

На правах рукописи

Куцаев Сергей Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ЛИНЕЙНЫХ
УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИНСПЕКЦИИ**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Автор:



Москва 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Собенин Николай Павлович

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
Шведун В Василий Иванович

кандидат технических наук,
Грызлов Анатолий Васильевич

Ведущая организация Институт ядерных исследований РАН,
г. Троицк

Защита состоится "21" марта 2011 г. в 15-00 на заседании
диссертационного совета Д **212.130.01** в конференц-зале К-608
(корпус «К», 6 этаж) НИЯУ МИФИ
по адресу: г. Москва, Каширское ш.31,
тел. 324–84–98, 323–91–67, 323–90–52

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе диссертационного совета или
прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью
организации.

Автореферат разослан "___" февраля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



И.С. Щедрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наряду с увеличивающимся количеством крупных ускоряющих установок наблюдается подъем в развитии линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) на небольшие энергии. Особенно востребованы ускорители на энергию до 10 МэВ. При этих значениях энергии частиц не имеет места явление наведенной радиоактивности для большинства металлов. В особых случаях возможно применение ускорителей с энергиями до 20 МэВ. Повышенный интерес обусловлен расширением области применения ЛУЭ. Высокая эффективность данных устройств, а также простота и дешевизна их изготовления позволяют успешно использовать такие ускорители во многих технологических процессах. В выключенном состоянии ускорители этого типа совершенно безопасны в радиационном отношении, что позволяет осуществлять их оперативное техническое обслуживание. Установки могут эксплуатироваться без строительства специальных помещений с радиационной защитой.

Интерес к использованию ЛУЭ для прикладных целей можно объяснить не только их высокой эффективностью, но и простотой ввода и вывода ускоряемых частиц, что позволяет получать строго направленные пучки быстрых электронов и тормозное излучение. Ускорители данного типа отличаются простотой регулировки энергии и мощности дозы, а также высокой мощностью дозы тормозного излучения даже при сравнительно небольших (до 10 МэВ) энергиях ускоренных электронов.

Одним из основных требований, предъявляемых к современным электронным ускорителям, является требование по глубокой перестройке параметров пучка, таких как кинетическая энергия или мощность. Таким образом, особую ценность представляют технические решения, обеспечивающие широкий диапазон изменения выходных параметров ускорителя.

Одним из развивающихся направлений аппаратуры в настоящее время являются системы радиационной инспекции контейнеров с возможностью идентификации атомного номера вещества объектов, содержащихся в контейнере (функцией Z-анализа), для таможни и органов безопасности. Для

решения этой задачи, как правило, применяются ускорители заряженных частиц.

Создание коммерческого экземпляра системы инспекции грузов с возможностью Z-анализа объектов, находящихся в крупногабаритных контейнерах, и работающей в режиме реального времени, является одной из наиболее актуальных прикладных задач в настоящее время. Очевидно, что подобный комплекс должен быть основан на ускорителе электронов, поскольку энергии тормозного излучения должно хватать для преодоления толстых стальных стенок контейнеров. Для получения информации об исследуемом материале необходима работа ускорителя в дуальном режиме с быстрой перестройкой энергии, причем выходные параметры пучка должны оставаться стабильными для получения четкой картинки. Кроме этого, ускоритель должен быть как можно более простым и надежным с технологической точки зрения.

Основные проблемы при создании ускоряющих структур (УС) для инспекционных комплексов состоят в следующем:

- Источник тормозного излучения должен иметь как можно меньшую длину, а следовательно - как можно больший ускоряющий градиент (≥ 15 МэВ/м);
- Ускоритель должен быть достаточно эффективным, в том числе и по количеству захваченных в режим ускорения частиц ($\geq 50\%$);
- Ширина энергетического спектра пучка электронов должна быть по возможности наименьшей ($\leq 10\%$);
- Ускоряющая структура должна быть реализована как можно проще (желательно на основе идентичных ячеек), а комплекс должен содержать как можно меньшее число элементов.

Актуальность работы заключается в необходимости развития методов неразрушающего контроля и инспекции крупногабаритных объектов и грузов. Поиск и обнаружение делящихся материалов, оружия, взрывчатых и наркотических веществ должен осуществляться в максимально возможном числе пунктов контроля перевозки и хранения грузов как на границах, так и внутри страны. В связи с этим, создание установок, обеспечивающих большую производительность при инспекции грузов и являющихся достаточно простыми при производстве и эксплуатации, является крайне востребованным.

Целью работы является разработка ускоряющей структуры для технологического ускорителя, используемого в качестве источника тормозного излучения в инспекционном комплексе, работающего в дуальном энергетическом режиме от источника питания с выходной импульсной мощностью 4.5 МВт на частоте 2856 МГц. Разработка ускоряющей структуры для технологического ускорителя следующего поколения того же инспекционного комплекса, обладающей следующими преимуществами: меньшая длина, больший захват частиц в режим ускорения, меньший энергетический спектр.

