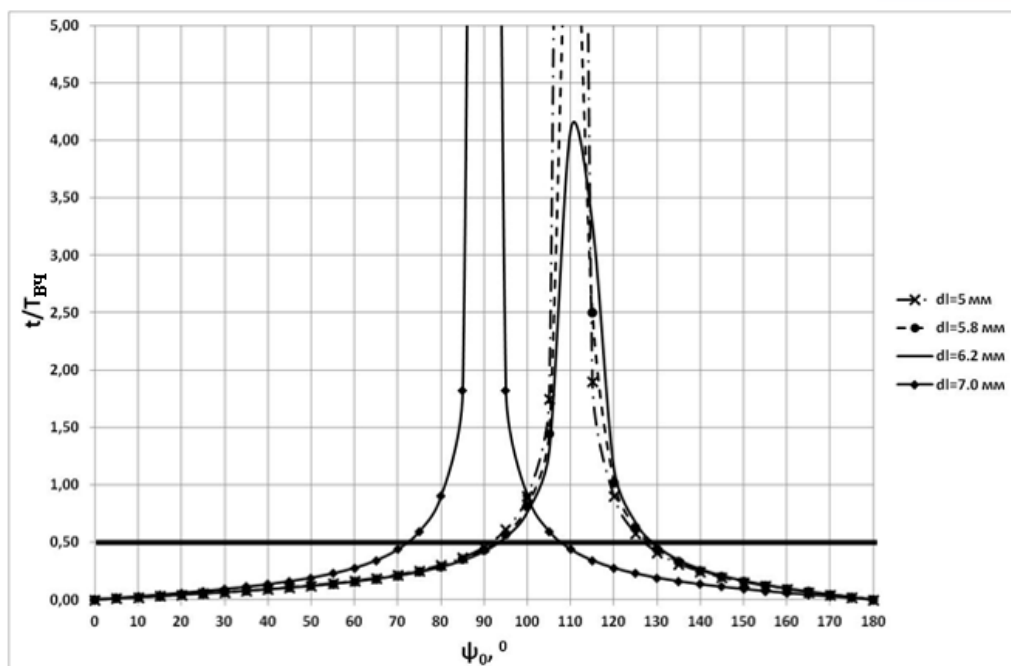


Рисунок 2.20. Зависимости фазы столкновения электрона с плоскостью от нормированного времени пролета.

Времени пролета электронов, соответствующему $0,5 T_{вч}$, удовлетворяют фазы столкновения 70° , 90° , 110° и 130° .

При увеличении $\delta l \psi_0$ смещается до величин более 130° , что на рис. 2.20 соответствует времени пролета менее $0,5 T_{вч}$. При этом число электронов в структуре и зазоре ячейки связи сокращается, что подтверждается результатами численного моделирования в виде зависимости числа вторичных электронов от времени расчета, приведенной на рис. 2.21.

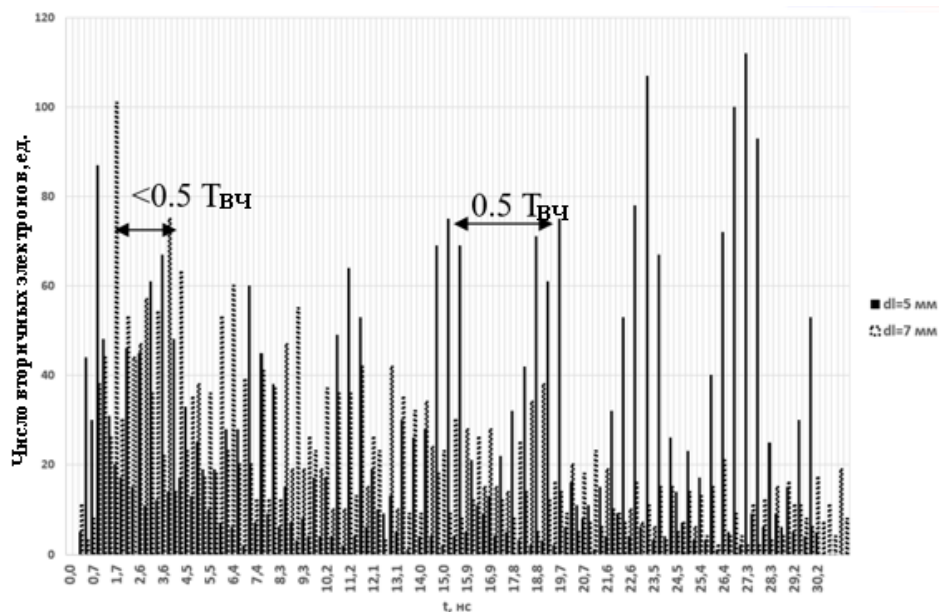


Рисунок 2.21. Зависимость числа вторичных электронов от времени расчета.

При начальном значении $\delta l=5$ мм расстояние между моментами появления вторичных электронов (столкновения с плоскостью) составляет $0,5 T_{вч}$. При увеличении δl до предельной величины 7 мм расстояние между моментами появления вторичных электронов по фазе уменьшается. За счет этого обеспечивается нарушение резонансного условия движения электронов в зазоре ячейки связи и происходит подавление возникновения ВЭРР.

Основными преимуществами этого метода подавления ВЭРР являются унификация геометрических параметров ячеек, составляющих секции резонатора, а также отсутствие необходимости настройки ускоряющих ячеек с учетом знакопеременной расстройки и как следствие упрощение настройки секций до пайки и контроля качества их изготовления.

Оба рассмотренных метода подавления ВЭРР были проверены численным методом при величине коэффициента вторичной эмиссии (КВЭ) соответствующей меди, обработанной при температуре 850 °С. Такая температура предполагается при пайке секций первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН. На рис. 2.22 приведены сравнительные диаграммы зависимости КВЭ от энергии первичных электронов для меди и других материалов [42].

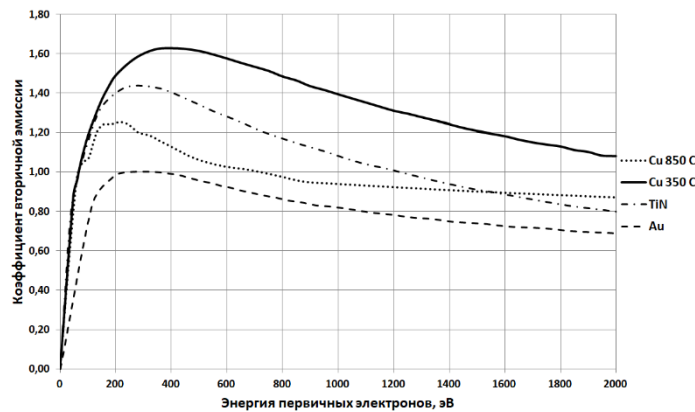


Рисунок 2.22. Зависимость КВЭ от энергии первичного электрона меди бескислородной при разных температурах обработки, покрытия из TiN и золота.

При использовании КВЭ, соответствующего меди при 350 °С, методика, направленная на нарушение условия резонансного движения, теряет свою эффективность. В мировой практике широко распространено использование покрытий из TiN для снижения КВЭ. Однако, как видно из рис. 2.23, в случае соблюдения технологии изготовления первого резонатора основной части, КВЭ меди не превысит такового для TiN покрытия. В данном случае для существенного снижения КВЭ возможно нанесение покрытия из золота. Однако это приведет к существенному удорожанию изготовления ячеек секций резонатора.

2.4. Методики настройки структуры CDS и контроля качества изготовления ячеек.

2.4.1. Методика настройки ячеек секций.

