

На правах рукописи

Болгов Роман Олегович

**ВЫСШИЕ ТИПЫ ВОЛН И АСИММЕТРИЯ СВЧ ПОЛЯ  
В УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРАХ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Автор:**



Москва 2013

Работа выполнена на кафедре электрофизических установок  
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Научный руководитель:

доктор технических наук

профессор

Собенин Николай Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Павлов Юрий Сергеевич

(зав. лабораторией радиационной технологии

ФГУП Институт физической химии и

электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН)

кандидат технических наук

Краснов Андрей Александрович

(ведущий инженер ООО "Сименс НИЦ")

Ведущая организация:

Московский радиотехнический институт РАН

Защита состоится "21" июня 2013 г. в 11 ч. 30 мин. в конференц-зале К-608 на

заседании диссертационного совета Д 212.130.01

при Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ»

по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.


Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном

экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан "20" мая 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Щедрин И.С.

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Современное развитие ускорителей заряженных частиц характеризуется возрастающими требованиями к параметрам ускоренного пучка. Это обусловлено расширением круга физических проблем, исследуемых с помощью пучков заряженных частиц. Получение необходимых характеристик пучка в значительной мере определяется влиянием волн высших типов (далее ВВТ). Известно, что при пролёте пучка заряженных частиц в ускоряющей структуре генерируется широкий спектр волн различных типов с разными резонансными частотами. Этот эффект оказывает отрицательное влияние на работу ускорителя, так как при этом часть энергии пучка отдаётся СВЧ полю, но гораздо более существенным с точки зрения динамики пучка является взаимодействие наведенных волн с пучком. Наведённые поля обладают поперечными электрическим и магнитным компонентами на оси и, следовательно, отклоняют следующие сгустки. Это может привести к нестабильности пучка – вызвать значительное увеличение поперечного и продольного эмиттанса пучка и в итоге привести к расширению энергетического спектра частиц, к потере частиц на стенках, а при увеличении тока пучка к его полной потере.

Демпфирование ВВТ играет важную роль в достижении и сохранении низкого эмиттанса и низкой модуляции энергии пучков в ускорителях, особенно в ускорителях, основанных на сверхпроводящей технологии. Очень большие значения собственной добротности из-за сверхпроводящего состояния стенок резонатора, которое является преимуществом перед резонаторами с нормально проводящими стенками, делают импеданс пучка на ВВТ очень высоким. Это может привести к сильному взаимодействию пучок-резонатор, вызывая рост эмиттанса, расширение энергетического спектра от сгустка к сгустку и/или дополнительной криогенной нагрузке. Проблеме исследования ВВТ в сверхпроводящих резонаторах уделяется большое внимание.

Решение данной проблемы позволит избежать негативного влияния ВВТ на характеристики прецизионных ускоренных пучков за счет выбора геометрии

структур, обеспечивающей демпфирование нежелательных ВВТ, а так же за счет выбора устройств ввода и вывода СВЧ мощности с минимизацией влияния асимметрии электромагнитного поля в области пролета пучка.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью работы является исследование ВВТ в сверхпроводящих ускоряющих резонаторах современных ускорительных комплексах и выработку методов по уменьшению влияния таких ВВТ на ускоряемый пучок заряженных частиц. Основой методик служит как оптимизация формы резонатора, так и использование устройств вывода ВВТ.

## **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

Научная новизна результатов работы заключается в следующем: предложена новая методика, позволяющая осуществить подавление и вывод ВВТ из одноячеечных и многоячеечных сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ЗНАЧИМОСТЬ**

1. При разработке сверхпроводящего линейного ускорителя непрерывного режима eLinac II использована рекомендация по расширению пролётной трубки ускоряющей секции, направленная на недопущение возникновения ВВТ. Работа выполнена в соответствии с меморандумом о сотрудничестве между НИЯУ МИФИ и канадской Национальной лабораторией элементарных частиц и ядерной физики.

2. Для модернизируемого ускоряющего комплекса ЛНС предложена конструкция сверхпроводящего ускоряющего резонатора, не допускающая возникновения в нём ВВТ. Работа выполнена в соответствии с меморандумом о сотрудничестве между НИЯУ МИФИ и Национальной лабораторией Фраскати (Италия).

3. При разработке источника рентгеновского излучения исследованы результаты по разработке коаксиального ввода большой средней мощности без подвижной части. Работа выполнена в Аргонской национальной лаборатории (США).

### **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1. Методика подавления и вывода «запертых» ВВТ в многоячеечных сверхпроводящих резонаторах, состоящая в оптимизации геометрии пролетной трубки и крайних ячеек.
2. Методика подавления ВВТ в одноячеечном сверхпроводящем резонаторе с использованием диафрагмы в пролетном канале, радиальных нагрузок и демпфирующих колец.
3. Разработка регулируемого коаксиального ввода большой средней мощности без подвижной части.

### **СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ**

Работа выполнена при поддержке гранта федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы по мероприятию 1.3.2 "Проведение научных исследований целевыми аспирантами" на работу "Высокочастотные системы мощных импульсных источников когерентного коротковолнового синхротронного излучения".

Работа по коаксиальному вводу большой средней мощности без подвижной части выполнена в Аргонской национальной лаборатории в соответствии с полученным грантом президента РФ.

Работы по исследованию сверхпроводящего резонатора на 800 МГц выполнены во Фраскати в соответствии с меморандумом о сотрудничестве с Национальной лабораторией Фраскати.

## **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ**

Основные результаты и положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях:

1. В 2011 - 2013 - Научные сессии НИЯУ МИФИ.
2. В 2011 - International Workshop on Charged Particle, Alushta, Ukraine.
3. В 2011 - International Conference on RF Superconductivity, Chicago, USA.
4. В 2012 - International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA.

## **ПУБЛИКАЦИИ**

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных трудах.