Научная новизна работы заключается в разработке и создании ускоряющей структуры технологического линейного ускорителя электронов для комплекса "All Secure". Кроме того, предложена новая гибридная схема ускорения с использованием группирователя, работающего в режиме стоячей волны, и ускоряющей секции, работающей в режиме обратной волны, питающихся от одного источника ВЧ - мощности.

Диссертация посвящена развитию и обоснованию технических решений, обеспечивающих создание компактного, простого и надежного ускорителя для радиационного инспекционного комплекса.

Практическая ценность работы:

Рассчитаны ускоряющие структуры установки с перестройкой энергии от 5 до 10 МэВ при энергии инжекции 40 кэВ. Источник ВЧ питания - клистрон S-частотного диапазона с выходной импульсной мощностью 4.5 МВт. Установка предназначена для таможенного контроля контейнеров с грузами и обеспечивает глубину проникновения излучения сквозь стальные стенки толщиной 340 мм. Разрешение полученного изображения при этом составляет порядка 5мм на пиксель. Установка состоит из одного ускорителя, выходная энергия пучка у которого изменяется от одного ВЧ-импульса к другому от 5 до 10 МэВ. В настоящее время установка создана и протестирована в США на базе сотрудничества с компанией «Scantech Sciences, LLC».

Рассчитана ускоряющая структура для комбинированного ЛУЭ с группирователем на основе бипериодической ускоряющей структуры (БУС), работающего в режиме стоячей волны, и ускоряющей секции, работающей в режиме бегущей волны. В качестве УС для такого ускорителя используется

круглый диафрагмированный волновод (КДВ) с электрической или магнитной связью (КДВ-М). В настоящее время создан резонансный макет, состоящий из трех ячеек структуры данного типа. Полученные результаты планируется использовать при усовершенствовании системы “All Secure”.

Апробация работы. Основные результаты исследования отражены в пяти опубликованных печатных работах в следующих реферируемых журналах: “Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A”, “Приборы и техника эксперимента”, “Вопросы атомной науки и техники”, а также докладывались на следующих конференциях:

Научная сессия МИФИ, Москва 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011

XXIV Международная конференция по линейным ускорителям заряженных частиц LINAC’08, Виктория, Канада, 2008

XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC’08, Зеленоград, 2008

XXIII Международная конференция по ускорителям заряженных частиц PAC’09, Ванкувер, Канада, 2009

XXI Международное совещание по ускорителям заряженных частиц IWCPA’09, Алушта, Украина 2009

I Международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC’10, Киото, Япония, 2010

XXV Международная конференция по линейным ускорителям заряженных частиц LINAC’10, Цукуба, Япония, 2010

XXII Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC’10, Протвино, 2010

Работа поддержана следующими грантами:

- «Развитие и исследование методов резонансного ускорения пучков электронов с поиском оптимальных схем ускорения и частотного диапазона ускоряющего электромагнитного поля». Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2010 годы.

- «Ускоряющие структуры, дефлекторы и СВЧ устройства ускорителей заряженных частиц для генерации мощного синхротронного излучения». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2009-2011 годы.

- «Исследование физических процессов в ускоряющих резонаторах и дефлекторах для лазеров на свободных электронах с высокой интенсивностью излучения» Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2010 годы.

- «Разработка трехмерной программы расчета мультипакторного разряда в ускоряющих структурах». Грант РФФИ, 2008-2010 годы.

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждена использованием в процессе расчетов широко известных в научных кругах программ численного моделирования, теоретическим анализом и экспериментами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 164 страницы, 86 рисунков, 43 таблицы и список литературы из 96 наименований.

На защиту выносятся следующие результаты:

- Результаты разработки ускоряющей структуры линейного ускорителя со стоячей волной с перестройкой энергии, используемого в качестве источника тормозного излучения в системе инспекции крупногабаритных грузов “All Secure”. Данный ускоритель создан, испытан и готов к коммерческому применению.

- Созданная программа, позволяющая проводить расчеты динамики электронов в ускоряющих структурах в режимах бегущей (прямой или обратной) волны, с учетом эффектов нагрузки током, объемного заряда и фокусировки продольным однородным магнитным полем. Программа имеет возможность автоматического определения размеров ячеек по известным значениям фазовой скорости и нормированной напряженности электрического поля. С помощью программы можно осуществлять поиск оптимальных параметров ячеек УС по заданным выходным параметрам пучка.

- Результаты расчетов электродинамических характеристик и геометрических размеров ускоряющих структур типа КДВ с магнитной связью. Оптимизация параметров ячеек данного типа позволила добиться значений шунтового сопротивления и коэффициента связи, большего, чем у ячеек типа

КДВ. Результаты измерений характеристик ячеек данного типа совпали с результатами расчетов, что подтверждает их корректность.

- Методика расчетов динамики частиц в ускорителе электронов комбинированного типа, включающего группирователь со стоячей волной и ускоряющую секцию на основе КДВ или КДВ-М. Ускоритель такого типа имеет следующие преимущества по сравнению с ускорителями со стоячей или бегущей волной: меньшую длину ускоряющей структуры, более узкий энергетический спектр выходного пучка, а также конструктивную простоту, что выражается в отсутствии необходимости использования солениода и циркулятора.