После изготовления ячеек секций в них ожидаются отклонения частот ускоряющей моды и моды связи, которые зависят от выбранных допусков изготовления. При избыточном допуске изготовления 30 мкм они составляют соответственно $\delta f_a = \pm 3\sigma f_a = \pm 0,675$ МГц и $\delta f_c = \pm 3\sigma f_c = \pm 5,414$ МГц [47, 48].

Допустимая величина полосы запираения по секции резонатора принимается равной 400 кГц. При проведении измерений в ячейках требуется контроль средней величины полосы запираения для полной секции резонатора.

Для подавления развития ВЭРР в структуру вводится знакопеременное смещение частот соседних ускоряющих ячеек [47].

Для настройки частоты ускоряющей моды в структуру вводится дополнительное кольцо трапецевидального сечения, изображенное на рис. 2.23.

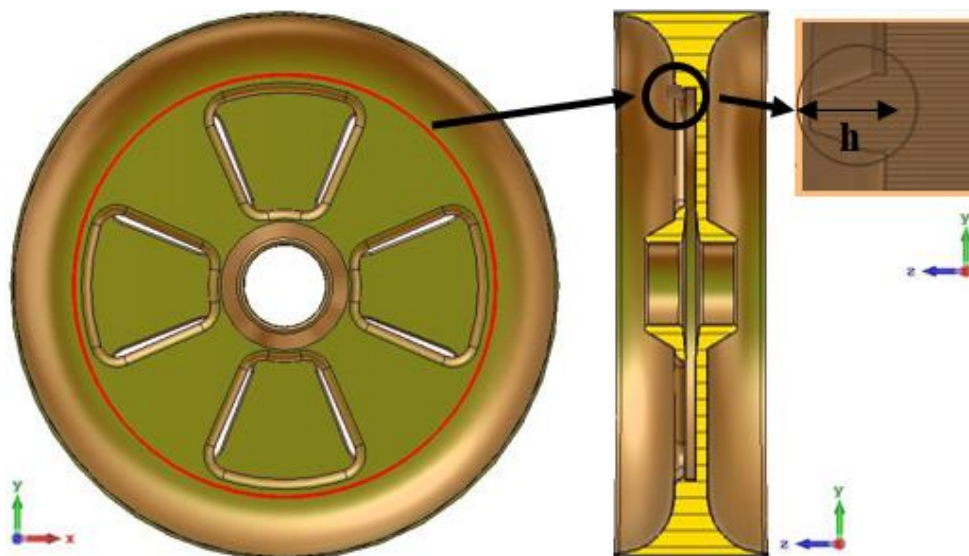


Рисунок 2.23. Кольцо для настройки частоты ускоряющей моды CDS.

Коэффициент влияния высоты настроечного кольца h на частоту составляет $k_{fa} = 1,16$ МГц/мм. Для обеспечения знакопеременной расстройки частот соседних ускоряющих ячеек, частота рабочей моды нечетных ускоряющих ячеек настраиваются на 989,80 МГц при $h=5,40$ мм, четных ускоряющих ячеек – на 992,20 МГц при $h=5,55$ мм, обеспечивая необходимую расстройку в 1,20 МГц и перекрывая δf_a . При этом средняя частота ускоряющей моды остается на уровне 991,00 МГц [49].

Настройка частоты моды связи в ячейках возможна только с помощью увеличения радиуса ячейки связи r_{sc} (рис. 2.1). Рассчитанное значение коэффициента влияния r_{sc} на частоту составляет $k_{fc} = 14,27$ МГц/мм. С учетом ожидаемого максимального отклонения частоты моды связи начальный радиус ячейки связи r_{sc} выбирается так, чтобы частота моды связи составила 997,000 МГц для обеспечения запаса для настройки, превышающего δf_c .

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 [49].

Введение знакопеременной расстройки может привести к увеличению дисперсии распределения ускоряющего поля по секции. В связи с этим требуется измерение распределения амплитуды ускоряющего поля по оси секции.

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 $E_z^{n+1}/E_z^n \ll 1\%$. Распределение амплитуды E_z вдоль оси ускорения в тестовой секции показано на рис. 2.24.

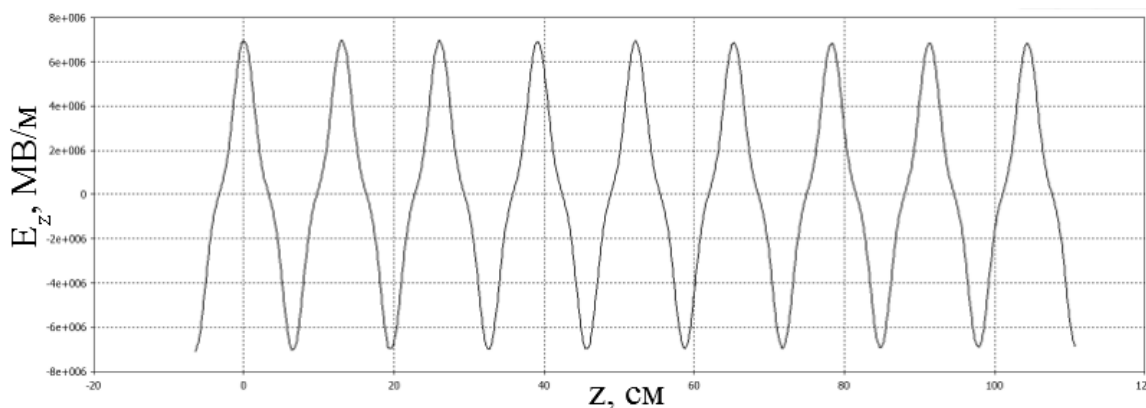


Рисунок 2.24. Распределение амплитуды E_z вдоль тестовой секции CDS.

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.

2.4.2. Методика измерений в полной сборке секции.

На первом этапе измерений предполагается нахождение величин средней частоты ускоряющей моды, ширины полосы запираения и средней частоты моды связи в полной сборке секции резонатора, состоящей из 36 полу

ячеек в случае самой короткой секции резонатора и 42 полу ячеек в случае самой длинной [47].

Для определения полосы запираения можно воспользоваться линейным определением, связывающим две моды, ближайšie к рабочей на ветвях дисперсионной характеристики (ДХ):

$$\delta f = \Delta F_n = f_n^t + f_n^b - 2f_a, \quad (2.19)$$

где $f_n^{t,b}$ – частоты моды на верхней и нижней ветвях дисперсионной характеристики, и f_a – средняя частота рабочей моды. Полученная таким образом ширина полосы запираения для секции CDS со знакопеременной расстройкой составляет $\delta f = 4,578$ МГц с относительной ошибкой $(\delta f - \delta f_{\text{calc}})/\delta f = 13,5\%$. Для увеличения точности определения δf перейдем к разложению в ряд по $\xi = \theta_0 - \theta$ для линейной зоны ДХ [50]:

$$f_0^{t,b}(\xi) = f_a + \frac{\delta f}{2} \pm \frac{\beta_g \xi}{\pi \beta} + \frac{\partial^2 f^t}{\partial \xi^2} \frac{\xi^2}{2} \pm \frac{\partial^3 f^t}{\partial \xi^3} \frac{\xi^3}{6} + \frac{\partial^4 f^t}{\partial \xi^4} \frac{\xi^4}{24} \pm \dots + \dots = \frac{\delta f}{2} + f_0^{t,b}(\xi), \quad (2.20)$$

где β_g – групповая скорость, β – фазовая скорость.