## **СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 124 страницы. Список литературы включает 47 источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснованы актуальность и цель диссертации. Сформулирована цель и задачи исследований.

**Первая глава** посвящена общим сведениям о методах расчёта электродинамических характеристик ВВТ. При изучении ВВТ представляет интерес расчет внешней добротности ускоряющих структур, как меры эффективности их демпфирования. Рассматриваются три метода расчёта внешней добротности: метод суперпозиции двух бегущих волн, резонансный метод и метод расчёта в переходном режиме.

Собственное поле пучка индуцирует поверхностный заряд и токи в стенках камеры, которые в свою очередь становятся источниками полей, воздействующих на частицы сгустка. Рассмотрены теоретические аспекты определения влияния таких полей на параметры пучка на основе расчёта наведенного потенциала и параметра потерь.

Также в главе проведён сравнительный анализ программного обеспечения, при помощи которого проводились численное моделирование ускоряющих структур и вычисление их электродинамических характеристик.

**Вторая глава** посвящена исследованию ВВТ в резонаторах ускорительных комплексах eLinac и ERL (Energy Recovery Linac). Для генерации ионов редких изотопов необходимо располагать ускорителем электронов с энергией несколько десятков МэВ и максимальной интенсивностью. Решение этой задачи осуществляется в Канадской Национальной лаборатории TRIUMF в рамках проекта eLinac, предусматривающего создание линейного ускорителя электронов на энергию 50 МэВ с током 10 мА в непрерывном режиме на частоте 1300 МГц.

Проведены расчёты электродинамических характеристик в широком диапазоне геометрических параметров резонатора, при этом для дипольных волн вычислялось эффективное поперечное шунтовое сопротивление, а для монопольных волн вычислялось продольное эффективное шунтовое сопротивление. Величины погонных продольного и поперечного эффективных шунтовых сопротивлений можно рассчитать по формулам (1) и (2) соответственно.

$$r_{ш.эф.∥} = \frac{\left| \int_0^l E_z(z) e^{ik_z z} dz \right|^2}{P_{ном.} l}, \quad (1)$$

$$r_{ш.эф.⊥} = \frac{\left| \int_0^l \frac{1}{k_z} \frac{\partial E_z}{\partial r} e^{ik_z z} dz \right|^2}{P_{ном.} l}, \quad (2)$$

где  $P_{ном}$  – потери СВЧ мощности в структуре,  $l$  – длина структуры,  $k_z$  – продольное волновое число,  $E_z(z)$  – продольная составляющая электрического поля на оси структуры в функции координаты  $z$ ,  $r$  – радиальная координата.

Формула (2) является следствием теоремы Панофского - Венцеля, согласно которой существует связь между поперечными и продольными составляющими электрического поля. Для монопольных волн вычисляют продольное шунтовое сопротивление, в то время как для мультипольных

(дипольных, квадрупольных) вычисляют поперечное шунтовое сопротивление. При расчетах с помощью трехмерных программ численного моделирования в выражении (2) производную заменяют конечной разностью:

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\Delta E_z}{r_0} = \frac{E_{z2} - E_{z1}}{r_0}, \quad (3)$$

где  $E_{z2} = E_z(r = r_0)$  - продольное электрическое поле вдоль резонатора, смещённое на  $r_0$  от оси и  $E_{z1} = E_z(r = 0)$  - электрическое поле вдоль структуры на оси. При вычислении шунтового сопротивления мультипольных волн линия интегрирования электрического поля зависит от типа волны. На рис.1 представлено поперечное сечение ускоряющей структуры, на котором отображено положение линии интегрирования для различных волн.

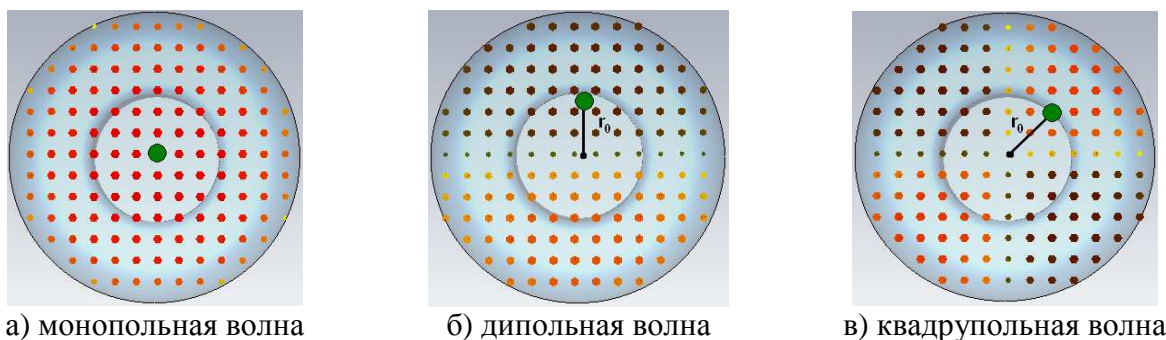


Рис.1. Проекция линии интегрирования продольной составляющей электрического поля.

Параметр  $r_{ш.эф.}/Q_0$  определяется как отношение эффективного шунтового сопротивления к собственной добротности и вводится как мера обмена энергией между точечной частицей и рассматриваемой волной. Данный параметр не зависит от мощности потерь в стенках резонатора и является свойством геометрии структуры.

На частоте около 2,56 ГГц в резонаторе ускорителя eLinac возбуждается гибридная волна  $EH_{111}$ , являющаяся «запертой» внутри структуры. Силовые линии электрического и магнитного полей такой волны сосредоточены в центральных ячейках структуры (рис.2,а). Проведенные расчёты показывают, что изменение формы ячеек не способствует выводу данной волны из резонатора.