- Результаты расчетов параметров ускорителей нового поколения комплекса “All Secure”, работающих в режиме стоячей, бегущей волны, а также комбинированной схемы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели исследования и определяется круг решаемых задач.

Первая глава содержит описание физических основ работы инспекционных комплексов, их устройства, основных параметров и характеристик. Приводится описание методики определения атомного номера вещества при воздействии на него γ -излучением с разными энергиями (т.н. Z-анализ). Также в данной главе дается обзор существующих установок. Особое внимание уделено описанию инспекционной системы “All Secure”, поскольку остальная часть диссертации посвящена разработке и усовершенствованию ускоряющей структуры линейного ускорителя, входящего в данный комплекс.

Инспекционный комплекс работает следующим образом. Излучатель формирует веерный пучок тормозного излучения, который пронизывает инспектируемый контейнер и ослабляется в соответствии с количеством и плотностью материала в направлении излучения. Прошедшая часть тормозного излучения регистрируется в детекторах тормозного излучения, которые смонтированы на раме детекторной станции в одной плоскости с веерным пучком тормозного излучения. Затем контейнер смещается на малое расстояние, соответствующее размеру детектора (около 4-5 мм), и

сканирование тормозным излучением повторяется. Сигналы из массива детекторов направляются в систему измерения и управления. Когда весь контейнер пройдет сквозь плоскость сканирования, информация из детекторов во всех плоскостях сканирования будет сохранена в компьютере, и компьютер построит рентгенографическое изображение контейнера.

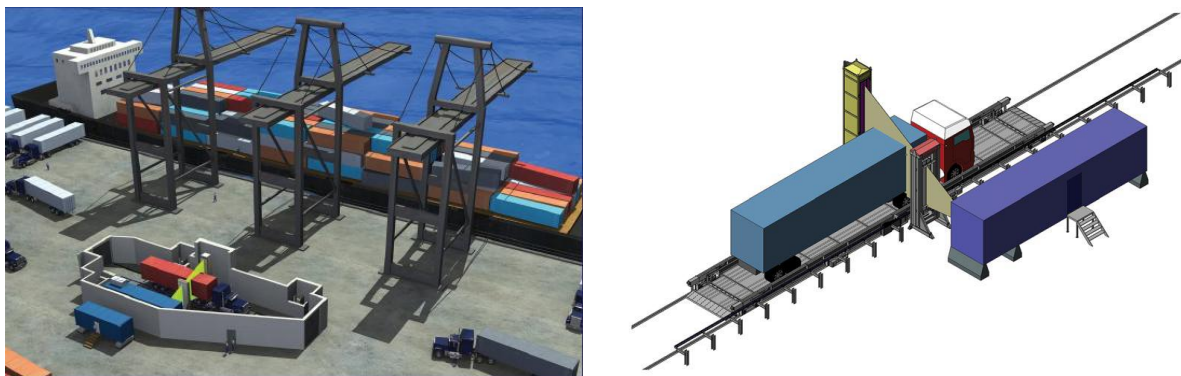


Рис.1 Инспекционный комплекс “All Secure”

Комплекс “All Secure” (рис.1) является инновационным примером системы инспекции объектов с возможностью Z-анализа. Разработка и создание такого комплекса является важной и актуальной задачей, стоящей перед современными учеными и инженерами.

Вторая глава посвящена подробному описанию процесса разработки ускоряющей структуры S-частотного диапазона ЛУЭ, используемого в проекте “All Secure”, а также предложению по ее усовершенствованию путем перехода в С-частотный диапазон.

Разработана и создана ускоряющая структура на основе ячеек БУС S-частотного диапазона для источника тормозного излучения комплекса “All Secure”. Ускоритель предназначен для работы в дуальном режиме с энергиями 10 и 5 МэВ, чередующимися от одного ВЧ-импульса к другому. Перестройка энергии может осуществляться, как посредством нагрузки током, так и путем изменения выходной мощности питающего клистрона. Группирователь обеспечивает захват частиц на уровне 50% в режиме энергии 10 МэВ. Ток ускоренных частиц в этом случае составляет около 200 мА.

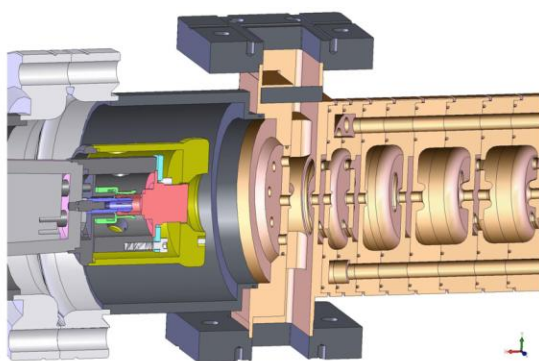
S-частотный ускоритель со стоячей волной создан, испытан и используется в инспекционном комплексе нынешнего поколения (рис.2). При разработке данной ускоряющей структуры главной задачей было обеспечить ее

простоту и надежность. При этом важно максимально использовать весь накопленный в лаборатории СВЧ НИЯУ МИФИ и фирме «ScanTech Sciences, LLC» опыт по созданию ускорителей, т.к. первый коммерческий экземпляр должен обладать в первую очередь возможностью рентгенографического анализа и Z-анализа.