Если в этом разложении учесть члены до 3 порядка по ξ , то δf определяется по двум видам колебаний, ближайшим к рабочему на ДХ [50]:

$$\delta f = \frac{m^2 \Delta F_n - n^2 \Delta F_m}{m^2 - n^2}, \quad (2.21)$$

где $n, m = 1, 2$ – номера колебаний, ближайших к рабочему, $\Delta F_{n,m}$ – разность частот колебаний на верхней и нижней ветке дисперсионной характеристики, рассчитанная по (2.19). Рассчитанная таким образом ширина полосы запираения составляет $\delta f = 4,162$ МГц для CDS с параметрами первой секции резонатора, относительная ошибка составляет $(\delta f - \delta f_{\text{calc}})/\delta f = 3,2\%$. Для дальнейшего увеличения точности определения δf можно учесть в (2.15) члены до 5 порядка по ξ . Тогда δf определяется по трем видам колебаний, ближайшим к рабочему на ДХ [50]:

$$\delta f = \frac{\Delta F_n m^2 j^2 (j^2 - m^2) + \Delta F_m n^2 j^2 (n^2 - j^2) + \Delta F_j n^2 m^2 (m^2 - n^2)}{n^2 m^2 (m^2 - n^2) + m^2 j^2 (j^2 - m^2) + n^2 j^2 (n^2 - j^2)}, \quad (2.22)$$

где $n, m, j = 1, 2, 3$ – номера колебаний, ближайших к рабочему, $\Delta F_{n,m,j}$ – разность частот колебаний на верхней и нижней ветке дисперсионной

характеристики по (2.19). Рассчитанная по этой формуле ширина полосы запираания составляет $\delta f = 4,041$ МГц для CDS с геометрическими параметрами первой секции, относительная ошибка $(\delta f - \delta f_{\text{calc}}) / \delta f = 0,2\%$.

Таким образом, средняя частота моды связи по секции может быть определена как:

$$\bar{f}_c = \bar{f}_a + \delta f, \quad (2.23)$$

Средняя частота моды связи по тестовой секции, определенная через (2.22) и (2.23), составила $f_c = 997,092$ МГц. Коэффициент связи по тестовой секции составил $k_c = 15,6 \%$.

2.4.3. Методика измерений в минимальных сборках.

Для контроля полученных величин частот ускоряющей моды и моды связи отдельных полу ячеек необходимо провести серию измерений собственных частот в минимальных сборках (МС), состоящих из двух полу ячеек, закороченных проводящими пластинами и схематично изображенной на рис. 2.25. Измерения в МС могут проводиться либо для измерения частот одинаковых полу ячеек, либо для измерения средних частот такой сборки [49].

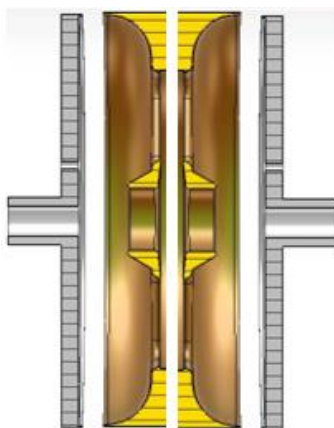


Рисунок 2.25. Минимальная сборка структуры CDS

В МС возможно измерение частот трех колебаний – рабочей π -моды и двух 0 -мод.

Определение частоты моды связи в МС возможно с помощью формул, получаемых из условия сохранения сдвига частот при неизменном коэффициенте связи:

$$\delta f_c^\pi + \delta f_a^\pi = \delta f_0^{(1)} + \delta f_0^{(2)} \quad (2.24)$$

$$\delta f_c^\pi = \delta f_0^{(1)} + \delta f_0^{(2)} - \delta f_a^\pi \quad (2.25)$$

$$f_c^\pi = \overline{f_c^\pi} + \delta f_c^\pi. \quad (2.26)$$

Частота моды связи в МС определяется с помощью расчета ее отклонения от средней величины по секции, определенной в п.2.4.2.

Для определения частот ускоряющей моды в каждой полу ячейке, которое необходимо для введения знакопеременной расстройки соседних ускоряющих ячеек, проводится серия измерений с использованием трех полу ячеек. Обозначим их номера как $n=1, 2, 3$. В рамках минимальных сборок из этих полу ячеек могут быть измерены величины средней частоты ускоряющей моды сборки $f_a^{(1,2)}$, $f_a^{(1,3)}$, $f_a^{(2,3)}$. Имея эти значения частот, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{f_a^{(1)} + f_a^{(2)}}{2} = f_a^{(1,2)} \\ \frac{f_a^{(1)} + f_a^{(3)}}{2} = f_a^{(1,3)} \\ \frac{f_a^{(2)} + f_a^{(3)}}{2} = f_a^{(2,3)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_a^{(1)} = f_a^{(1,2)} - f_a^{(2,3)} + f_a^{(1,3)} \\ f_a^{(2)} = f_a^{(1,2)} - f_a^{(1,3)} + f_a^{(2,3)} \\ f_a^{(3)} = f_a^{(1,3)} - f_a^{(1,2)} + f_a^{(2,3)} \end{cases}, \quad (2.27)$$

где $f_a^{(n)}$ – частота ускоряющей моды в соответствующей полу ячейке, $f_a^{(n,m)}$ – измеренная средняя частота ускоряющей моды в соответствующей МС. Таким образом, решая систему (2.27) мы получим искомые значения частот в каждой из полу ячеек $f_a^{(1)}$, $f_a^{(2)}$, $f_a^{(3)}$ [49].

В дальнейшем найденное значение частоты ускоряющей моды для первой полу ячейки $f_a^{(1)}$ можно использовать как опорное для определения частот остальных полу ячеек секции, составляя с ними МС.

Для проверки методики было проведено численное моделирование МС со значениями частот f_a и f_c , необходимыми для настройки секции (п. 2.4.1.), и МС с дополнительным смещением частоты одной полу ячейки.

Частота ускоряющей моды в МС без смещения составила $f_a=993,670$ МГц. Для определения f_c использовалась полная сборка секции из 18 ячеек,

содержащая тестовую МС, в которой по (2.24), (2.25), (2.26) была рассчитана средняя частота моды связи в МС $\bar{f}_c=997,046$ МГц.

Для МС со смещением использовалось возмущение поля с помощью идеально проводящего шарика. Его радиус выбирался таким образом, чтобы частота f_a МС соответствовала сдвигу частоты полу ячейки на $\delta f=3\sigma_{fa}=0,675$ МГц, и составил $r_{ш}=6,20$ мм. Расположение шарика в тестовой полу ячейке показано на рис. 2.26 [49].

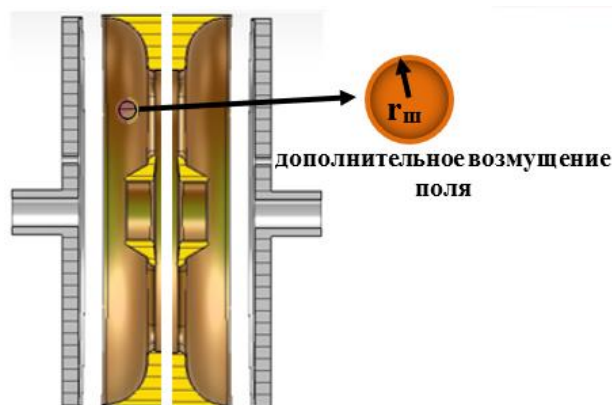


Рисунок 2.26. МС с дополнительным возмещением поля в полу ячейке.

Частота рабочей моды в МС со смещением составляет $f_a = 992,670$ МГц. Соответственно рассчитанная по формуле (2.27) частота ускоряющей моды полу ячейки с возмущением составляет $f_{a_cst}=992,333$ МГц и $\delta f_{a_cst}=\pm 2*0,337$ МГц= $\pm 0,674$ МГц, что соответствует заложенной величине $\delta f_a=\pm 3\sigma_{fa}=\pm 0,675$ МГц в пределах 1%.

При расположении шарика вблизи окна связи, как это показано на рис. 2.27, частота моды связи также смещается. Численно полученное значение смещения частоты моды связи в МС составило $\delta f_{c_cst}=0,229$ МГц, соответственно различие между численно рассчитанным значением частоты моды связи f_{c_cst} и значением f_c , полученным из формул (2,24), (2,25), (2,26), составляет $\delta f_{c_cst}/\delta f_c \ll 1\%$.