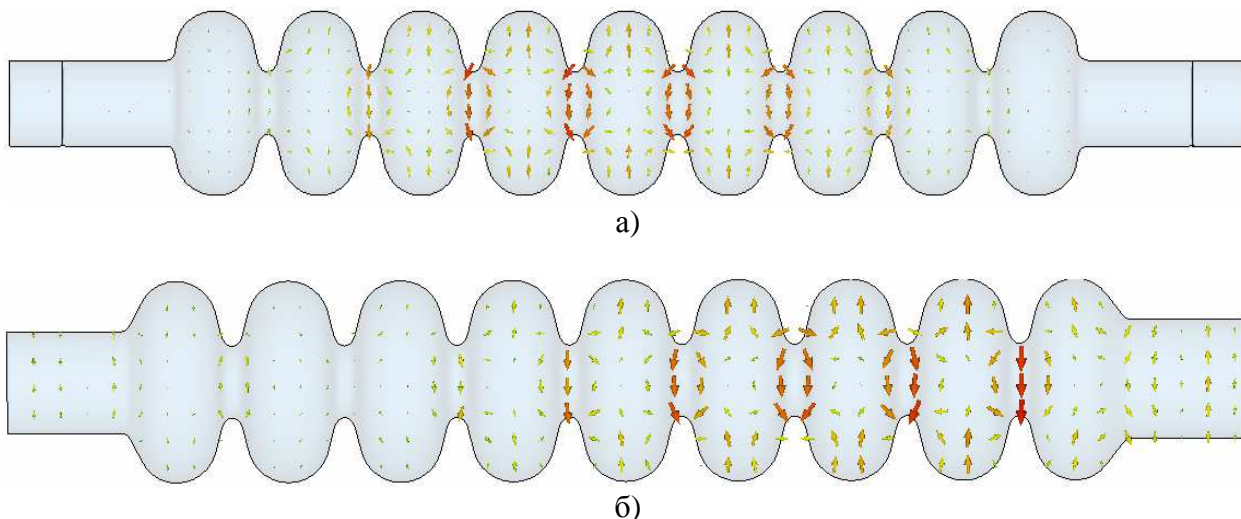


Рис.2. Пространственное распределение волны  $EH_{111}$  в резонаторе eLinac до (а) и после (б) оптимизации.

Особое внимание уделено гибридной волне  $EH_{111}$  на виде колебаний 0, так как именно на этом виде колебаний происходит максимальное взаимодействие с ускоряемым пучком. Данному условию соответствуют точки пересечения дисперсионных кривых ВВТ с прямой, соответствующей фазовой скорости волн равной скорости света  $\beta_\phi = 1$  (рис.3).

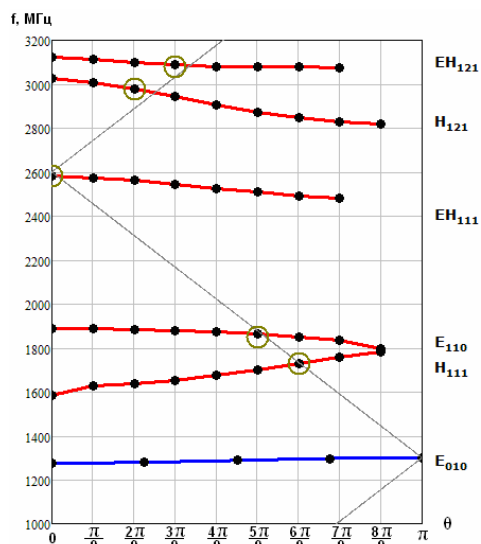


Рис.3. Дисперсионные характеристики рабочей волны и дипольных ВВТ в диапазоне частот 1300 – 3250 МГц.

Для того чтобы уменьшить негативное влияние «запертых» ВВТ на поперечную динамику пучка было предложено изменить геометрию концевых ячеек со стороны, противоположной устройству вывода ВВТ. Проведённая оптимизация геометрии резонатора позволила найти такую форму, при которой

волна  $E_{H_{111}}$  перестаёт быть «запертой», о чём свидетельствуют распределение поля, представленное на рис.2,б. При этом эффективное шунтовое сопротивление дипольных волн не превышает установленный порог в  $10^6$  Ом на основе анализа неустойчивостей пучка. Предложенное устройство вывода ВВТ в совокупности с демпфирующими кольцами обеспечивает значение внешней добротности меньше установленного порога  $10^6$ .

Важным направлением ускорительной техники является создание установок, обеспечивающих энергию пучка несколько ГэВ при токе пучка в десятки миллиампер и работающих в непрерывном режиме. Ускоритель такого класса создается в лаборатории физики элементарных частиц Корнельского университета (США). Это линейный ускоритель с рекуперацией энергии Energy Recovery Linac (ERL) на энергию до 5 ГэВ и током 100 мА в непрерывном режиме на частоте 1300 МГц.

ВВТ должны иметь возможность распространяться к нагрузке или специальным устройствам вывода ВВТ через трубку дрейфа. Таким образом, радиус трубки дрейфа должен соответствовать наименьшей частоте отсечки рассматриваемых ВВТ. Самые низкие ВВТ первой полосы пропускания имеют частоту около 1600 – 1700 МГц. Для того чтобы гарантировать возможность вывода ВВТ, радиус пролетной трубки был выбран равным  $R_{bp} = 55$  мм с частотой отсечки 1597 МГц. В целях борьбы с «запертыми» волнами в геометрию ускоряющей секции внесена дополнительная асимметрия в виде различных радиусов трубки дрейфа по краям структуры: 39 мм и 55 мм (рис.4).