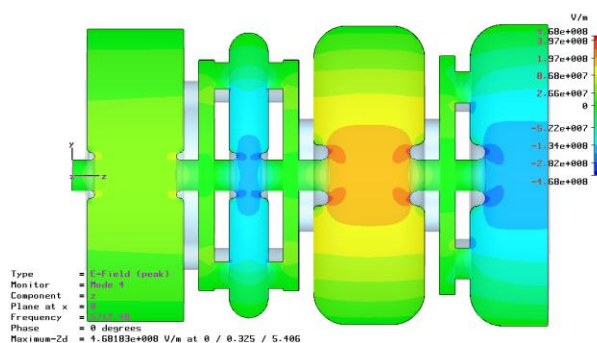


Рис.2 Ускоритель с перестройкой энергии

После создания рабочего экземпляра был поставлен вопрос о переходе к более совершенной системе, а именно к использованию четырех энергий вместо двух для получения более точной информации о Z материала, а также к переходу в более высокочастотный диапазон работы (5712 МГц) для создания более короткой ускоряющей структуры.



а) трехмерная модель с узлом ввода мощности и инжектором



б) распределение амплитуды напряженности электрического поля

Рис.3 Начальная часть ускорителя на стоячей волне

В данной главе рассмотрен наиболее консервативный вариант ускорителя для комплекса нового поколения, а именно ускоряющая структура на основе ячеек БУС С-частотного диапазона. Для улучшения выходных параметров пучка была изменена энергия инъекции, а также параметры ячеек группирователя. Вместо двухъячеечного группирующего участка был выбран трехъячеечный вариант (рис.3). Параметры ячеек были оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить коэффициент связи между регулярными ячейками не менее 8%, захват частиц в режимах как высокой, так и низкой энергий не менее 40-50%, а также как можно большее соотношение между напряженностями полей в первой и остальными ячейками.

Стоит отметить, что в целом выходные параметры пучка для С-частотного ускорителя на 10 МэВ несильно отличаются от параметров S-частотного ускорителя, однако его длина на 30см короче, а группирователь работает практически одинаково эффективно, как в режиме высокой, так и в режиме низкой энергий.

Кроме того, пересмотрена конструкция узла ввода мощности. Теперь ввод осуществляется в первую ячейку, что более конструктивно удобно. Для симметризации поля в ячейке ввода мощности сделан второй волновод, закороченный штырем и используемый для вакуумной откачки.

Рассмотрены две схемы получения пучков с энергиями 5, 10, 15 и 20 МэВ: использование четырех ускорителей, работающих в моноэнергетическом режиме, и использование двух ускорителей, работающих в дуальном режиме (5/10 и 15/20 МэВ). С экономической точки зрения выгоднее использовать вторую схему. Показано, что в этом случае выходные параметры пучка будут незначительно уступать выходным параметрам пучка, полученным в первой схеме.

Наиболее важными параметрами в случае инспекционного комплекса являются длина и коэффициент захвата. В связи с этим предлагается внести более радикальные изменения в конструкцию ускорителей и перейти к альтернативным схемам ускорения электронов.

В качестве альтернативы ускорителю на стоячей волне возможно применение ускорителя на бегущей волне на основе круглого диафрагмированного волновода (КДВ). Структуры на бегущей волне позволяют получить более высокий коэффициент захвата, имеют меньшее время заполнения ВЧ мощностью и являются более широкополосными. Для

расчетов динамики в волноводных замедляющих структурах была разработана специальная программа расчета.

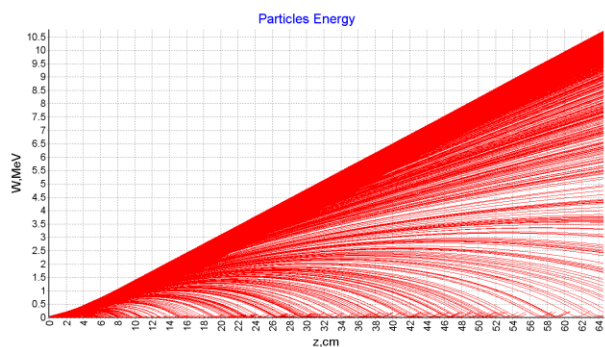
Третья глава посвящена подробному описанию работы созданной программы, а также процессу разработки ускоряющей структуры С-частотного диапазона для ЛУЭ с бегущей волной, предлагаемого в качестве усовершенствования комплекса “All Secure”.

Разработанная программа основана на численном решении дифференциальных уравнений, описывающих движение частиц в волноводных секциях. Программа позволяет учитывать такие эффекты как нагрузка током, пространственный заряд и фокусировка внешним магнитным полем. По сравнению с существующими программами расчета динамики, основывающихся на сеточных методах, созданная программа имеет недостаток в том, что при расчетах используются не реальные распределения полей в ячейках, а аналитические для первой гармоники. Таким образом, можно говорить о том, что программы, использующие различные методы расчета, могут как работать независимо, так и дополнять друг друга в арсенале разработчика. Одним из примеров такого взаимодействия может быть следующая комбинация: с помощью разработанной программы рассчитывается распределение амплитуды напряженности поля с учетом нагрузки током, а затем с помощью сеточной программы этот результат уточняется.

