

На правах рукописи

Проскин Станислав Сергеевич

**Источники мощного тормозного излучения на основе эффективных  
ускоряющих систем линейных ускорителей электронов**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Автор:



Москва 2015

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель:  
Щедрин Игорь Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,  
руководитель Малой ускорительной  
лаборатории НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:  
Шведунев Василий Иванович

доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный  
сотрудник Научно-исследовательского  
института ядерной физики им. Д.В.  
Скобельцина Московского  
государственного университета им.  
М.В. Ломоносова

Завадцев Александр Алексеевич

кандидат технических наук,  
генеральный директор ООО  
«Наноинвест»

Ведущая организация:

Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Научно-  
производственное предприятие  
«Торий»

Защита диссертации состоится 2 декабря 2015 г. в 14 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д 212.130.01.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " 2015 г.

И. о. ученого секретаря  
диссертационного совета



Масленников С. П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы исследования

Безопасность, здравоохранение, энергетика и экология – столкновение с такими вызовами человечества XXI века и овладение приносимыми ими возможностями определит формы будущего мира. Наука и техника ускорителей заряженных частиц (далее ускорителей) вносит огромный вклад в успех этого формирования. За последние 60 лет, кроме установок, задействованных в научных исследованиях, произведено более 24000 ускорителей для применения в промышленности и свыше 11000 ускорителей, успешно работающих в области лучевой терапии. Объем рынка продуктов, произведённых с помощью ускорителей, ежегодно превышает 500 млрд. дол. США [1].

Наряду с увеличением количества ускорителей на высокие энергии, прослеживается тенденция к росту числа компактных линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) на небольшие энергии. Особенно востребованы ЛУЭ на энергии до 10 МэВ. При таких значениях энергии частиц не наблюдается явление наведённой радиоактивности для большинства металлов [2]. Повышенный интерес обусловлен расширением области применения ЛУЭ. Высокая эффективность этих устройств, а также их относительная простота и относительная дешевизна позволяют использовать ЛУЭ во многих технологических процессах. В выключенном состоянии ускорители совершенно безопасны и не представляют никакой опасности в радиационном отношении, что позволяет осуществлять их оперативное техническое обслуживание. В случае применения ЛУЭ в установках для интраоперационной лучевой терапии нет необходимости устанавливать ускорители в помещения со специальной радиационной защитой при условии соблюдения определенной частоты операций, соответствующей нормам облучения персонала и пациентов.

Можно выделить следующие наиболее востребованные отрасли применения ЛУЭ различных энергий и характеристик пучка в медицине и промышленности:

- Лучевая терапия.
- Неразрушающий контроль внутренней структуры объектов и инспекция опасных грузов.
- Обработка материалов: электронная сварка, резка, сверление; температурная обработка; плавление и литье.
- Облучение материалов: сшивание полимеров; стерилизация медицинских инструментов, семян и почвы, человеческих тканей; лучевая обработка пищевых продуктов, очистка газов, переработка ядерных отходов, термообработка композитов и т. д., – в последнее время области применения ЛУЭ значительно расширяются.

Требования к ускорителям в каждой из прикладных областей могут различаться. Важным требованием к установкам инспекции и неразрушающего контроля является их эффективность, а также чувствительность по выявлению внутренних дефектов, существенно влияющих на надежность изделия и долговечность его эксплуатации. Для инспекции ключевым направлением исследований является увеличение мощности пучка и сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов, повышение градиента ускоряющего поля и сокращение издержек на производство.

В последние 15 лет хорошо зарекомендовало себя новое направление лучевой терапии – интраоперационная электронная лучевая терапия (ИОЭЛТ) – метод борьбы с опухолями посредством подведения пучка электронов непосредственно к опухоли или ложу опухоли во время хирургической операции. ИОЭЛТ используется для лечения опухолей, которые сложно удалить хирургически, или если есть подозрение на микроскопические остатки опухоли после ее удаления хирургическим путем. Существуют клинические исследования, подтверждающие успешность применения ИОЭЛТ в лечении рака легких,

простаты, кишечника, шеи и головы, яичников, поджелудочной железы, спинного мозга, нейробластомы и саркомы независимо от других методов лечения или в сочетании с ними, например, с дистанционной лучевой терапией, химиотерапией и другими методами [3].

Разработки новых ЛУЭ для медицины сосредоточены на повышении надежности, улучшении ускоряющих структур и систем контроля пучка, а также уменьшении размеров установки. Медицинские ускорители требуют высокой мощности пучка в масштабах компактных ЛУЭ для медицины, критичны к надежности и предъявляют всё большие требования к компактности и мобильности.