Таким образом производится определение частот ускоряющей моды и моды связи в полу ячейках, составляющих секцию резонатора. С известными коэффициентами влияния для настроенного кольца и радиуса ячейки связи, полу ячейки настраиваются на частоту моды связи 991 МГц, нечетные полу

ячейки настраиваются на частоту ускоряющей моды 989,800 МГц, четные – 992,200 МГц. При этом обеспечивается средняя частота ускоряющей моды в секции, близкая к 991 МГц и полоса запираения, не превышающая 400 кГц.

Выводы к Главе 2.

1. Проведена оптимизация электродинамических характеристик структуры CDS для начала основной части интенсивного ЛУ. Найдено сочетание геометрических параметров структуры, позволяющее обеспечить достаточное полное шунтовое сопротивление резонатора при допустимой величине максимальной напряженности поля. Учитывая малое изменение скорости частиц в секциях резонатора предложено унифицировать размеры ячеек секций для снижения затрат на изготовление резонатора.

2. Предложена и программно реализована на основе пакета ANSYS методика оценки влияния изменения геометрических размеров на частотные характеристики структуры. Преимуществом данной методики является необходимость проведения только трех численных расчетов собственных частот структуры. С помощью предложенной методики обоснованы допуски изготовления резонатора CDS. Эти допуски легко реализуются на современном металлообрабатывающем оборудовании с цифровым управлением.

3. Для рабочего режима резонатора основной части интенсивного ЛУ ионов водорода показана вероятность развития ВЭРР в секциях CDS. Точность методов расчета подтверждается результатами калибровочных измерений, проведенных на действующем резонаторе CDS ускорителя DESY PITZ. Для подавления развития ВЭРР предложена апробированная методика, предполагающая введение знакопеременной расстройки соседних ускоряющих ячеек и методика, основанная на нарушении резонансного условия движения электронов.

4. Описана методика настройки секций резонатора CDS до пайки и контроля ее частотных характеристик. Особенностью данной методики является то, что она позволяет настраивать как частоты полу ячеек и секции в

целом, так и знакопеременное смещение частот соседних ускоряющих ячеек для подавления ВЭРР.

Глава 3. Объединение секций CDS в резонатор.

3.1. Методика моделирования неоднородных систем, связанных щелями, на основе многомодового приближения.

Резонаторы на основе нормально проводящих структур в основных частях сильноточных ЛУ протонов и ионов состоят из секций, соединенных мостовыми устройствами. В частности, первый резонатор основной части ЛУ ИЯИ РАН состоит из четырех секций (18, 20, 21, 19 периодов структуры соответственно) и трех мостовых устройств, выполненных из стандартного волновода 220x104 мм [51]. Общая длина резонатора составляет более 13,5 метров, как показано на рис. 3.1.

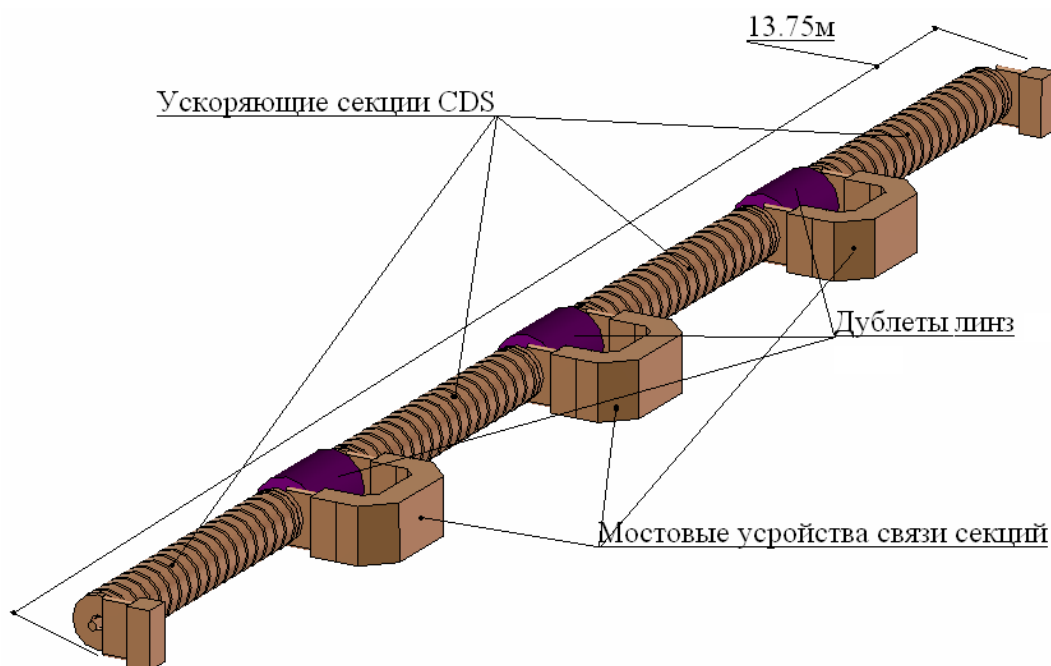


Рисунок 3.1. Резонатор на основе секций CDS.

ВЧ питание резонатора осуществляется одним клистроном КИУ-40 с выходной импульсной мощностью до 5 МВт. Питающий тракт подключается к центральному мостовому устройству. Для настройки резонатора в целом его необходимо рассматривать как единую связанную неоднородную систему [52].

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

Для моделирования резонатора как единой системы из секций и мостовых устройств использовалась методика на основе многомодового приближения, оперирующая интегральными характеристиками элементов системы – собственными частотами и величинами напряженности магнитного поля секций и мостовых устройств на щели связи [53]. Данная методика является обобщением методики одномодового приближения, изложенной в работе В.Е. Калюжного [54]. Особенностью методики является возможность использования полученных прямым численным моделированием характеристик элементов неоднородной связанной системы, что позволяет полностью учитывать детали их конструкции.

Распределение поля в секции с щелью связи представляется как сумма полей собственных мод с частотами ω_n^c :

$$\bar{H}^c = \sum_n h_n^c \bar{H}_n^c, \mu_0 \int_{V_c} \bar{H}_n^c \bar{H}_n^{c*} dV = 2W_0. \quad (3.1)$$

Магнитное поле в мостовом устройстве представляется аналогично:

$$\bar{H}^b = \sum_k h_k^b \bar{H}_k^b, \mu_0 \int_{V_b} \bar{H}_k^b \bar{H}_k^{b*} dV = 2W_0, \quad (3.2)$$

где h_n^b и h_n^c – амплитудные коэффициенты, W_0 – энергия, запасенная в колебаниях.