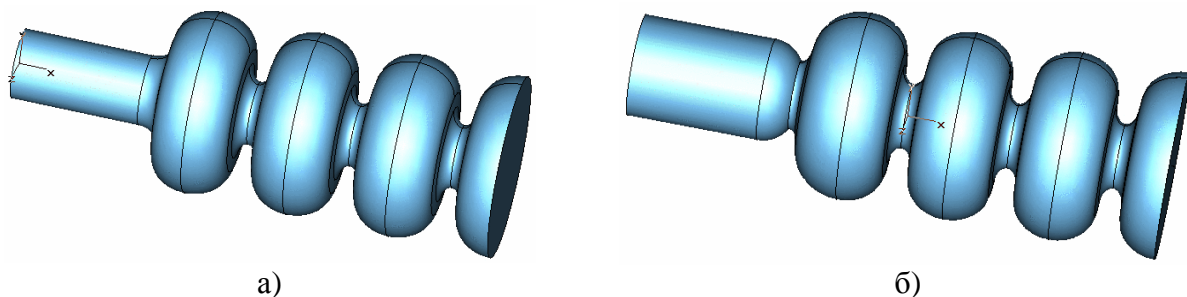


Рис.4. Ускоряющая секция ERL:  
а – с трубкой дрейфа радиусом 39 мм; б – с трубкой дрейфа радиусом 55 мм.

Решение с широкой пролетной трубкой не было использовано для резонатора TESLA, так как необходимость в подавлении ВВТ не стояла столь остро, как в случае с ERL. Для того чтобы не ослабить ускоряющие свойства конечных ячеек с широкой пролетной трубкой, было предложено использовать диафрагму между резонатором и пролетной трубкой. Наличие трубок дрейфа присоединенных к конечным ячейкам снижает их собственную частоту, что приводит к изменению ускоряющего поля в конечных ячейках. Для восстановления равенства ускоряющего поля и улучшения демпфирования ВВТ проведена дополнительная оптимизация конечных ячеек.

При изучении электродинамических характеристик ВВТ представляет интерес расчет внешней добротности ускоряющих структур, как меры эффективности их демпфирования. У ВВТ должна быть возможность распространяться от ускоряющего резонатора по трубке дрейфа к специальным устройствам вывода мощности, что и определяет величину внешней добротности. Существуют различные методы расчёта внешней добротности, опирающиеся либо на аналитическую аппроксимацию, либо на численные методы. В настоящее время наибольшее распространение получили методы численного расчёта.

В диссертации для вычисления внешней добротности использован метод суперпозиции двух бегущих волн. Если резонатор без потерь с запасённой энергией  $W$  на резонансной частоте  $\omega$  слабо связан с полубесконечной линией передачи (рис.5), то через эту линию некоторая мощность  $P$  выходит из резонатора и запасённая энергия в резонаторе уменьшается.

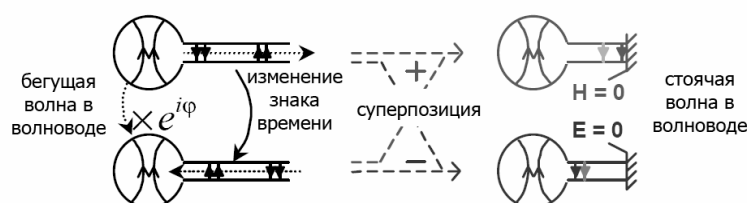


Рис.5. Трансформация задачи бегущей волны в задачу стоячей волны.

Представляется возможным внутри линии передачи рассмотреть две бегущие волны одинаковой мощности  $P$ , но противоположного направления,

превращающиеся в стоячую волну. Выбрав референсную плоскость в максимуме электрического поля и воспользовавшись теоремой суперпозиции, можно вывести следующее соотношение:

$$Q_{\text{вн}} = Q_E + Q_H, \quad (4)$$

где  $Q_E$  и  $Q_H$  – внешние добротности с электрической и магнитной стенками на концах линии соответственно.

На рис.6 приведены результаты расчета внешней добротности, вычисленные методом синтеза бегущей волны из двух стоячих волн. Из рис.6 видно, что оптимизированная геометрия резонатора ERL позволяет значительно подавить ВВТ вблизи 2-й гармоники резонатора.

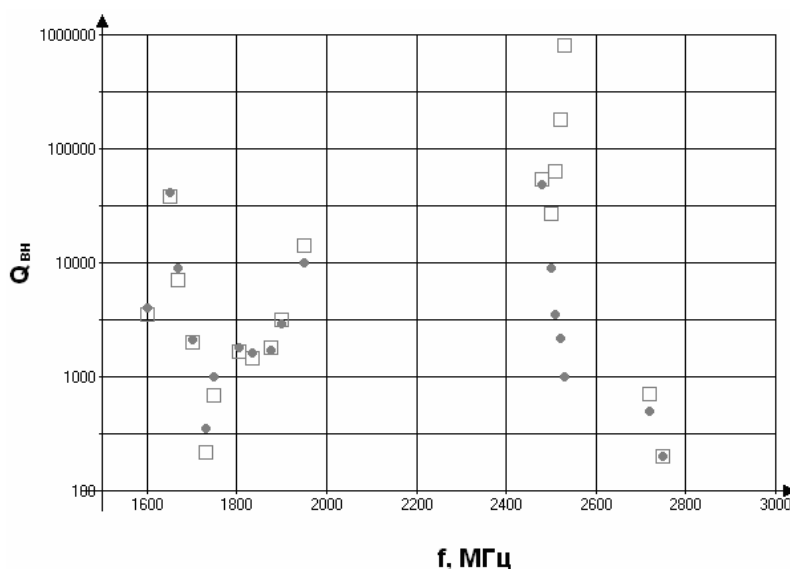


Рис.6. Внешняя добротность ВВТ в функции частоты для ускорителя ERL: прямоугольники – исходная геометрия; точки – геометрия после оптимизации.

Получены данные по определению чувствительности отношения поперечного шунтового сопротивления к добротности в функции геометрических размеров для первых четырех дипольных ВВТ, что позволяет оценить возможности их эффективного демпфирования выбором соответствующих размеров.