Актуальность работы заключается в развитии установок для лучевой терапии, инспекции и неразрушающего контроля объектов, а также для других областей промышленности, требующих применения эффективных линейных ускорителей электронов. Необходимо остановить рост онкологических заболеваний не только в развитых, но и в развивающихся странах путем снижения затрат на лучевую терапию, способствуя все более широкому ее распространению. В связи с увеличением объемов движения грузов инспекционные установки должны увеличивать эффективность поиска запрещенных объектов, быть более простыми и компактными. В дополнение, законодательства стран изменяются, благоприятствуя развитию передвижных инспекционных комплексов, призванных повседневно защищать нашу жизнь от различных угроз. Появляются новые отрасли применения прикладных компактных ускорителей. Таким образом, задача улучшения эффективности ускоряющих систем компактных линейных ускорителей электронов крайне востребована.

## **Цели работы**

Разработка ускоряющей структуры для улучшения характеристик компактного линейного ускорителя электронов, используемого в установке интраоперационного электронного облучения пациентов, с регулируемой

энергией 4-12 МэВ и питанием от СВЧ генератора с импульсной мощностью до 2 МВт на частоте 9,3 ГГц.

Разработка ускоряющих структур с интенсивными пучками для компактных ЛУЭ нового поколения, которые могут быть использованы в медицине, инспекции, неразрушающем контроле и для решения прочих практических задач.

### **Задачи работы**

Расчёт и оптимизация ускоряющих структур со стоячей волной трёхсантиметрового диапазона длин волн для использования в установках, применяющихся в перспективных областях медицины и промышленности.

### **Научная новизна работы**

Разработаны новые эффективные ускоряющие системы ЛУЭ. Предложены улучшения в геометрии ускоряющих структур и в технологических процессах создания ускорителей. Создан новый, улучшенный образец коммерческой ускоряющей системы ЛУЭ для системы интраоперационного электронного облучения пациентов, который на сегодняшний день успешно испытан на работающей установке Mobetron производства компании IntraOp Medical [3] и установлен в отделении лучевой терапии. Разработка запущена в производство компанией Radmedex LLC [4].

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Рассчитанная бипериодическая ускоряющая структура (БУС) линейного ускорителя электронов на 4-12 МэВ с регулируемой энергией для нового поколения ИОЭЛТ, производимая компанией Radmedex LLC для установки Mobetron, производимой, в свою очередь, компанией IntraOp Medical, повысит эффективность интраоперационной электронной лучевой терапии пациентов.

Проведены успешные испытания и приемка ускорителя. На сегодняшний день произведено более 50 установок Mobetron, успешно работающих в онкологических клиниках и излечивших более 25000 пациентов в 13 странах.

Рассчитанные с целью улучшения эксплуатируемых ЛУЭ бипериодические ускоряющие структуры с высокими токами на энергии 1 МэВ и 6 МэВ, работающие на частоте 9,3 ГГц, могут быть использованы в ускорителях, применяющихся в установках лучевой терапии, инспекции грузов, неразрушающего контроля сооружений, мобильных платформах мониторинга опасных веществ на территории городов и других областях промышленности.

### **Поддержка работы научными грантами**

Разработка ускорителя на энергию 4 МэВ (с использованием современных клистронов и магнетронов различных длин волн) для получения мощного тормозного излучения электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне. В рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 гг., ГК П433.

Разработка ускорителя на 15 МэВ с током до 1 кА и длительностью импульса порядка 1 нс. В рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 гг., ГК П1222.

Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы» 2009-2010, НИР 1.49.09.

Госзаказ Министерства образования и науки Российской Федерации, тема №00-Г-611-4056.

Стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2012-2014 гг.

## **Положения, выносимые на защиту**

- Результаты численного моделирования параметров ускоряющей структуры для нового ускорителя, предназначенного для работы в установке для ИОЭЛТ Mobetron. Среди важных усовершенствований параметров установки: уменьшена длина, снижен вес и улучшены параметры пучка на выходе коллиматора как следствие модернизации ускорителя.

- Результаты оценки фонового излучения от разработанного ускорителя. Подтверждена относительная безопасность ускорителя для пациентов и персонала.

- Результаты настройки ячеек и секций разработанного ускорителя. Ускоритель успешно создан и настроен на низком уровне мощности.

- Результаты испытаний созданного ускорителя, интегрированного в установку Mobetron. Получены соответствующие медицинскому применению дозовые характеристики.

- Модели компактных ускоряющих структур ЛУЭ для промышленности и медицины на энергии 1 МэВ и 6 МэВ, рассчитанные с использованием новой геометрии ячеек.

## **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях, в частности на:

- Международной конференции «XXII International Workshop on Charged Particle Accelerators»: Алушта, Украина, 8-14 сентября 2013 года.