Возбуждение магнитного поля в секции и мостовом устройстве тангенциальной составляющей электрического поля щели представляется как:

$$h_n^c = \frac{j\omega \int_{S^s} [\bar{E}^s \bar{H}_n^{c*}] d\bar{S}}{2W_0(\omega^2 - \omega_n^{c2})} \quad (3.3.1)$$

$$h_k^b = \frac{j\omega \int_{S^s} [\bar{E}^s \bar{H}_k^{b*}] d\bar{S}}{2W_0(\omega^2 - \omega_k^{b2})}, \quad (3.3.2)$$

где S^s – площадь щели. При этом поле на радиусе щели в мостовом устройстве и секции запишем как:

$$H^c(r_s) = \sum_n \frac{j\omega H_n^c(r_s) \int_{S_s} [\bar{E}^s \bar{H}_n^{c*}] dS}{\mu_0 \int_{V_c} \bar{H}_n^c dV (\omega^2 - \omega_n^{c2})} \quad (3.4.1)$$

$$H^b(r_s) = \sum_k \frac{j\omega H_k^b(r_s) \int_{S_s} [\bar{E}^s \bar{H}_k^{b*}] dS}{\mu_0 \int_{V_b} \bar{H}_k^b \bar{H}_k^{b*} dV (\omega^2 - \omega_k^{b2})}. \quad (3.4.2)$$

Щель с геометрическими размерами l_s, h_s, t_s представляется как отрезок волновода в режиме отсечки на первом колебании ТЕ. Поле в щели также можно расписать как сумму собственных мод:

$$\bar{E}^s = \sum_m e_m^s \bar{E}_m^s, \quad \varepsilon_0 \int_{V_s} \bar{E}_m^s \bar{E}_m^{s*} dV = 2W_0. \quad (3.5)$$

Возбуждение электрического поля в щели тангенциальными составляющими магнитного поля в мостовом устройстве и секции:

$$e^s = \frac{-j\omega (\int_{S_s} [\bar{E}^s \bar{H}^{b*}] d\bar{S} + \int_{S_s} [\bar{E}^s \bar{H}^{c*}] d\bar{S})}{\varepsilon_0 \int_{V_s} \bar{E}_m^s \bar{E}_m^{s*} dV (\omega^2 - \omega_s^2)}. \quad (3.6)$$

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 ТЕ. Для нее распределение электрического поля можно записать как:

$$\bar{E}^s = E^s \sin\left(\frac{\pi x}{l_s}\right) \bar{y}_0, \quad x = x(l_s), \quad (3.7)$$

где $x=x(l_s)$ – координата вдоль длины щели. Тогда интеграл возбуждения поля в щели тангенциальной составляющей магнитного поля в секции:

$$\int_{S_s} [\bar{E}^s \bar{H}^{c*}] d\bar{S} = E^s H^c(r_s) \frac{2h_s l_s}{\pi}. \quad (3.8)$$

С учетом нормализации запасенной энергии $2W_0 = \frac{\varepsilon_0 E^s{}^2 l_s h_s t_s}{2}$ получаем электрическое поле в щели:

$$\bar{E}^s = \frac{-4j\omega (H^b(r_s) + H^c(r_s))}{\pi \varepsilon_0 t_s (\omega^2 - \omega_s^2)} \sin\left(\frac{\pi x}{l_s}\right) \bar{y}_0. \quad (3.9)$$

Подставляя (3.9) в (3.3) с учетом (3.4), получаем систему для h^c и h^b :

$$\begin{cases} h_n^c \left(\frac{\omega^2 - \omega_n^{c2}}{A_s \omega^2} - H_n^{c2} |S^s \right) - (H_n^c(r_s) \sum_{i \neq n} h_i^b H_i^b(r_s) |S^s + H_n^c(r_s) \sum_{i \neq n} h_i^c H_i^c(r_s) |S^s) = 0 \\ h_m^b \left(\frac{\omega^2 - \omega_m^{b2}}{A_s \omega^2} - H_m^{b2} |S^s \right) - (H_m^b(r_s) \sum_{i \neq m} h_i^b H_i^b(r_s) |S^s + H_m^b(r_s) \sum_{i \neq m} h_i^c H_i^c(r_s) |S^s) = 0 \end{cases}, \quad (3.10)$$

$$\text{где } A_s = -\frac{4l_s h_s}{\pi^2 \varepsilon_0 t_s W_0 (\omega^2 - \omega_s^2)}.$$

Для упрощения системы до задачи на собственные значения введем коэффициент связи между i -й и j -й модами в мостовом устройстве и секции:

$$\gamma_{(b,c)}^{(i,j)} = -A_s H_i^b(r_s) H_j^c(r_s) |S^s, \quad (3.11)$$

и коэффициент связи между i -й и j -й модами внутри мостового устройства и внутри секции:

$$\gamma_{(b,b)}^{(i,j)} = -A_s H_i^b(r_s) H_j^b(r_s) |S^s \quad (3.12)$$

$$\gamma_{(c,c)}^{(k,l)} = -A_s H_k^c(r_s) H_l^c(r_s) |S^s. \quad (3.13)$$

Тогда систему можно переписать в виде:

$$\begin{cases} h_n^c \frac{(\omega^2 + \gamma_{(c,c)}^{(n,n)}) \omega^2 - \omega_n^{c2}}{\omega^2} + \sum_{i \neq n} \gamma_{(b,c)}^{(n,i)} h_i^b + \sum_{i \neq n} \gamma_{(c,c)}^{(n,i)} h_i^c = 0 \\ h_m^b \frac{(\omega^2 + \gamma_{(b,b)}^{(m,m)}) \omega^2 - \omega_m^{b2}}{\omega^2} + \sum_{i \neq m} \gamma_{(b,c)}^{(m,k)} h_i^c + \sum_{i \neq m} \gamma_{(b,b)}^{(m,k)} h_i^b = 0 \end{cases}. \quad (3.14)$$

Такая система уравнений является задачей на собственные значения вида $A^*x = \lambda^*B^*x$, где A , B - квадратные матрицы, x - амплитудные коэффициенты.

Решение данной задачи находится численно с помощью стандартных проверенных методик. Для решения системы (3.14) в случае модели, состоящей из секции CDS и отрезка волновода, методика была программно реализована на языке Fortran с использованием матричной процедуры NAG F02VJF [55]. Выходными данными программы являются собственные частоты системы и амплитудные коэффициенты разложения полей из (3.1) и (3.2) секции и мостового устройства на радиусе щели.

3.2. Проверка точности методики моделирования неоднородных систем, связанных щелями, на основе многомодового приближения.

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. 3.2.

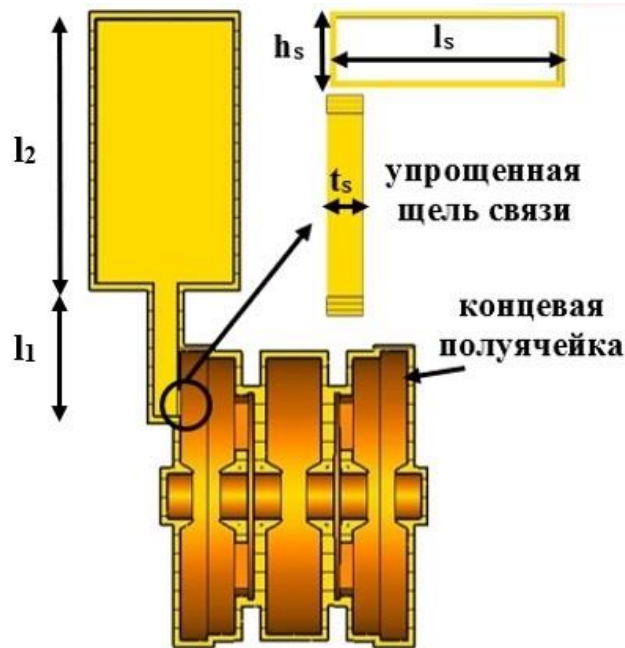


Рисунок 3.2. Калибровочная модель из трех периодов CDS и отрезка волновода.

Для данной модели было проведено сравнение результатов численного моделирования в CST и результатов расчетов методикой на основе многомодового приближения.

Длина патрубка l_2 варьировалась в пределах 150÷550 мм имитируя различные положения настроечного плунжера [51]. На рис. 3.3 приведены зависимости частот результирующих мод системы от длины патрубка.