**Третья глава** посвящена исследованию ВВТ в резонаторе на частоте 800 МГц для модернизации ускоряющей системы Большого Адронного Коллайдера (LHC), а также методам вывода таких волн из резонатора и их демпфирования.

В ЦЕРН разрабатывается проект повышения светимости Большого адронного коллайдера (High Luminosity – Large Hadron Collider-HL-LHC). При реализации проекта HL-LHC одним из методов повышения времени жизни пучка является применение гармонических резонаторов в дополнении к основным СВЧ ускоряющим резонаторам. Для получения плоского распределения продольной плотности сгустка можно использовать комбинацию рабочих частот 400 и 800 МГц. Для этого необходима разработка новых ускоряющих резонаторов, в которых немаловажную роль играют ВВТ.

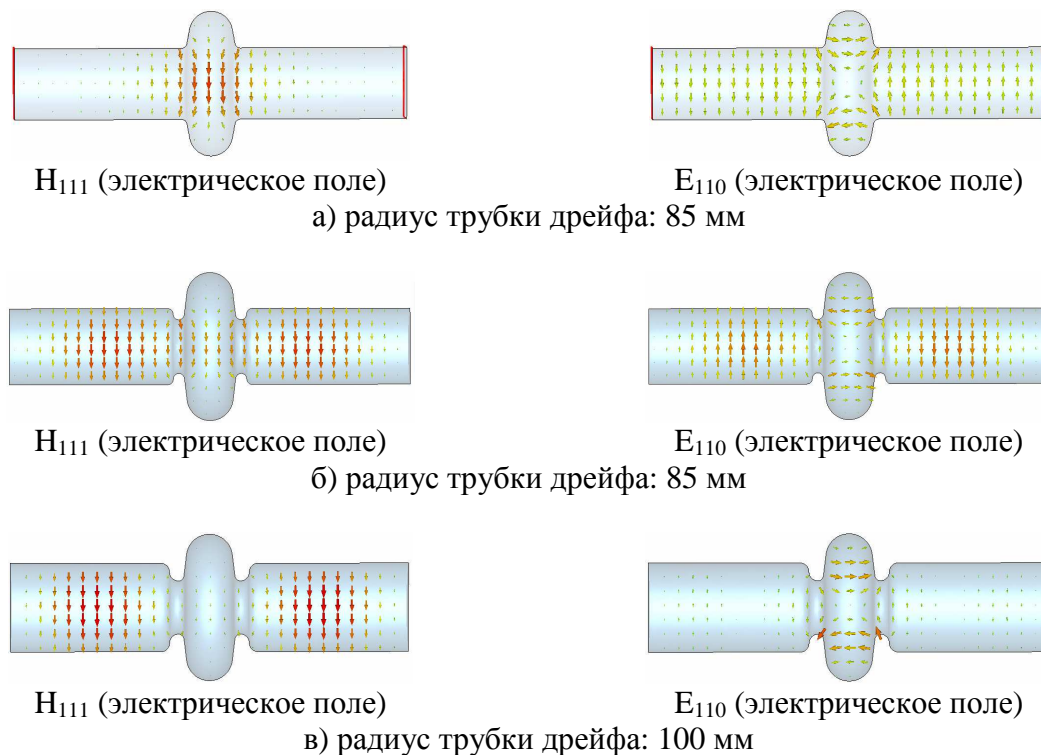


Рис.7. Сравнение распространения ВВТ в трубку дрейфа.

Обнаружено, что в исходной геометрии резонатора распределение электромагнитного поля волны  $H_{111}$  сосредоточено внутри самого резонатора (рис.7,а). При таком распределении поля ВВТ являются «запертыми» внутри структуры. Для наилучшего проникновения волн ВВТ в трубку дрейфа рассмотрены вариации радиуса диафрагмы, прилегающей к резонатору.

Результат проведённой оптимизации формы резонатора показывает, что есть некоторый оптимум для одновременного проникновения первых двух

дипольных волн в трубку дрейфа (рис.7,б), причём частоты этих волн находятся выше частоты отсечки самой трубки дрейфа.

В качестве устройства подавления ВВТ рассмотрено использование демпфирующих колец в совокупности с использованием диафрагмы в месте соединения трубки дрейфа и резонатора (рис.8), расположенных в трубке дрейфа. Кольца изготовлены из материала с низкой проводимостью, нанесённого тонким слоем на стенки трубки дрейфа.

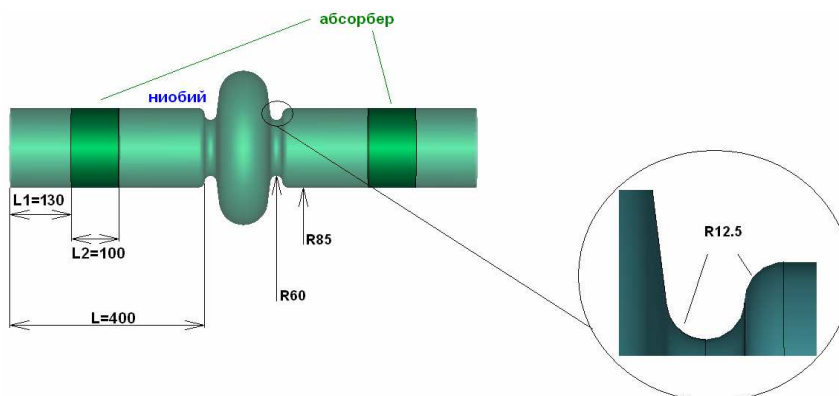


Рис.8. Использование демпфирующих колец в резонаторе ЛНС.