- Международной конференции «IV International Particle Accelerator Conference»: Шанхай, Китай, 12-17 мая 2013 года.

- Международной конференции «XXIII Russian Particle Accelerator Conference»: Санкт-Петербург, Россия, 24-28 сентября 2012 года.



- Международной конференции «III International Particle Accelerator Conference»: Новый Орлеан, США, 20-25 мая 2012 года.

- Конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника – 2011»: Судак, Украина, 15-24 сентября 2011 года.

- «Научных сессиях НИЯУ МИФИ» в 2009-2015 годах.

Результаты разработки улучшенного ускорителя для установки Mobetron представлены на семинарах в компании IntraOp Medical (США) и Radmedex LLC (США), являющейся разработчиком и изготовителем ускоряющих структур для системы Mobetron и финансировавшей данную разработку.

## **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах, из которых 4 статьи – в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ, 6 статей опубликованы в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, 3 работы являются патентами Российской Федерации на полезную модель.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы, включающего 102 наименования. Содержание диссертации изложено на 106 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 13 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** обоснована актуальность и прикладное значение диссертации, обозначены цели и задачи работы.

В **первой главе «Компактные линейные ускорители электронов для промышленности и медицины»** представлен обзор работающих установок, применяющихся в промышленности и медицине и основанных на компактных

ЛУЭ. Особое внимание уделено ускорителям со стоячей волной, работающих в 3 см диапазоне длин волн, так как в качестве ускоряющих структур, рассматриваемых и разрабатываемых в рамках данного исследования, выбраны бипериодические ускоряющие структуры 3 см диапазона. Создание линейных ускорителей электронов 3 см диапазона обусловлено тем, что переход в более коротковолновый диапазон позволяет значительно сократить, прежде всего, радиальные габариты, общие габариты установки и массу. При этом появляются разработки, позволяющие получить мощность дозы пучка в 3 см не ниже, чем в 10 см диапазоне [5].

В главе приводится история развития установок для ИОЭЛТ, сравнение ИОЭЛТ с другими методами лучевой терапии, обзор действующих ускорителей и разработок, предназначенных для применения в ИОЭЛТ. Исследуется принципиальная схема формирования пучка в установках для ИОЭЛТ.

Различают несколько способов интраоперационного подведения излучения к пораженным тканям: помещение радиоактивного источника внутрь опухоли (брахитерапия), использование гамма-источников на низкие энергии (до 50 кВ) и электронных ускорителей на энергии до 12 МэВ [6]. На сегодняшний день большинство онкологических клиник России оснащены рентгеновскими трубками, многие центры имеют аппараты для брахитерапии. Однако интраоперационная лучевая терапия, которая использует пучки электронов, считается более оправданным и перспективным методом лечения. В отличие от рентгеновских трубок установки для ИОЭЛТ позволяют получать высокую равномерность дозы излучения и значительно сократить время облучения пациента. По сравнению с гамма-излучением электроны высоко эффективны на глубине проникновения порядка нескольких сантиметров, что позволяет удалять остатки опухоли и очень хорошо бороться с такими злокачественными образованиями, как рак кожи. В отличие от установок протонной и электронной дистанционной терапии компактные ИОЭЛТ комплексы гораздо более выгодны экономически. Такие комплексы также более безопасны для пациента, поскольку

здоровые ткани человека во время проведения сеанса интраоперационной электронной лучевой терапии получают облучение на порядки меньше, чем во время сеанса традиционной дистанционной лучевой терапии, лучевой терапии с модуляцией интенсивности (когда опухоль облучается со всех сторон пучками разной интенсивности) или брахитерапии (когда внутрь пораженного органа помещается радиоактивный источник). Клинические исследования показали, что на сегодняшний день ИОЭЛТ является лучшим способом борьбы с раком груди и кожи [3].

Среди установок для ИОЭЛТ наибольшее развитие в мире получил аппарат Mobetron. Последние два десятка лет по всему миру используется более 50 установок Mobetron, с помощью которых десятки тысяч пациентов по всему миру излечились от рака [3]. Установки для ИОЭЛТ на основе ЛУЭ выпускает также компания Sordina IORT Technologies в Италии [7]. Исследования по разработке эффективных ЛУЭ для ИОЭЛТ активно ведутся в США, Европе, России и других странах.

В главе также рассматриваются современные генераторы и усилители СВЧ диапазона частот, используемые в компактных прикладных ускорителях.

Разработка вышеописанных установок является важной и актуальной задачей, стоящей перед учёными и инженерами.