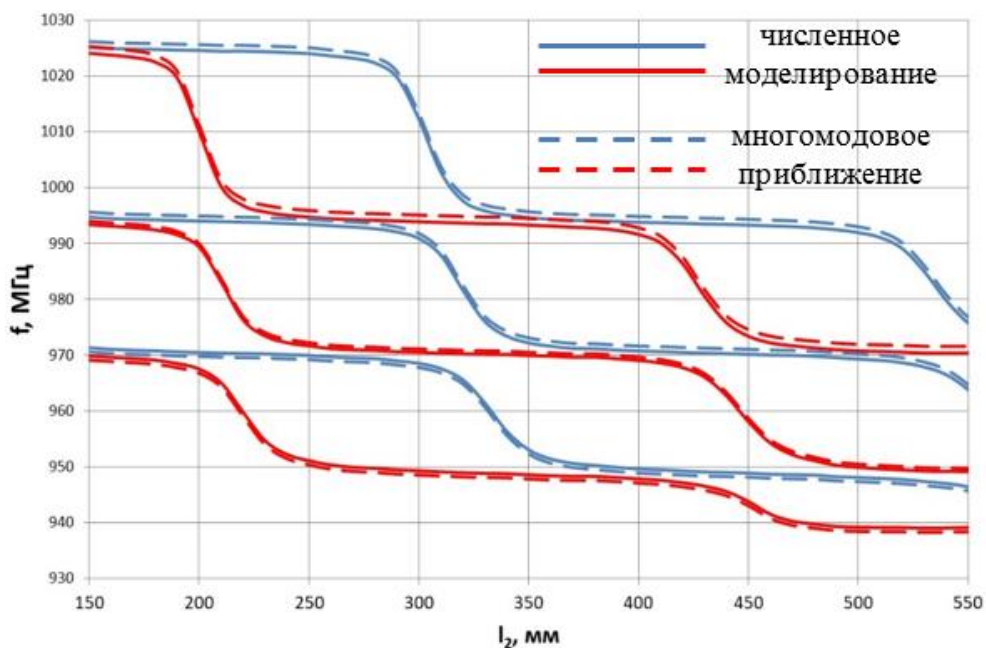


Рисунок 3.3. Сравнение результатов численного моделирования и моделирования на основе многомодового приближения.

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 системы.

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 [17].

3.3. Выбор параметров узла соединения секции CDS и мостового устройства.

3.3.1. Методика настройки частоты рабочей моды и разделения соседних колебаний.

При соединении секции CDS и мостового устройства в виде отрезка волновода прямоугольного сечения с переходной частью необходимо достичь оптимальной величины разделения рабочей и двух соседних к ней мод при сохранении достаточной чувствительности частоты рабочей моды к элементам подстройки частоты. Наличие достаточного разделения мод вблизи

рабочей частоты необходимо для повышения стабильности распределения поля в секциях резонатора. На рис. 3.4 показана зависимость частот результирующих мод системы в зависимости от положения настроечного плунжера (l_2) для случая секции из 20 периодов CDS и мостового устройства.

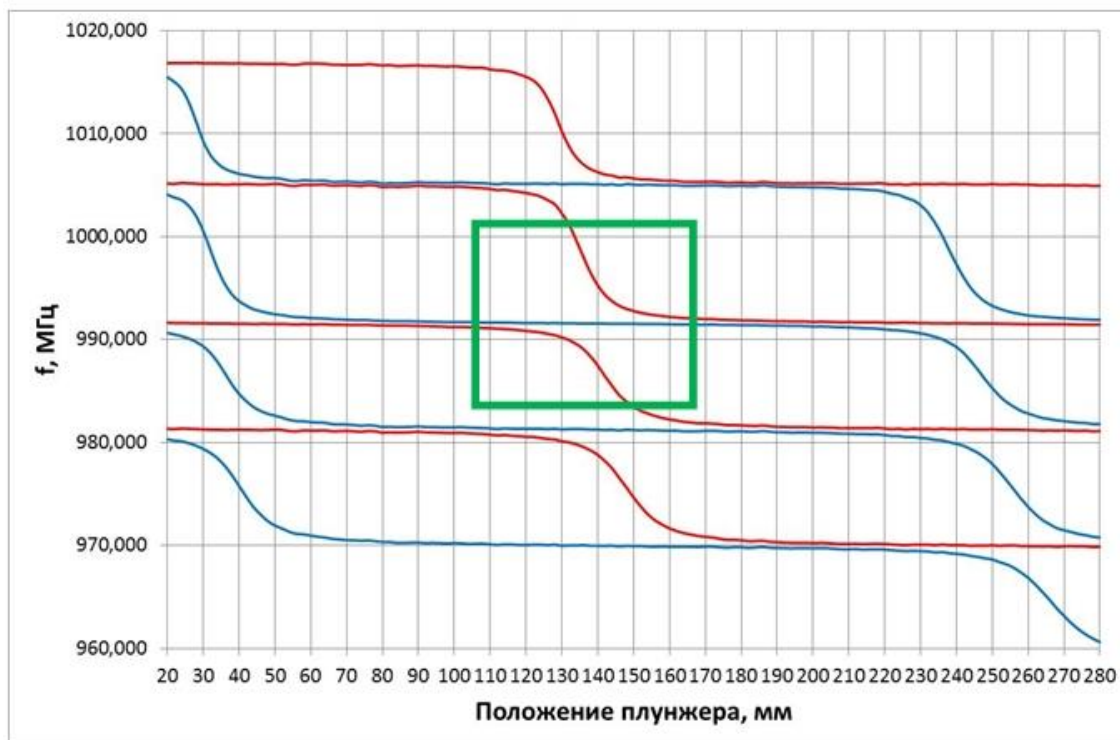


Рисунок 3.4. Зависимость частот результирующих мод от положения плунжера (l_2).

Положение плунжера устанавливается в точку, когда частота рабочей моды близка к рабочему значению 991 МГц и частоты соседних мод равноудалены от нее по частоте, как это показано на рис. 3.5.

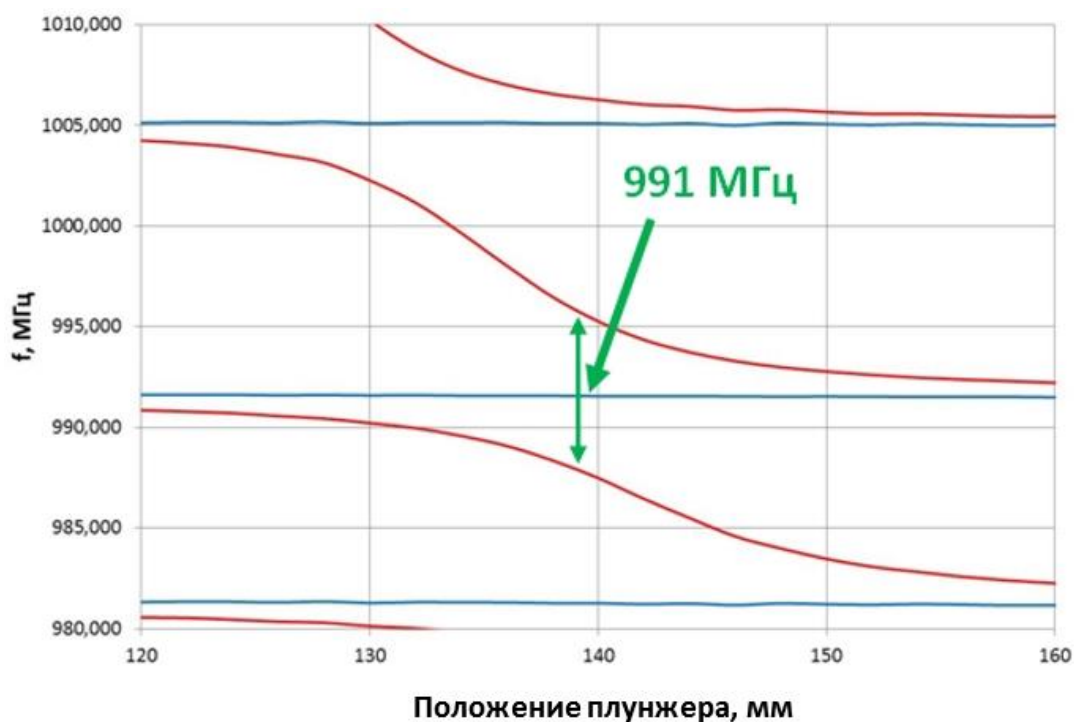


Рисунок 3.5. Рабочее положение плунжера (l_2).