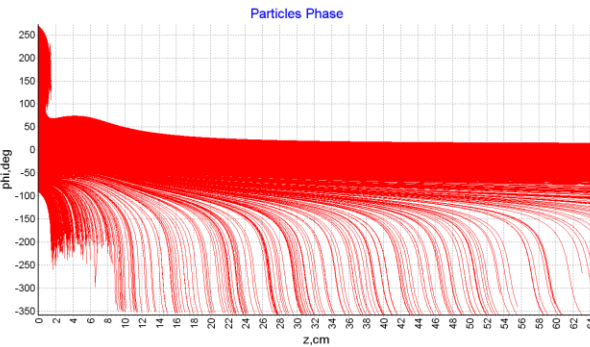
Результаты расчетов известных ускорителей говорят о том, что созданная программа дает результат, лежащий в пределах погрешности измерений выходных параметров ускорителя, и, соответственно, может быть успешно использована на практике.

Одним из преимуществ данной программы по сравнению с аналогами является наличие в ней элементов синтеза характеристик ускорителя. Программа позволяет в автоматическом режиме подбирать параметры ячеек так, чтобы на выходе достичь требуемой энергии. Такая возможность имеется как для структуры с постоянным импедансом, так и для структуры с постоянным градиентом, причем в последнем случае программа выбирает размеры ячеек так, чтобы реальная амплитуда электрического поля с учетом потерь в стенках и нагрузки током оставалась постоянной. Это становится возможным благодаря наличию в программе функции автоматического определения параметров ячеек по величине фазовой скорости волны и напряженности поля с помощью экспериментальных таблиц.

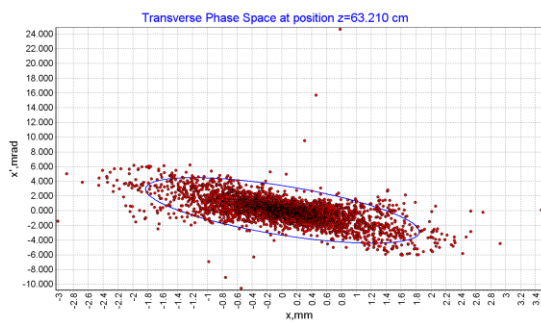
Среди достоинств программы стоит отметить удобный интерфейс ввода и вывода данных. Привычная для ОС Windows графическая оболочка облегчает пользователю работу с программой и уменьшает время, требуемое на ее освоение. Созданная программа является удобным и достаточно точным средством анализа и синтеза линейных ускорителей электронов на бегущей волне.



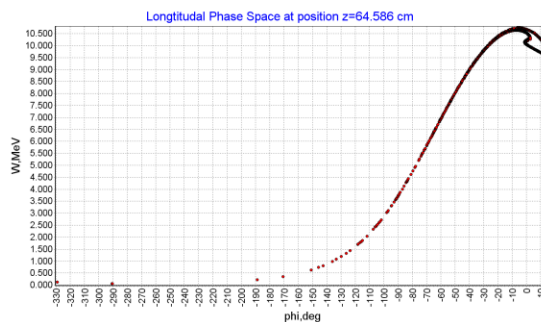
а) зависимость энергии частиц по длине ускорителя



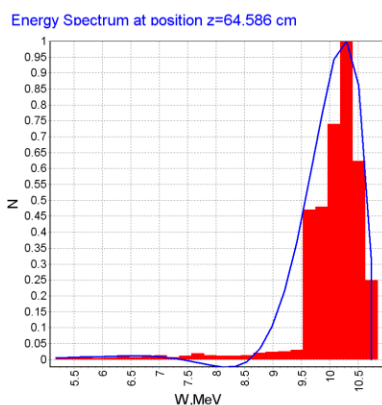
б) зависимость фазы частиц по длине ускорителя



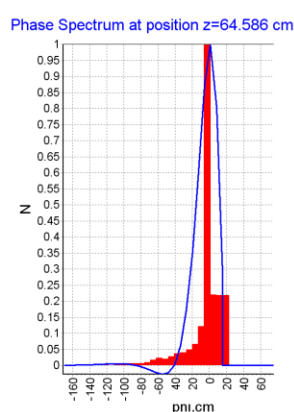
г) поперечный эмиттанс на выходе



д) продольный эмиттанс на выходе



е) энергетический спектр на выходе



ж) фазовый спектр на выходе

Рис.4 Основные параметры пучка на выходе ускорителя 10 МэВ

Как и в случае ускоряющей структуры со стоячей волной, при разработке источников тормозного излучения предлагается использовать схему с двумя ускорителями, работающими в дуальном режиме 5/10 МэВ и 15/20 МэВ. Перестройка энергии осуществляется увеличением нагрузки током. Питание ускорителей осуществляется от клистрона с выходной импульсной мощностью 4.5 МВт на частоте 5712 МГц.