**Вторая глава «Методы и программы, использованные при проектировании ускоряющих структур»** посвящена рассмотрению электродинамического подхода к расчету основных параметров ускоряющих структур ЛУЭ со стоячей волной на основании различных моделей. Из рассмотренных во второй главе выражений следует, что, в приближении точечного сгустка доля энергии, полученной ускоряемым пучком при ускорении в структуре, питаемой СВЧ генератором, не превышает определенной величины, достигающей своего предельного значения в случае идеального согласования СВЧ тракта с ускоряющим резонатором. Однако для более корректного и точного численного

моделирования динамики пучка в структуре необходимо учитывать внутренние степени свободы частиц в сгустке и изменение амплитуды гармоники тока.

Рассмотрены алгоритмы, которые используются в распространенных пакетах программного обеспечения для численного моделирования динамики пучка: HOMDYN, MAFFIA, BEAMPATH, ASTRA, TREDI, PARMELA, BEAMDULAC, DINA и т. д. С помощью данных программ было разработано большинство действующих ускорителей. Выяснено, что, несмотря на использование различных алгоритмов и допущений, результаты работы таких программ соотносятся друг с другом в допустимых пределах.

**В третьей главе «Линейный ускоритель для интраоперационной электронной лучевой терапии»** представлены результаты разработки улучшенного ускорителя на основе бипериодической структуры 3 см диапазона с регулируемой энергией 4-12 МэВ для установки Mobetron. Приведены результаты численного моделирования полей и динамики пучка в структуре, что позволило оптимизировать геометрию и последовательность ячеек с точки зрения повышения шунтового сопротивления, коэффициента токопрохождения электронного пучка и особенностей настройки ускорителя. Оценен фон излучения от ускорителя, что позволило сделать выводы о безопасности разработанного ускорителя для пациента и персонала. Приведены результаты настройки созданной системы и испытаний интегрированного в установку Mobetron ускорителя. Рассмотрены технические особенности разработки и изготовления подобных ускоряющих структур. Выполнено сравнение результатов численного расчета электродинамических параметров разработанной ускоряющей структуры с измеренными экспериментальными характеристиками.

Была смоделирована геометрия ускоряющей ячейки и ячейки связи (рис. 1) для разных фазовых скоростей в диапазоне  $\beta=0,3-1,0$ . Из полученных ячеек сформированы две секции ускорителя, разделенные дрейфовым промежутком. Такая конфигурация необходима для получения разных режимов работы Mobetron с регулируемой энергией.

Поскольку рассматриваемая ускоряющая структура не является аксиально-симметричной, ускоряющая ячейка и ячейка связи моделировались отдельно, а влияние щели связи на частоты ячеек было определено с помощью дополнительного модуля SF8, входящего в пакет программ SUPERFISH. В результате расчета также были найдены расчетные вариационные характеристики: зависимости рабочей частоты ускоряющей ячейки и ячейки связи от изменений размеров ячейки связи, трубки дрейфа в ускоряющей ячейке и поперечных размеров щели связи. Пример расчета показан на рис. 1.

Результаты моделирования динамики пучка электронов в разработанной секции показаны на рис. 2. Для получения режимов работы ускорителя на энергии 6 МэВ и 9 МэВ во вторую секцию передается несколько меньшая СВЧ мощность от генератора. Режим работы 4 МэВ получается с помощью смещения фазы поля во второй секции.

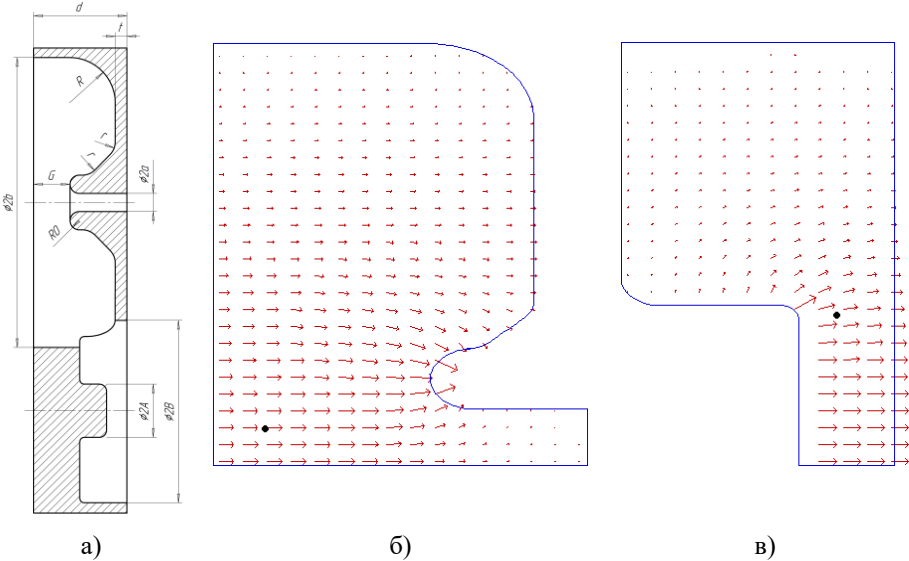


Рис. 1. Схематическое изображение половины ускоряющей ячейки и ячейки связи (а); пример моделирования ускоряющей ячейки (б) и ячейки связи (в).