Исследована зависимость собственной добротности ускоряющей волны и двух дипольных волн в зависимости от положения и ширины демпфирующего кольца. Расчёты показали, что оптимальным вариантом является достаточное удаление кольца шириной порядка 110 - 140 мм от резонатора. При этом добротность обеих дипольных волн падает на 6 порядков с  $1,547 \cdot 10^{10}$  до  $\sim 1,5 \cdot 10^4$ , тогда как добротность ускоряющей волны ухудшается всего в 1.2 раза.

Проведены расчёты наведённого потенциала для дипольных и монопольных волн. Характер затухающей зависимости наведённого потенциала для дипольных волн показывает, что возникающие на близких друг к другу частотах дипольные волны  $H_{111}$  и  $E_{110}$  глубоко проникают в трубку дрейфа и не являются «запертыми» внутри резонатора. Учитывая равномерный характер зависимости наведённого потенциала для монопольной (ускоряющей) волны можно сделать вывод о том, что представленная и оптимизированная структура представляет собой одномодовый резонатор с ускоряющей волной.

Для вывода дипольных волн из резонатора с частотой 800 МГц предложено использование радиальной линии (нагрузки) с нанесённым абсорбирующим материалом на её внутреннюю поверхность (рис.9). К достоинствам радиальной линии можно отнести: высокий уровень азимутальной симметрии, вывод всех нежелательных волн из резонатора, простота изготовления и как следствие невысокая цена. Рассмотрены два типа нагрузок для демпфирования ВВТ: радиальная и коническая. При возбуждении в ускоряющем резонаторе дипольной волны, в радиальной нагрузке возбуждается волна типа  $E_{110}$ . Размеры радиальной нагрузки (диска) подбирались таким образом, что резонансная частота волны  $E_{110}$  в нагрузке была близка к частотам наиболее опасных дипольных волн. Как было отмечено ранее, оптимизированная геометрия структуры позволяет дипольным волнам беспрепятственно распространяться по трубке дрейфа, а значит, нагрузку можно располагать на достаточно большем расстоянии от резонатора. Таким образом, необходимость в использовании дроссельного фильтра для ускоряющей волны отпадает. В качестве покрытия внутренней стороны нагрузки использовался материал cesic.

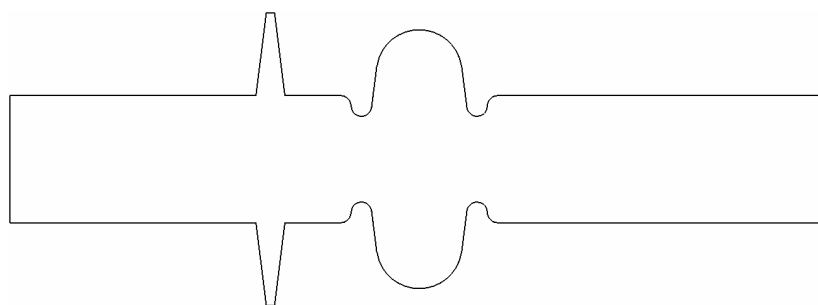


Рис.9. Резонатор с радиальной демпфирующей нагрузкой.

В главе также рассматриваются вопросы возникновения мультипакторного разряда при использовании радиальной нагрузки.

В **четвёртой** главе рассмотрены вопросы, связанные с влиянием устройств ввода мощности и вывода ВВТ на характеристики ускоряемого пучка. Наличие таких устройств в ускоряющей секции приводит к ненулевым составляющим поперечного электрического поля в области пролёта пучка. Поперечные компоненты поля сообщают сгустку ускоряемых частиц поперечный импульс,

вследствие чего происходит смещение частиц в радиальном направлении, ухудшая эмиттанс и энергетический спектр пучка.

Для оценки влияния асимметрии поля на характеристики пучка вводится понятие параметра эффективного отклонения пучка, который может быть представлен как отношение эффективного поперечного напряжения к эффективному продольному напряжению:

$$K_{x/y} = \frac{V_{x/y}}{V_{\text{уск}}}. \quad (5)$$

При временной зависимости электрического поля как  $e^{i\omega t}$  и рабочей фазы  $\varphi$ , поперечное напряжение может быть описано прямым интегрированием поперечного поля (дипольной компоненты) на оси:

$$V_x = \int_{-z_{\text{кон}}}^{z_{\text{кон}}} [E_x(z) - v \times \mu_0 H_y(z)] \cdot e^{i(\omega_0 t + \varphi)} dz, \quad (6)$$

$$V_y = \int_{-z_{\text{кон}}}^{z_{\text{кон}}} [E_y(z) - v \times \mu_0 H_x(z)] \cdot e^{i(\omega_0 t + \varphi)} dz, \quad (7)$$

$$V_{\text{уск}} = \int_{-z_{\text{кон}}}^{z_{\text{кон}}} E_z(z) \cdot e^{i(\omega_0 t + \varphi)} dz. \quad (8)$$

Согласно теореме Панофского-Венцеля поперечный отклоняющий эффект связан только с продольным градиентом ускоряющего электрического поля, поэтому, пренебрегая изменениями заряда в поперечном направлении, имеем:

$$V_{\perp} = \left( \frac{iv}{\omega_0} \right) \int_0^d \frac{E_z(\rho = a)}{a} \cdot e^{i(\omega_0 z / v + \varphi_0)} dz, \quad (9)$$

где  $a$  – радиус трубки дрейфа,  $\rho$  – смещение от оси,  $v$  – скорость сгустка пучка. Параметр отклонения пучка имеет как реальную, так и мнимую компоненты. Реальная часть соответствует поперечному моменту, придаваемому каждому сгустку. Мнимая часть придаёт временную зависимость и прогнозирует рост эмиттанса пучка. Количественная оценка параметра отклонения сводится к прямому интегрированию соответствующих компонент поля бегущей волны в области пролёта пучка. Для восстановления бегущей волны в подводящем коаксиале устройства ввода мощности проводят два независимых расчёта при



помощи программ численного моделирования. Первый расчёт проводится с граничным условием на конце коаксиала в виде электрической стенки, второй – в виде магнитной, после чего производится реконструкция бегущей волны. Для секции eLinac рассчитаны параметры отклонения как для стандартного (рис.10,а) коаксиального ввода мощности, так и для видоизменённого (рис.10,б).