При этом расстояние между рабочей модой и соседними модами определяется величиной коэффициента связи, зависящей от длины щели.

Наличие щели связи между секцией и мостовым устройством приводит к понижению частоты рабочей моды секции, в полном соответствии с предсказываемым системой уравнений (3.10). В связи с этим требуется подстройка по частоте концевых полу ячеек до пайки секций.

Таким образом обеспечивается как настройка рабочей частоты, так и равное разделение соседних колебаний по частоте.

3.3.2. Оптимизация узла соединения секции и мостового устройства для снижения потерь мощности в мостовом устройстве.

Для снижения потерь мощности в мостовом устройстве, приводящих к уменьшению шунтового сопротивления в существующем резонаторе на основе секций УСШД установлено отношение потерь мощности в мостовом устройстве к потерям мощности в секции не превышающее 8% [56]. С помощью модели на основе многомодового приближения могут быть определены амплитудные коэффициенты колебания секции и ближайшего к

нему по частоте колебания мостового устройства h_c и h_b (3.1, 3.2). Тогда это отношение можно найти как:

$$\frac{P_{\text{мост}}}{P_{\text{секции}}} = \frac{P_{\text{патрубок}} + P_{\text{волновод}}}{P_{\text{секции}}} = \frac{\frac{\omega_{\text{пат}} h_b^2}{Q_{\text{пат}}} + \frac{\omega_{\text{вол}} \left(\frac{H_{\text{пат}}}{H_{\text{вол}}}\right)^2}{Q_{\text{вол}}}}{\frac{\omega_{\text{сек}} h_c^2}{Q_{\text{сек}}}}, \quad (3.15)$$

где $P_{\text{патрубок}}$ – потери мощности в переходной части мостового устройства с длиной l_1 (рис. 3.2), $P_{\text{волновод}}$ – потери мощности в основной части мостового устройства (рис. 3.1); $\omega_{\text{сек, пат, вол}}$ – частоты рабочего колебания в секции и ближайших к нему колебаний переходной и основной части мостового устройства, $Q_{\text{сек, пат, вол}}$ – соответствующие значения добротности колебаний, $H_{\text{пат, вол}}$ – значения амплитуды магнитного поля переходной и основной части мостового устройства на их границе (l_1 на рис. 3.2), эти значения могут быть получены численно в CST.

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. 3.6.

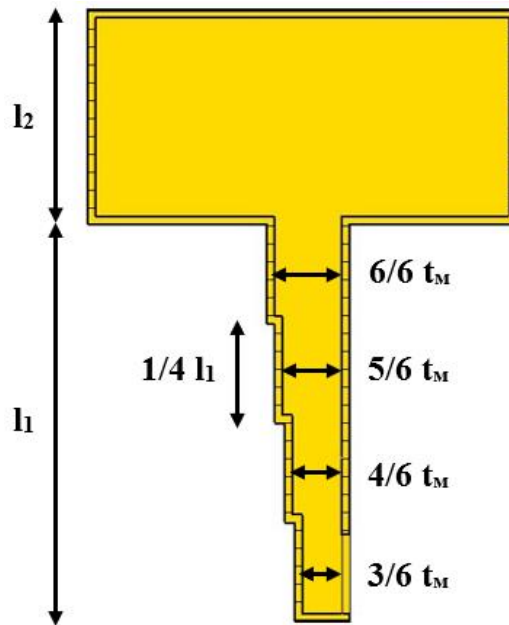


Рисунок 3.6. Модифицированная переходная часть мостового устройства.

На рис. 3.7 приведено сравнение зависимостей отношения мощности потерь в мостовом устройстве к мощности потерь в секции от длины переходной части l_1 при различной длине щели связи l_s ($l_{щели}$) для случаев использования отрезка волновода и модифицированного отрезка волновода.

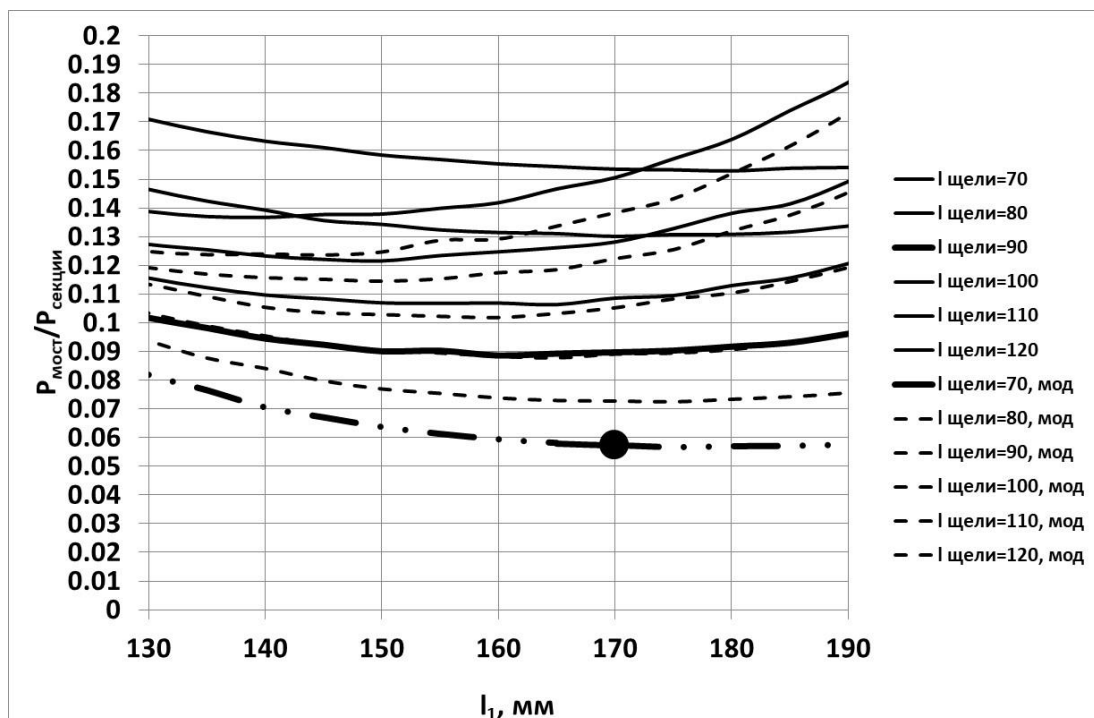


Рисунок 3.7. Зависимость отношения потерь мощности в мостовом устройстве к потерям мощности в секции, «мод» – использована модифицированная переходная часть волновода.

При использовании модифицированного переходного участка мостового устройства удастся 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.

Выводы к Главе 3.

1. На основе многомодового приближения предложена методика, позволяющая рассчитывать рабочие параметры нового резонатора CDS как неоднородной связанной системы. Особенностью данной методики является возможность использовать параметры отдельных компонентов системы, полученных численным моделированием. Это позволяет с большей точностью учитывать конструкционные особенности отдельных элементов резонатора.

2. Методика позволяет моделировать настройку полного резонатора, состоящего из четырех секций и трех мостовых устройств.

3. Методика обладает достаточной точностью в сравнении с прямым численным моделированием тестовой системы в CST.

4. Для снижения потерь мощности в мостовом устройстве предложена модифицированная конструкция узла соединения секций с мостовыми устройствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 запираения. 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 монопериодических 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.