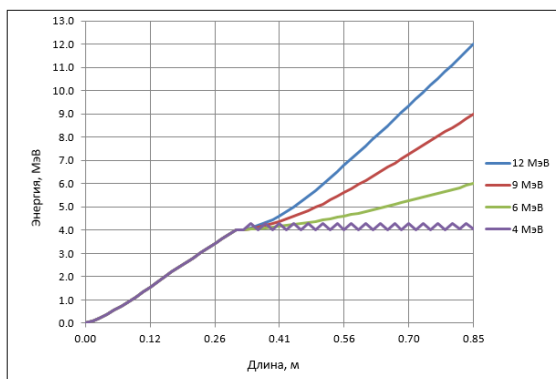


Рис. 2. Средняя энергия электронного пучка.

Оптимизация по коэффициенту токопрохождения при учете энергии частиц позволила провести заключительные изменения в геометрии ячеек и их распределении вдоль ускорителя. Удалось достичь максимально возможного при заданных условиях коэффициента токопрохождения в первой секции и в группирователе без использования магнитной фокусирующей системы. Ускоритель обеспечивает достаточное токопрохождение (от 11,9% до 15,5%) для использования в установке для ИОЭЛТ. Так как одной из основных целей при разработке ускорителя является максимальное снижение веса системы, магнитная фокусирующая система не используется.

Недостатком ускорителя, установленного в предыдущей версии Mobetron, является большая потеря ускоряемых частиц в ускоряющем канале, что, в свою очередь, вызывает значительный радиационный фон. Поскольку при оптимизации геометрии ускоряющей структуры необходимо было также добиться уменьшения радиационного фона и, соответственно, снизить вес ускорителя с защитой, рассчитывались значения мощности дозы в направлении, перпендикулярном оси ускорителя.

На рис. 3. Показан пример оценки мощности дозы излучения для энергии 12 МэВ в направлении, перпендикулярном движению пучка на расстоянии 1 м от источника. При этом учитываются медные стенки и 1 см свинцовой защиты.

Полученные значения с учетом погрешностей и ограничения на количество сеансов лечения находятся в пределах норм радиационной безопасности. Более того, величина радиационного фона от ускорителя на 1-2 порядка меньше мощности дозы вторичного излучения на расстоянии 1 м от места облучения. Выполненная предварительная оценка радиационного фона подтверждает относительную безопасность разработанного ускорителя в случае его применения в медицине, в частности, в ИОЭЛТ.

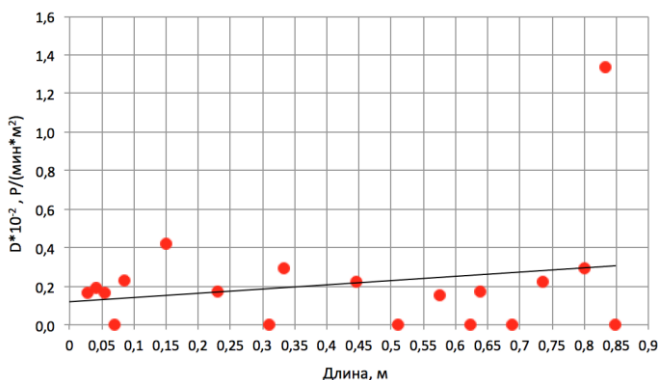


Рис. 3. Фон тормозного излучения в направлении, перпендикулярном пучку, при использовании свинцовой защиты толщиной 1 см.

По результатам расчетов были изготовлены ячейки ускоряющих секций. Производилась настройка отдельных ячеек и спаянных секций на рабочую частоту. Измерение частот ячеек проводилось с помощью анализатора частот Agilent 8510C. В процессе измерения частот в первой изготовленной ячейке была выявлена расхожимость сдвига частот ускоряющей ячейки и ячейки связи под влиянием щели связи в сравнении с расчетными величинами приблизительно в 1,5 раза. Для исправления ошибки были скорректированы входные параметры в модуле SF8, который входит в пакет программ SUPERFISH и используется для расчета влияния щели связи на частоты ячеек. После чего было проведено повторное моделирование ускоряющей ячейки и ячейки связи с помощью

SUPERFISH. Это позволило в дальнейшем исключить лишние технологические операции при изготовлении ячеек. На полученных в заключении пайки и настройки секций круговых диаграммах полных сопротивлений видно, что весь ускоритель успешно настроен в пределах заданной рабочей частоты (рис. 4). Рабочая частота каждой ячейки отличается от рабочей частоты ускорителя в диапазоне  $\pm 5$  МГц, а между секциями разница составляет 20 кГц. Коэффициент стоячей волны в нагрузке (КСВН) равен 1,15 для первой секции и 1,05 для второй секции.