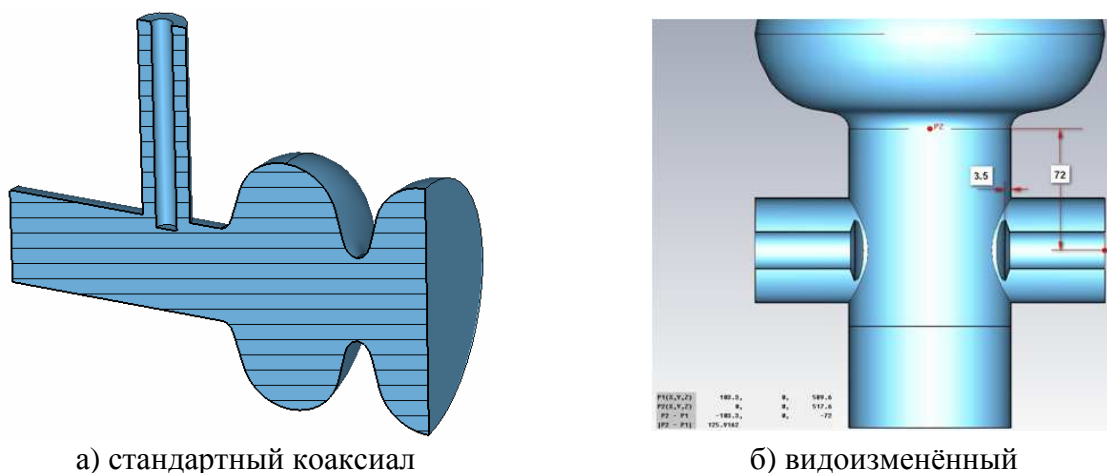


Рис.10. Коаксиальный ввод мощности в секцию eLinac.

Для определения параметра отклонения необходим точный расчёт электромагнитного поля на оси ускоряющей секции. Из-за наличия чувствительности методов расчёта параметра отклонения к малым девиациям поля исследована сходимость компонент электромагнитных полей с использованием различных сеток разбиения структуры. На основе данных о сходимости предложено использование стандартной прямоугольной сетки с уплотнением в приосевой области и в области подводящей коаксиальной линии.

Варьированием длины коаксиальной линии можно подобрать такую референсную плоскость, при которой наблюдаются максимальные напряжённости электрического и магнитного полей на её границе.

Представляет интерес изменения параметра отклонения вдоль сгустка от его начала к концу, что приводит к росту поперечного эмиттанса пучка. Для ускоряющей секции eLinac оценён рост нормированного поперечного эмиттанса. Однако использованные формулы позволяют сделать только грубую

оценку роста эмиттанса пучка на оси и не учитывают поперечную зависимость электромагнитных полей. Использование симметричного коаксиального ввода мощности не означает, что эмиттанс пучка не будет расти. Несмотря на отсутствие поперечных компонент электромагнитного поля на оси пролета пучка, при отклонении от нее на некоторое расстояние, меньшее радиуса пучка, следует ожидать появления поперечных компонент поля. Следовательно, по краям пучка частицы могут испытывать отклоняющие силы. Еще один фактор, который следует учесть, это пространственный заряд пучка, вследствие которого частицы будут расталкивать друг друга через кулоновское взаимодействие.

**Пятая глава** посвящена разработке ввода мощности (рис.11), который предполагается использовать в источнике рентгеновского излучения в Аргонской национальной лаборатории (США).

Коаксиальный ввод работает в непрерывном режиме, обеспечивая входной мощностью равной 200 кВт. В основе ввода мощности лежит ферритовый регулятор (рис.12), в котором изменение соленоидального магнитного поля, ортогонального СВЧ полям в коаксиальной линии, изменяет магнитную проницаемость феррита. Изменение электромагнитного поля в системе влечёт за собой изменение её внешней добротности  $Q_{вн}$  и, следовательно, коэффициента связи.

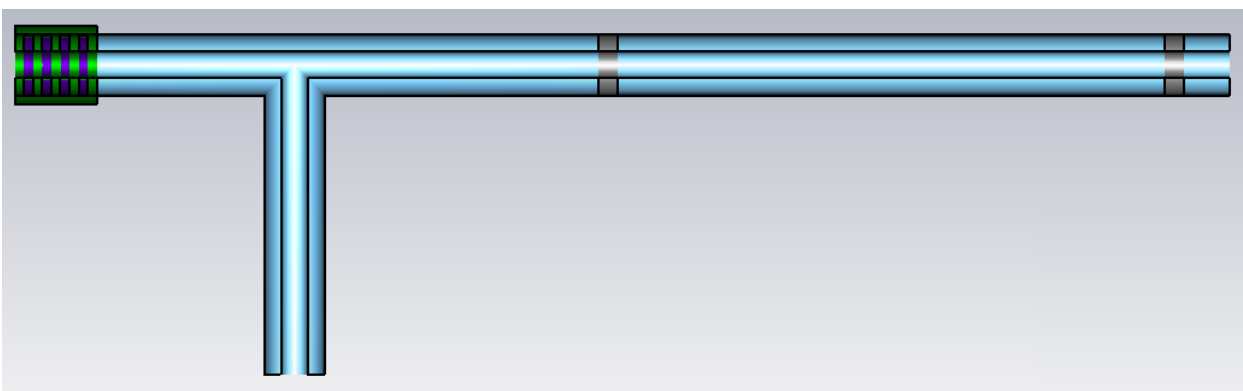


Рис.11. Схематическое представление ввода мощности.