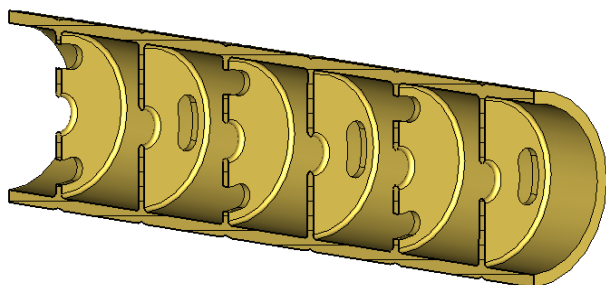
Волноводный группирователь с переменными параметрами при наличии внешнего фокусирующего магнитного поля с индукцией 0.09Тл позволяет захватить в режим ускорения 70-75% частиц, что в 1.5 раза больше чем в случае ускорителей со стоячей волной. Использование структуры с постоянным градиентом на основе КДВ делает ускоритель более коротким. Другим важным выходным параметром пучка является ширина энергетического спектра, которая остается на уровне 10%. Основные зависимости параметров пучка в данном ускорителе представлены на рис.4.

Таким образом, ускоритель с бегущей волной выигрывает у ускорителя на стоячей волне по такому параметру как коэффициент захвата, однако ширина энергетического спектра по-прежнему остается значительной. Решением этой проблемы может стать разработка такой ускоряющей системы, которая объединяла бы достоинства обеих схем.

Наиболее распространенной ускоряющей структурой в ускорителях на бегущей волне является круглый диафрагмированный волновод. Среди его преимуществ можно отметить высокое шунтовое сопротивление и простоту изготовления. В ускорителях со стоячей волной часто используется бипериодическая ускоряющая структура, шунтовое сопротивление которой больше чем в КДВ за счет значительного сокращения длины ячеек связи. При этом за счет магнитной связи можно создать структуру с большим коэффициентом связи.

Режимы стоячей и бегущей волн имеют свои преимущества и недостатки. Разработка комбинированного ускорителя с группирователем со стоячей волной и ускоряющей секцией с бегущей волной позволяет объединить преимущества обеих структур. Так группировка осуществляется на более коротком промежутке, нет необходимости использования фокусирующего соленоида и циркулятора. Другой возможностью объединения достоинств КДВ и БУС является разработка структуры типа КДВ со связью по магнитному полю (КДВ-М).

В четвертой главе представлены результаты оптимизации параметров структуры типа КДВ-М и сравнение ее ЭДХ с КДВ, приводятся результаты измерений параметров ячеек и рассматриваются вопросы, связанные с влиянием высших типов волн и мультипакторного разряда.



а) структура типа КДВ-М

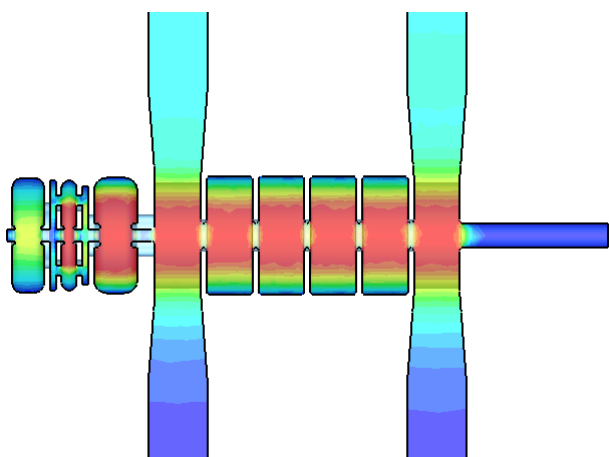


б) алюминиевые ячейки КДВ-М

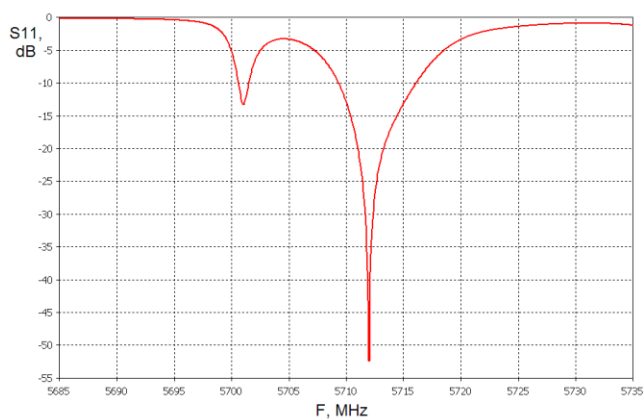


в) собранный макет

Рис.5 Измерительный комплекс



а) распределение амплитуды поля в ячейках



б) зависимость S_{11} от частоты

Рис.6 Результаты настройки ввода мощности в гибридную структуру

Результаты измерений параметров резонансного макета (рис.5), состоящего из трех ячеек КДВ-М, хорошо согласуются с результатами численного моделирования, выполненного с помощью трехмерной программы CST Microwave Studio, как для основной, так и для высших типов волн.