В таблице 1 сравниваются экспериментально измеренные параметры с результатами численного моделирования разработанной ускоряющей структуры. Большинство экспериментальных характеристик совпадает с расчетными в пределах 5%.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные характеристики ускорителя

Параметр	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
Рабочая частота F, МГц	9300	9306 $\pm$ 5
Добротность первой секции Q <sub>1</sub>	7601	6700 $\pm$ 5%
Добротность второй секции Q <sub>2</sub>	8936	7800 $\pm$ 5%
Эфф. шунт. сопр. R, МОм/м	106	100
Коэфф. связи в первой секции k <sub>1</sub> , %	3,85	3,70
Коэфф. связи во второй секции k <sub>2</sub> , %	3,80	3,66





Рис. 4. Круговая диаграмма сопротивлений ускоряющей структуры

Изготовленный ускоритель на 15,5 см короче ускорителя, установленного в предыдущей версии Mobetron. После полной сборки ИОЭЛТ системы в компании IntraOp Medical выяснилось, что уменьшение длины ускорителя и необходимой защиты позволило снизить общий вес новой системы на 30%. Испытания проводились с магнетроном РМ2000Х. Диапазон входной мощности составил 1-2 МВт в зависимости от того, в каком режиме энергии работал ускоритель. В качестве источника электронов для инъекции в ускоритель использовалась электронная пушка М-592 с напряжением инъекции 10-18 кВ.



Рис. 6. Макет ячейки ускорителя

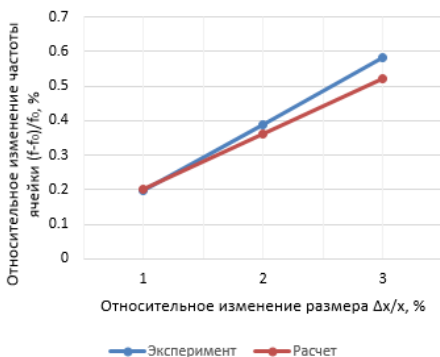


Рис. 5. Зависимость изменения частоты одной из ускоряющих ячеек от изменения высоты трубки дрейфа



Рис. 7. Две секции ускорителя после заключительной пайки

В результате измерений мощность дозы в водном фантоме на расстоянии 50 см от ускорителя в направлении движения пучка, равна 1-100 Гр/мин при токах электронного пучка порядка 0,1-10,0 нА, что соответствует медицинскому применению установки. Максимальная измеренная энергия излучения 13 МэВ, а средняя – 12 МэВ, что подтверждает результаты численного моделирования. Полученные длины пробега электронов в диапазоне от 25 до 65 мм полностью удовлетворяют исходным условиям задачи.

**Четвертая глава «Линейный ускоритель для неразрушающего контроля и инспекции»** посвящена расчёту компактных ускоряющих структур на основе бипериодической ускоряющей структуры 3 см диапазона для инспекции, неразрушающего контроля и других областей промышленности.

Современные технологии неразрушающего контроля требуют применения ускорителей с высоким током пучка, чтобы инспектировать объекты бóльшей толщины за более короткое время. Одним из основных требований для подобных разработок является мобильность. Именно для такого случая был выполнен численный расчет параметров ЛУЭ с энергией 1 МэВ и импульсным током пучка до 1 А.

В качестве ускоряющей структуры используется бипериодическая структура с боковыми ячейками связи и рабочей частотой 9,3 ГГц. Рассчитаны необходимые модели ячеек и проведён анализ перспективности компактного ускорителя на 1 МэВ.

На рис. 8 изображена расчетная зависимость средней энергии частиц в пучке от тока пучка при использовании мощности СВЧ питания 1 МВт. Геометрия ускоряющих ячеек и ячеек связи подобна используемой в ускорителе, описанном в главе 3. Для оптимизации геометрии увеличена апертура и скорректирован внутренний диаметр ячеек.