Ферритовые диски регулятора, помещены в диэлектрическую жидкость, которая позволяет отводить тепло от них. Секция регулятора окружена соленоидом для создания магнитного поля.

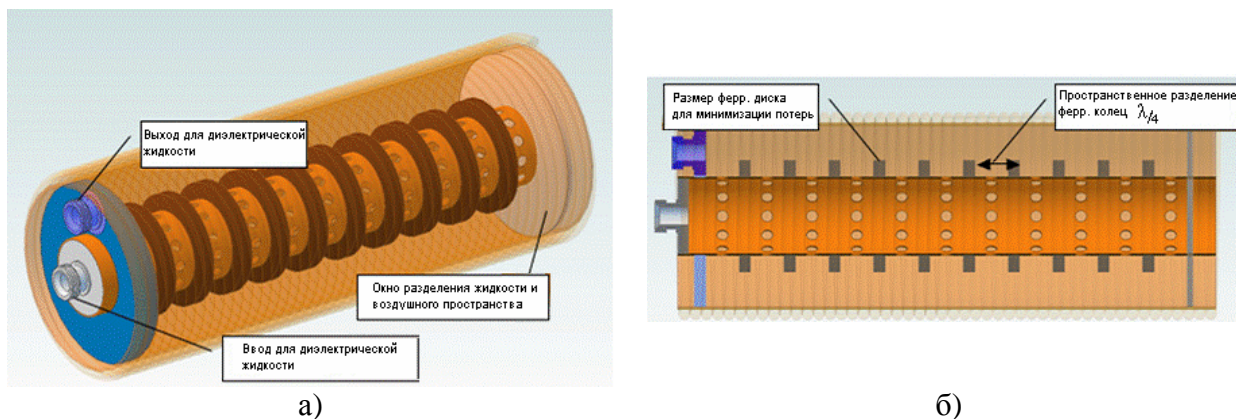


Рис.12. Секция ферритового регулятора.

Представлены результаты настройки ввода мощности, обеспечивающего КСВН не хуже 1,06 при различных геометрических размерах ферритовых колец и их числа. Оценены потери мощности в отдельных узлах ввода мощности. Учтены микроволновые характеристики диэлектрической жидкости, окружающей феррит.

Результаты настройки отдельных узлов ввода мощности согласуются с моделированием полной структуры с использованием феррита, диэлектрической жидкости и двойного СВЧ окна.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана методика оценки качества демпфирования ВВТ в сверхпроводящих ускоряющих резонаторах по результатам расчета эффективного поперечного шунтового сопротивления, внешней добротности и оценки влияния асимметрии поля в структурах с узлами ввода мощности и вывода ВВТ.

Предложены и исследованы возможности по выводу и демпфированию «запертых» ВВТ в сверхпроводящих многоячеечных ускоряющих резонаторах

с помощью расширения пролетной трубки и использования поглощающих колец. Для девяти ячеечного сверхпроводящего резонатора ускорителя eLinac получено значение внешней добротности, не превышающей установленный порог  $10^6$ .

Представлена возможность вывода «запертых» ВВТ из резонатора ERL с помощью оптимизации геометрии конечных ячеек. Для ускорителя вблизи второй гармоники внешняя добротность уменьшена в 2 раза.

На примере сверхпроводящего ускоряющего резонатора на частоте 800 МГц показано, что при использовании диафрагмы в пролетной трубке или радиальных поглощающих нагрузок можно не допустить распространения ВВТ, и, тем самым, исключить их влияние на характеристики ускоренного пучка. Резонатор исследован на предмет отсутствия мультипакторного разряда.

Исследованы методики расчета влияния асимметрии поля, связанного с наличием устройств ввода мощности и вывода ВВТ, отклонения пучка. Приведены расчеты этого параметра на примере ускорителя eLinac.

Проведены расчеты регулируемого коаксиального ввода большой средней мощности до 200 кВт на частоте 352 МГц без подвижной части для источника рентгеновского излучения в Аргонской национальной лаборатории (США). Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с известными экспериментальными данными.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Болгов Р.О., Гусарова М.А., Каменщиков Д.С., Лалаян М.В., Смирнов А.Ю., Собенин Н.П. Высшие типы волн в структуре высокочастотного дефлектора / Приборы и техника эксперимента, 2011, № 6, С. 71–80.
2. Болгов Р.О., Гусарова М.А., Каменщиков Д.С., Лалаян М.В., Смирнов А.Ю., Собенин Н.П., Топорков С.Е. Расчет и экспериментальное исследование электродинамических характеристик волн высших типов ускоряющих структур на основе круглого диафрагмированного волновода с емкостной и индуктивной связями / Ядерная физика и инжиниринг, 2011, том 2, №2, С.149–153.

3. Болгов Р.О., Гусарова М.А., Лалаян М.В., Макаров В.А., Собенин Н.П., Шведунов В.И. Анализ влияния устройств ввода мощности и вывода волн высших типов на динамику ускоряемых частиц / Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 5, С.97–102.
4. Болгов Р.О., Гусарова М.А., Каминский В.И., Королёв В.А., Лалаян М.В., Петрушина И.И., Собенин Н.П., Звягинцев В.Л. Высшие типы волн и мультипакторный разряд в сверхпроводящих резонаторах ускорителя eLinac / Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2012, том 1, № 2, С.1–7.
5. Болгов Р.О., Гусарова М.А., Костин Р.А., Петрушина И.И., Собенин Н.П., Звягинцев В.Л. Исследование сверхпроводящего резонатора ускорителя eLinac / Вопросы атомной науки и техники, №4, 2012, С.33–36.
6. Гусарова М.А., Болгов Р.О., Каменщиков Д.С., Собенин Н.П., Топорков С.Е. Высшие типы волн в круглом диафрагмированном волноводе с электрической и магнитной связью / Вопросы атомной науки и техники, №3, 2012, С.79–81.