На правах рукописи

Савин Евгений Александрович

# РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2017

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

| | |
|---|---|
| Научный руководитель: | **Собенин Николай Павлович,**<br>доктор технических наук, профессор,<br>профессор кафедры «Электрофизические установки» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» |
| Официальные оппоненты: | **Шведунов Василий Иванович,**<br>доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова<br><br>**Краснов Андрей Александрович**<br>кандидат технических наук, руководитель проекта АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации» |
| Ведущая организация: | АО «Научно-производственное предприятие «Торий» |

Защита состоится 17 мая 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. (495) 324-84-98.

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

Автореферат разослан «22» 03 2017 г.

И. о. учёного секретаря диссертационного совета — Масленников С.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации**

В современном мире большое внимание уделяется безопасности как от террористических угроз, так и от биологически опасных веществ, попадающих в организм человека через продукты питания, медицинские препараты и так далее. Отдельно стоящей областью современных исследований является разработка медицинских установок для лечения опухолей методом лучевой терапии. Для всех этих целей можно применять линейные ускорители электронов (ЛУЭ) на энергии от единиц до десятков МэВ. Наибольшее распространение в мире получили медицинские ЛУЭ с диапазоном энергий от 4 до 50 МэВ [1]. Для увеличения эффективности облучения раковых опухолей, которое сейчас по большей части проводится на ЛУЭ или циклических ускорителях протонов и ионов, большое внимание уделяется разработке ускоряющих структур, позволяющих использовать их в компактных линейных ускорителях протонов и ионов, которые имеют ряд преимуществ перед циклическими.

Промышленные ЛУЭ работают в диапазоне энергий 0.1-10 МэВ, из них для целей стерилизации продуктов используется диапазон 5-10 МэВ. Сейчас происходит активная интеграция линейных ускорителей электронов для стерилизации медицинского оборудования, так как процесс стерилизации электронным пучком в разы быстрее, чем гамма-излучением. Также большую эффективность имеет облучение продуктов питания (от фруктов до мясных продуктов) с помощью электронов или рентгеновского излучения, полученного с помощью ЛУЭ.

ЛУЭ с перестройкой энергии внутри диапазона 2.5-10 МэВ используются в досмотровых комплексах и дефектоскопии. Основными требованиями к таким ЛУЭ является надёжность, эффективность, контроль радиационного поля.

Для целей радиографии, промышленной геофизики, медицины, в настоящее время широко распространены источники гамма-излучения на основе радиоактивных изотопов, таких как Ir-192, Cs-137, Co-60, Se-75 [2], которые, хоть и являются компактными и удобными в использовании, очень опасны, так как не могут быть выключены. А при утечке радиации из такого источника, человек облучается недельной нормой за ~20 минут [3]. Поэтому большое внимание уделяется более безопасным альтернативным источникам, которые могут быть выключены и безопасны для человека и окружающей среды в нерабочем состоянии. Такими источниками являются ЛУЭ, а технологии изготовления и коммерческая доступность источников питания позволяют делать такие установки компактными при работе в X-частотном диапазоне [4]. Важнейшими задачами при их разработке являются уменьшение цены и сложности изготовления, уменьшение габаритов установки в целом, а также увеличение устойчивости ее параметр к внешним факторам.

Хотя ускоряющие структуры для вышеуказанных применений широко исследованы, существуют много задач, решение которых позволяет упростить и удешевить установки. Например, увеличение КПД, а именно отношение мощности ускоренного пучка к мощности источника, позволяет при меньших затратах энергии получить требуемые мощности пучка. Повышение ускоряющего градиента в установках сокращает их длину, уменьшая цену, однако для этого требуется оптимизировать геометрию существующих ускоряющих ячеек или разработать их новые типы для минимизации электромагнитных полей на поверхности; исследование методов повышения коэффициента связи между ускоряющими ячейками позволяет получить более дешёвые, надёжные и простые структуры.

**Цели и задачи исследования**

1) Разработка и настройка ускоряющих структур и высокочастотного тракта ЛУЭ в S частотном диапазоне на энергию 30 МэВ и ток 100 мА, состоящего из четырех секций и питаемого двумя клистронами с суммарной импульсной мощностью 12 МВт, что позволяет получить энергетический спектр менее 2% и исключить процесс механической настройки частоты после изготовления.

2) Разработка компактной бипериодической ускоряющей структуры (БУС) ЛУЭ в S частотном диапазоне на энергии 6-11 МэВ, который во всём диапазоне энергий имеет электронный КПД выше 60% при регулируемой мощности клистрона от 4 до 6 МВт.

3) Исследование возможности создания комбинированного ЛУЭ на энергию 10 МэВ, в котором неиспользованная ВЧ мощность в ускоряющей секции, рассчитанной на работу в режиме бегущей волны, поступает в группирователь из БУС.

4) Разработка схемы соединения ячейки шести лучевого клистрода с ускоряющей секцией, в которой не требуются элементы ВЧ тракта между ними, а также разработка концепта, в котором генераторная и ускоряющая ячейки совмещены.

5) Разработка компактных микролинаков с большой групповой скоростью в X-частотном диапазоне, предназначенных для замены радиоактивных изотопов для целей радиографии и промышленной геологии.

6) Разработка геометрии ускоряющей секции высокоградиентного (50 МВ/м) медицинского линейного ускорителя протонов и ионов углерода для относительных фазовых скоростей $\beta$=0.3-0.7 в S частотном диапазоне.

**Научная новизна**

Научная новизна заключается в следующем:

1) Разработаны варианты решений для группирователя, ускоряющей секций и элементов ВЧ тракта ЛУЭ с различными требованиями к его параметрам и целям применения: многосекционный ЛУЭ с узким энергетическим спектром, ЛУЭ с регулировкой энергии и требованиям к высокому значению электронного КПД. Предложена схема ЛУЭ на фиксированную энергию, использующая преимущества группирователя на стоячей волне и ускоряющей секции на бегущей, где группирователь выступает в качестве поглощающей нагрузки.