С помощью разработанной секции возможно получение довольно высоких токов порядка 900 мА при мощности источника порядка 1 МВт. Коэффициент токопрохождения электронного пучка без использования магнитной

фокусирующей системы достигает 58%. При использовании магнитной фокусирующей системы коэффициент токопрохождения равен порядка 75%. Ускоритель состоит из одной ускоряющей секции длиной менее 15 см. Результаты моделирования были сравнены со значениями, измеренными экспериментально на ускорителе, изготовленном компанией AS&E [5]. Действующий ускоритель также позволяет получать ток пучка до 1 А на энергии 1 МэВ. Теоретические результаты совпадают в пределах 5% с экспериментальными на энергии 1 МэВ. В диапазоне энергий 1,5-2,0 МэВ расчетный ток пучка превышает экспериментальный. Это может быть связано с оптимизацией геометрии разработанной структуры, однако однозначный ответ можно дать только после изготовления ускорителя. Разработанная модель может быть наиболее востребована в разработке компактных ускорителей для неразрушающего контроля объектов большой площади и толщины в случаях, когда существуют ограничения на энергию получаемого излучения не более 1 МэВ.

Рассчитан также односекционный ускоритель на 6 МэВ. Используется бипериодическая ускоряющая структура с боковыми ячейками связи и рабочей частотой 9,3 ГГц. В результате расчёта длина ускорителя не превышает 60 см. На рис. 9 изображена зависимость максимальной энергии частиц в пучке от тока пучка при использовании мощности СВЧ питания 1,5 МВт.

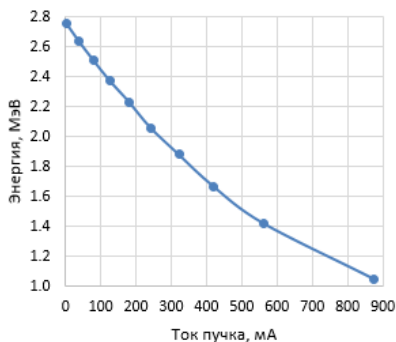


Рис. 8. Зависимость средней энергии от тока пучка в ускорителе на 1 МэВ

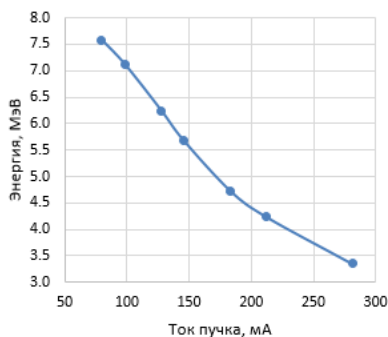


Рис. 9. Зависимость средней энергии от тока пучка в ускорителе на 6 МэВ.

В качестве генератора для разработанных ускорителей предлагается использовать магнетрон РМ2000Х, в качестве инжектора электронов – пушку М592. Длительность импульса – 4 мкс, максимальный коэффициент заполнения – 0,0008. Численное моделирование охлаждения систем не проводилось. По аналогии с действующим ускорителем, производимым компанией AS&E, средняя рассеянная мощность в разработанном ЛУЭ на 1 МэВ не должна превышать 1,2 кВт. В главе проведена оценка используемой мощности в ускорителе на 6 МэВ. Выявлено, что при заданных условиях средняя рассеянная мощность не будет превышать 1,5 кВт, что не вызовет трудностей с охлаждением структуры.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

Рассчитана новая улучшенная эффективная ускоряющая система линейного ускорителя электронов для медицинского применения. Выполнена оценка фонового излучения на расстоянии 1 м от ускорителя, что позволило сделать предварительные выводы о безопасности рассчитанной системы.

Ускоритель был изготовлен, настроен на низком уровне мощности и представлен компании IntraOp Medical Inc для испытаний в составе установки Mobetron. Испытания прошли крайне успешно. Благодаря созданному ускорителю ABC-12ER общий вес Mobetron уменьшился на 30%, улучшились показатели безопасности без ухудшения характеристик пучка.

Рассчитаны новые эффективные ускоряющие секции с использованием новой геометрии ячеек. Рассчитанная система длиной менее 15 см позволяет получить ток пучка до 1 А на энергии 1 МэВ. Рассчитана модель односекционного линейного ускорителя электронов длиной менее 60 см на энергию 6 МэВ и ток пучка до 150 мА. Ускорители востребованы для применения в широких областях промышленности, в том числе неразрушающем контроле и инспекции. Кроме высоких показателей эффективности, рассмотренные ускорители обладают значительной мобильностью.

Работа выполнена по просьбе администрации НИЯУ МИФИ для компании Radmedex LLC.

Автор благодарит своего научного руководителя, руководителя Малой ускорительной лаборатории НИЯУ МИФИ, к.т.н. Игоря Сергеевича Щедрина, а также основателя и президента компании Radmedex LLC, к.т.н. Андрея Валентиновича Мишина за плодотворные обсуждения по теме работы.