Разработана методика расчета динамики в гибридных схемах ускорителей. Результаты расчетов гибридного ускорителя на основе КДВ показывают, что ускоритель с такой схемой обладает наиболее узким энергетическим спектром среди других схем при небольшой длине ускорителя и приемлемом коэффициенте захват частиц. Кроме того, к преимуществам такой схемы можно отнести ее конструктивное удобство, поскольку она не требует наличия соленоида и циркулятора.

Ввод мощности в гибридный ускоритель на основе КДВ-М (рис.6) осуществляется в последнюю ячейку ускоряющей секции, а вывод из первой ячейки той же секции. В случае КДВ роль данных ячеек меняется на противоположную.

Для расчета динамики частиц в ускоряющей секции на основе КДВ-М были внесены необходимые дополнения и изменения в код созданной программы, а также разработана методика расчетов динамики в режиме обратной волны. Результаты расчетов показывают, что такой ускоритель имеет наименьшую длину среди всех возможных вариантов. К сожалению, из-за необходимости иметь значительную напряженность поля в первой ячейке, а значит и мощность, идущую в нагрузку, КПД такого ускорителя небольшой, а выходные параметры пучка в низкоэнергетичном режиме гораздо хуже, чем в высокоэнергетичном из-за сильной нагрузки током. Этот факт делает нецелесообразным применение такой схемы в случае ускорителя с энергией 20 МэВ.

В табл.1 приводится сравнение всех рассмотренных в данной работе ускоряющих схем ускорителя с энергиями 5/10 МэВ. Из этой таблицы можно сделать вывод, что наименьшая длина ускорителя получается при использовании гибридной схемы на основе КДВ-М за счет более короткого группирователя и лучших ЭДХ ячеек типа КДВ-М. Благодаря использованию соленоида и волноводного группирователя с переменными параметрами ускоритель на бегущей волне имеет лучший коэффициент захвата частиц в режим ускорения. Наименьшая ширина энергетического спектра достигается при использовании гибридной схемы на основе КДВ за счет того, что частицы после группирователя попадают в наиболее благоприятную фазу ускоряющей

волны. Это можно обеспечить при соответствующей настройке устройства ввода мощности. Наконец, ускоритель на стоячей волне обладает наибольшим КПД поскольку в нем отсутствует мощность, идущая в нагрузку.

Таблица 1. Основные характеристики различных схем ускорителя на 10 МэВ (в скобках для режима 5МэВ)

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>			
	Стоячая волна	Бегущая волна	Комбинированный	
Режим работы	БУС	КДВ	БУС + КДВ	БУС + КДВМ
Ускоряющая структура	БУС	КДВ	БУС + КДВ	БУС + КДВМ
Тип секции		постоянный градиент	постоянный градиент	постоянный импеданс
Длина, см	71	67	64	58
Выходной ток, мА	207 (570)	202 (608)	196 (420)	192 (450)
Коэффициент захвата, %	50 (44)	71 (70)	58 (41)	55 (44)
Энергетический спектр, %	28 (44)	10 (18)	3 (6)	12 (38)
КПД, %	51	45	43	40
Мощность генератора, МВт	4.5			

Таким образом, учитывая все достоинства и недостатки ускорителей, в том числе и при работе в дуальном режиме, рекомендуется применять гибридную схему ускорителя с ускоряющей структурой на основе КДВ-М в ускорителе на 10 МэВ. Выбор в пользу этой структуры сделан благодаря применению структуры с постоянным импедансом, а значит большей простотой настройки и эксплуатации установки. Однако структура на основе КДВ с постоянным градиентом обладает лучшими выходными параметрами пучка, что в некоторых случаях может быть важнее простоты конструкции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- Проведен расчет динамики и геометрии ускоряющей секции на основе ячеек бипериодической ускоряющей структуры для ускорителя с перестройкой энергии с 10 МэВ до 5 МэВ, используемого в качестве источника тормозного излучения в российско-американском проекте “All Secure”. Питание секций ускорителя осуществляется от клистрона с импульсной мощностью 4.5 МВт на частоте 2856 МГц. Разработанная структура применена в ускорителе, который создан, успешно протестирован и в настоящее время используется фирмой “ScanTech Sciences, LLC”.

- Создана программа, позволяющая рассчитывать динамику электронов в волноводных ускоряющих структурах. Программа позволяет учитывать такие эффекты как влияние сил пространственного заряда, нагрузку током, а также влияние внешнего фокусирующего магнитного поля. Программа обеспечивает возможность автоматического определения размеров ячеек по известным значениям фазовой скорости и нормированной напряженности электрического поля. С помощью программы можно осуществлять поиск оптимальных параметров ячеек УС по заданным выходным параметрам пучка. Программа позволяет рассчитывать динамику частиц в режиме обратной волны. Результаты вычислений с помощью программы находятся в согласии с экспериментальными данными существующих установок. Программа позволяет упростить процесс разработки ускоряющих структур на начальных этапах.

- Разработана ускоряющая структура типа круглого диафрагмированного волновода со связью ячеек по магнитному полю, работающая в режиме обратной волны. Оптимизированы параметры ячеек данного типа с целью получения наилучших электродинамических характеристик, а именно более высокого значения шунтового сопротивления, коэффициента связи между ячейками и групповой скорости по сравнению с классическим круглым диафрагмированным волноводом. Исследовано влияние волн высших типов на динамику частиц. Изучены вопросы недопущения возникновения мультипакторного разряда в структуре. Проведены измерения параметров ячеек КДВ-М на резонансном макете. Результаты измерений с хорошей точностью совпадают с расчетными данными.