Данная работа посвящается светлой памяти моей матери Ольги Александровны Ивановой.

Автор выражает глубокую признательность коллективу Отдела Ускорительного Комплекса ИЯИ РАН за ценные замечания и советы при проведении исследований, научному руководителю Валентину Витальевичу Парамонову за направление и курирование всех этапов работы, Наталии Ивановне Брусковой за построение технического рисунка структуры CDS и коллективу DESY PITZ за предоставление доступа к программному обеспечению CST Studio.

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. <https://j-parc.jp>
4. *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.
5. *V.V. Paramonov*, The Cut Disk Accelerating structure for High Energy Linacs // Proceedings of the 1997 PAC, v.3, p.2959.
6. *A. Oppelt, K. Abrahamyan, G. Asova et al.*, Status of the PITZ facility upgrade // Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, pp. 76 – 78.
7. *V.V. Paramonov*, The Annular Coupled Structure optimization for JAERY/KEK Joint Project for high intensity proton linac // KEK report 2001-14 A, KEK, Tsukuba, Japan.
8. *V.V. Paramonov*, The CDS parameters for proton linac with moderate heat loading // Proceedings of RuPAC-2010, Protvino, Russia, pp. 65 – 67.
9. Институт Ядерный Исследований РАН // <http://www.inr.ru>
10. *Г.И. Бацких, Е.Г. Комар, А.А. Кузьмин и др.*, Линейный ускоритель мезонной фабрики // Труды радиотехнического института АН СССР, 1973, №16, сс. 9 – 24.
11. *С.К. Есин, В.М. Лобашев*, Перспективы исследований на пучках сильноточных ускорителей // Труды радиотехнического института АН СССР, 1973, №16, сс. 46 – 56.
12. *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.

13. *L.V. Kravchuk and P.N. Ostroumov*, Upgrade study of INR proton linac for production of 3 MW beam // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, pp.3282 – 3284.
14. *В.Г. Андреев*, Определение геометрии структуры со знакопеременным ускоряющим полем на $\pi/2$ волне // «Журн. Техн. Физ.», 1971, т. 41, с. 788 – 795.
15. ANSYS code // <http://www.ansys.com>
16. *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.
17. *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.
18. CST studio // <http://www.cst.com>
19. <https://lansce.lanl.gov/>
20. *Нэнн Е.А., Нэнн Б.С., Поттер Д.М.*, Ускоряющие структуры со стоячей волной для линейных ускорителей на большие энергии // «Приборы для науч. Исслед.», 1968, т. 39, №7. сс. 31 – 43.
21. *В.Г. Кульман, Э.А. Мирочник, В.М. Пироженко*, Ускоряющая структура с кольцевыми резонаторами связи // «Приборы и техника эксперимента», 1970, №4, сс. 56 – 61.
22. *Н. Ао, N. Hayashizaki, K. Hasegawa et al.*, Structure design of the Annular Coupled Structure linac for the JAERI/KEK Joint Project // Proc. 2002 Linac Conference, p. 234.
23. *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.
24. *А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов*, Основы физики и техники ускорителей, М.: Энергоатомиздат, 1991, 310 с.

25. *В.И. Каминский, М.В. Лалаян, Н.П. Собенин*, Ускоряющие структуры: учебное пособие. // М.: МИФИ, 2005, 294 с.
26. *Б.П. Мурин*, “Бипериодические ускоряющие структуры”, в *Линейные ускорители ионов*, Атомиздат, Москва, СССР: 1981, 280 с.
27. *В.Г. Андреев, В.М. Белугин, С.К. Есин* и др., Удаление нерабочих колебаний из окрестности рабочей волны в структуре основной части ускорителя мезонной фабрики ИЯИ АН СССР // *Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, т. 1, 1983, с. 162.
28. *М.С. Касчиев, В.А. Касчиева, И.В. Пузынин* и др., Расчет полного спектра колебаний в осесимметричных, продольно-однородных резонаторах, волноводах и в периодических ускоряющих структурах в режимах бегущих и стоячих волн // *Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, т. 1, 1985, стр. 137.
29. *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, p. 012073, 2016.
30. *С.К. Есин, Л.В. Кравчук, В.В. Парамонов, Г.В. Романов*, Стабильность радиотехнических параметров ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами // *Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, т. 1, 1985, с. 148.
31. *S.C. Joshi, V. Paramonov, A. Skassyrskaya* et. al., The complete 3-D coupled RF-thermal-structural-RF analysis procedure for a normal conducting accelerating structure for high intensity hadron linac // *Proceedings of LINAC2002*, Gyeongju, Korea, pp. 216 – 218.
32. *I.V. Gonin, V.V. Paramonov*, 3D thermal stress analysis for the CDS structure // *Proceedings of the 2000 EPAC Conference*, p. 1990.
33. *V.V. Paramonov, I.V. Gonin*, 3D thermal stress analysis for the CDS structure // *Proceedings of EPAC 2000*, Vienna, Austria, pp. 1990 – 1992.

34. *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.
35. *V.V. Paramonov, N.I. Brusova, A.I. Kvasha et al.*, Design parameters of the normal conducting booster cavity for the PITZ-2 test stand // Proceedings of LINAC 2004, Lübeck, Germany, pp. 204 – 206.
36. *И.Н. Сливков*, Изоляция и разряд в вакууме // Атомиздат, Москва, СССР: 1972, сс. 155-163.
37. *V.V. Paramonov*, Effective RF deflecting structures for bunch rotation and deflection // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 201 – 203.
38. *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.
39. *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.
40. *V.V. Paramonov, S.G. Tarasov*, The possibility of multipactor discharge in coupling cells of coupled cells accelerating structures // Proceedings of LINAC98, pp. 971 – 973.
41. ГОСТ 10988-2016
42. *V. Baglin, J. Boiko, O. Grobner et al.*, The secondary electron yield of technical materials and its variation with surface treatments // Proceedings of EPAC00, pp. 217-221.
43. *G. Romanov*, Simulation of multipacting in HINS accelerating structures with CST particle studio // Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, pp. 166-168.
44. *M.A. Gusarova, V.I. Kaminsky, L.V. Kravchuk et al.*, Multipacting simulation in accelerator RF structure // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 599, 2009, p. 100.
45. *I.V. Rybakov, I.I. Isaev*, Estimation of multipacting in CDS structure // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 288 – 290.

46. *I. Isaev*, Dark current measurement at PITZ, Humboldt-University, Berlin, Germany, Unwanted Beam Workshop, Dec. 2012.
47. *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.
48. *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.
49. *I.V. Rybakov, V.V. Paramonov*, The method of accelerating structure tuning and manufacturing quality control // Journal of Physics: Conference Series., 2017, 941. 012094.
50. *I.V. Gonin, L.V. Kravchuk, V.V. Paramonov et al.*, Some Methods of the Stop-band Width Evaluation in the Compensated Accelerating Structures // IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-32, n.5, 1985, pp. 2818-2820.
51. *В.Г. Андреев, В.М. Белугин, В.В. Парамонов*, Мостовое устройство для ускоряющих резонаторов линейного ускорителя на высокие энергии // Труды РТИ АН СССР, Москва, N. 20, 1974, с. 47-55.
52. *V.V. Paramonov*, The multi-mode analysis of the slot-coupled accelerating structures // Proceedings 2002 Linac Conference, p.413.
53. *V.V. Paramonov*, The common dispersion equation for high-energy compensated accelerating structures // Proceedings of LINAC2002, Gyeongju, Korea, pp.410 - 413.
54. *V.F. Vikulov and V.E. Kalyuzhny*, The influence of deviations in manufacturing at the parameters of standing wave accelerating structures, Tech.Phys., v. 50, 1980, pp. 773-779.
55. NAG Fortran code library // <http://www.nag.co.uk>
56. *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.