### **Список литературы, цитируемой в автореферате**

1. Hamm R. W., Hamm M. E. Industrial accelerators and their applications. World Scientific, Singapore, 2012, 421 p.
2. Барбье М. Наведенная радиоактивность в ускорителях // Труды Международной конференции по ускорителям, М.: Атомиздат, 1964, с. 1005.
3. Официальный сайт компании IntraOp Medical [Электронный ресурс]. URL:<http://intraopmedical.com/>.
4. Официальный сайт компании Radmedex LLC [Электронный ресурс]. URL:<http://radmedex.com/>.
5. Mishin A. V. Advances in X-band and S-band Linear Accelerators for Security, NDT, and Other Applications / Proceedings of PAC-2005, Knoxville, Tennessee, USA, 2005, p. 240-244.
6. Dobelbower R. R. Jr., Mitsuyuki A. Intraoperative Radiation Therapy. CRC Press, 1989, 432 p.
7. Официальный сайт компании Sordina IORT Technologies [Электронный ресурс]. URL:<http://soiort.com/>.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в журналах, включённых в перечень российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ:**

1. Дворников В. А., Жижин Е. Д., Кузнецов Р. Г., Кузьмин И. А., Кулаго А. П., Проскин С. С., Поляков И. В., Шалтырев В. А., Шалтырев К. А., Щедрин И. С.

Исследование физических процессов ускорения запасенной энергией предельных плотностей зарядов в секциях круглого диафрагмированного волновода // Ядерная физика и инжиниринг, т. 2, №1, 2011, с. 3-17.

2. Дворников В. А., Жижин Е. Д., Кузьмин И. А., Кулаго А. П., Проскин С. С., Поляков И. В., Шалтырев К. А., Шалтырев В. А., Силенко А. Н. Переходные процессы в линейных ускорителях электронов // Ядерная физика и инжиниринг, т. 2, №2, 2011, с. 139-142.

3. Дворников В. А., Жижин Е. Д., Кузьмин И. А., Кулаго А. П., Поляков И. В., Проскин С. С., Шалтырев В. А., Щедрин И. С. Нагрузка током в линейных ускорителях электронов // Ядерная физика и инжиниринг, т. 2, №5, 2011, с. 438-440.

4. Дворников В. А., Жижин Е. Д., Кузьмин И. А., Кулаго А. П., Поляков И. В., Проскин С. С., Шалтырев В. А., Щедрин И. С. Процессы при высоком и высокочастотном напряжении в вакууме ускоряющих структур линейных ускорителей электронов // Ядерная физика и инжиниринг, т. 3, №3, 2012, с. 243.

**Статьи в периодических научных изданиях, индексируемых Web Of Science и Scopus:**

5. Proskin S. S., Kulago A. P., Shchedrin I. S. Maximum Value of The Standing Wave and Traveling Wave Accelerating Structures Electronic Efficiency / Proceedings of RuPAC-2012, Saint Petersburg, 2012, p. 453-455.

6. Proskin S. S., Kulago A. P., Shchedrin I. S. Extreme Density Charge Electron Bunches / Proceedings of RuPAC-2012, Saint Petersburg, 2012. P. 456-457.

7. Proskin S. S., Dvornikov V. A., Kuzmin I. A., Kulago A. P., Shchedrin I. S. Study of physical processes of acceleration of electron bunches with extreme density by means of stored energy in disk loaded waveguide sections / Proceedings of IPAC-2012, New Orleans, USA, 2012, p. 3314-3316.

8. Proskin S. S., Dvornikov V. A., Kuzmin I. A., Shchedrin I. S. Electrodynamics in eLinacs // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Nuclear Physics Investigations, Volume 88 (Issue 6), 2013, p. 128-131.

9. Mishin A. V., Proskin S. S. New generation X-band linacs for medical and industrial application / Proceedings of IPAC-2013, Shanghai, China, 2013, p. 3741-3742.

10. Proskin S. S., Dvornikov V. A., Kuzmin I. A., Shchedrin I. S. Theory and Technics of Particle Acceleration Electrodynamics in eLinacs // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Nuclear Physics Investigations, Volume 93 (Issue 5), 2014, p. 136-139.

**Патенты Российской Федерации на полезную модель:**

11. Щедрин И. С., Селезнев В. Д., Проскин С. С. Линейный резонансный ускоритель электронов // Полезная модель. Патент РФ 20111151339 от 14.02.2012.

12. Щедрин И. С., Силенко А. Н., Проскин С. С. Линейный ускоритель электронов // Полезная модель. Патент РФ 20111149704 от 01.02.2012.

13. Щедрин И. С., Проскин С. С., Богачев И. А., Селезнев В. Д. Высокочастотная система резонансного ускорителя заряженных частиц // Полезная модель. Патент РФ 20111149710 от 01.02.2012.