- Разработана методика расчета динамики в комбинированной ускоряющей структуре, состоящей из группирователя, работающего в режиме стоячей волны, и ускоряющей секции, работающей в режиме бегущей волны (прямой или обратной).

- Разработаны и рассчитаны различные схемы ускорителей, предложенных автором в рамках усовершенствования комплекса “All Secure”. Предложены и обоснованы схемы инспекционных установок с двумя ускорителями, каждый из которых работает в дуальном энергетическом режиме на энергиях 5/10 и 15/20 МэВ. Предлагаемая установка обеспечит повышение чувствительности по определению атомных номеров в веществах, входящих в состав композитных материалов.

- Рассмотрены четыре схемы ускорителей: со стоячей или с бегущей волнами, и комбинированные на основе круглого диафрагмированного волновода с электрической или магнитной связью между ячейками. По результатам сравнительного анализа схем ускорителей определены области оптимального применения каждой из них. Полученные расчетные результаты показали, что ускорители электронов, работающие в С-частотном диапазоне при заданных выходных характеристиках пучка, имеют существенно меньшие габариты и массу относительно ускорителей, работающих в S-частотном диапазоне.

Основные результаты работы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Kutsaev S. V.**, Sobenin N. P., Smirnov A. Yu. et al. Design of hybrid electron linac with standing wave buncher and travelling wave accelerating structure // Nuclear Instruments and Methods A. 2011. doi:10.1016/j.nima.2011.01.047. 18 p.

2. Завадцев А. А., Завадцев Д. А., **Куцаев С. В.** и др. Система Инспекции грузов на основе дуального линейного ускорителя электронов // Приборы и Техника Эксперимента. 2011. №2. с. 151-159.

3. **Kutsaev S. V.** Electron dynamics simulations with Hellweg 2D code // Nuclear Instruments and Methods A. 2010. № 618. p. 298-305.

4. **Kutsaev S. V.**, Sobenin N. P., Zavadtsev A. A. и др. Magnetic Coupled Accelerating Structure // Problems of Atomic Sciences and Technology, Series “Nuclear Physics Investigations”. 2009. №.67. p. 48-51

5. Gusarova M. A., **Kutsaev S. V.**, Lalayan M. A. et al. Multipactor Discharge Simulations in Accelerating Cavities Considering External Magnetic Field //

Problems of Atomic Sciences and Technology, Series “Nuclear Physics Investigations”. 2009. №.66. p. 71-73.

6. Nikolskiy K. I., **Kutsaev S. V.**, Sobenin N. P. Travelling Wave Electron Linac for Synchrotron Injector // Труды конференции PAC’11 [электронный ресурс], New York, USA. 2011.

URL: http://appa.fnl.gov/pls/pac11/JACoW.print_abstract?abs_id=1821 (Дата обращения: 10.01.2011).

7. **Kutsaev S. V.**, Sobenin N. P., Nikolskiy K. I. Hybrid Electron Linac with a Magnetic Coupled Accelerating Structure Design // Труды конференции PAC’11 [электронный ресурс], New York, USA. 2011. URL: http://appa.fnl.gov/pls/pac11/JACoW.print_abstract?abs_id=1822 (Дата обращения: 10.01.2011).

8. Sobenin N. P., **Kutsaev S. V.**, Smirnov A. Yu. et al. C-Band Magnetic Coupled Accelerating Structure Optimization // Труды конференции LINAC’10. Tsukuba, Japan. 2010. p. 254-257.

9. Sobenin N. P., **Kutsaev S. V.**, Smirnov A. Yu. et al. Magnetic Coupled Disk-Loaded Waveguide // Труды конференции RuPAC’10. Протвино. 2010. p.319-321.

10. **Kutsaev S. V.** Hellweg 2D Code for Electron Dynamics Simulations // Труды конференции IPAC’10. Kyoto, Japan. 2010. p. 1841-1843.

11. Ferderer M., Zavadtsev A., **Kutsaev S.** et al. Dual-Energy Linac for Cargo Inspection System // Труды конференции PAC’09. Vancouver, Canada. 2009. p. 1378-1380.

12. **Kutsaev S. V.**, Sobenin N. P., Ferderer M. et al. Accelerating Structure for C-Band Electron Linear Accelerator Optimization // Труды конференции LINAC’08. Vancouver, Canada. 2008. p 921-923.

13. Sobenin N. P., **Kutsaev S. V.**, Zavadtsev A. A. et al. Accelerating Structure For C-Band Electron Linear Accelerator // Труды конференции RuPAC’08. Звенигород. 2008. p. 212-214.

14. Zavadtsev A. A., Zavadtsev D. A., **Kutsaev S. V.** et al. Compact Electron Linear Accelerator Relus-5 for Radiation Technology Application // Труды конференции EPAC’06. Edinburgh, Scotland. 2006. p.2385-2387.