2) Впервые предложен концепт совмещения генераторной ячейки клистрода с ускоряющей секцией методом комбинирования двух ячеек, - генераторную и одну из ускоряющих, в одну гибридную, что в разы уменьшает размеры установки, также исключая из неё элементы ВЧ тракта.

3) Впервые разработаны ЛУЭ X-частотного диапазона, основанные на компенсированных структурах с большой групповой скоростью. Это позволяет использовать такие ускорители как источники рентгеновского излучения в условиях экстремальной окружающей среды, а также упрощают процесс изготовления и исключают требования к настройке структур и сложной системе охлаждения.

4) Разработаны геометрии ускоряющих структур на основе БУС и КДВ-м для ионов углерода для относительных фазовых скоростей $\beta$=0.3-0.7 в S-частотном диапазоне, выдерживающие критерии пробоя и имеющие высокое значение шунтового сопротивления при работе на ускоряющем градиенте 50 МВ/м.

**Научная и практическая значимость**

Значимость работы обусловлена тем, что разработанный четырёхсекционный ЛУЭ с узким энергетическим спектром, включая его ВЧ тракт, изготовлены и настроены, а сам ускоритель успешно запущен. Разработанная схема ЛУЭ с варьированием энергии с повышенным электронным КПД принята в НПП «Торий» за основу при создании ЛУЭ для применения в индустрии и для целей инспекции. Предложенная схема гибридного ЛУЭ с использованием группирователя на стоячей волне в качестве нагрузки потенциально может увеличить эффективность ЛУЭ на фиксированные энергии.

Разработанная методика совмещения многолучевой генераторной ячейки с ускоряющей секцией без использования дополнительных элементов ВЧ тракта открывает новые методы разработки компактных портативных ЛУЭ. В качестве примера рассчитана совмещённая секция клистрода с ускоряющей секцией мезонной фабрики в ИЯИ РАН. Кроме того, изготовлен макет компактного генераторно-ускорительного модуля, измерения характеристик которого показывают соответствие с расчётами.

Разработанная геометрия компактного ЛУЭ в X-частотном диапазоне на малые энергии принята за основу изготовления коммерческих альтернативных источников излучения для целей радиографии и геологии, выпускаемых Radiabeam Technologies для замены таких радиоактивных изотопов как Ir-192.

Разработанная геометрия ускоряющих структур в S-частотном диапазоне принята Аргоннской Национальной лабораторией в качестве секции для ускорения протонов и ионов углерода в секции с относительными фазовыми скоростями $\beta$=0.3-0.7 высокоградиентного линейного ускорителя для медицинских целей. Такая технология позволит увеличить эффективность и доступность адронной терапии.

**Достоверность**

Достоверность результатов численного моделирования, представленных в диссертации, определяется использованием хорошо апробированного программного обеспечения (ASTRA [5], CST Studio [6], PARMELA [7], POISSON SUPERFISH [8]), сравнением результатов расчётов, выполненных с помощью различных программ, проведением расчётов для тестовых моделей с известными характеристиками, тщательной калибровкой измерительной аппаратуры, а также сравнением (где это было возможно) и хорошим совпадением расчётных и экспериментальных характеристик.

**Личный вклад автора**

Автором проведено численное моделирование динамики электронов от термокатода до выхода в разработанных ЛУЭ. Подобраны длины и амплитуды электрических полей на оси группирующих ячеек для получения требуемых параметров пучка на выходе ЛУЭ. Диссертантом проведена оптимизация электродинамических параметров и геометрии ускоряющих ячеек для разработанных ЛУЭ, комбинация ячеек в ускоряющие секции и финальные расчёты этих секций. Кроме того автор проводил измерения изготовленных ячеек и узлов ВЧ тракта после их изготовления, настройку, комбинацию ячеек в ускоряющие секции.

Для проекта генераторно-ускорительного модуля диссертантом проведены оценки динамики пучка в генераторной ячейке, подбор её геометрии и расчёты электродинамики при различных вариантах совмещения с ускоряющей секции, а также выбор варианта для изготовления и тестов.

Диссертант внёс вклад в оптимизацию трёх видов ускоряющих структур с большой групповой скоростью для микролинаков, устойчивых к внешним воздействиям. Автором проведён ряд измерений по выбору оптимального диэлектрика для использования в метало-диэлектрической структуре. Также диссертантантом проведены расчёты узлов ввода мощности в различные типы микролинаков.

Для медицинского линейного ускорителя протонов и ионов углерода автором проведены оптимизации геометрии структур на стоячей и бегущей волнах на частоте 2856 МГц и в диапазоне относительных фазовых скоростей $\beta$=0.3-0.7, позволяющие получать градиенты 50 МВ/м, не превышая критериев пробоя ускоряющих структур.

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

1) Результаты разработки ускоряющих структур для ЛУЭ промышленного назначения, расчёты динамики и геометрии группирователей и ускоряющих секций, одна из которых позволяет получить узкий энергетический спектр на выходе четырёх секционного ЛУЭ на 30 МэВ, вторая – получить высокий электронный КПД для ЛУЭ с регулировкой энергии в диапазоне 6-11 МэВ. Методика и точность расчёта подтверждена приведёнными измерениями частот отдельных изготовленных ячеек и комбинированных секций. Геометрия ячеек и точность расчётов позволили исключить процедуру механической настройки ячеек после их изготовления.

2) Результаты расчёта динамики и геометрии в гибридном ускорителе, использующем преимущества группирователя на стоячей волне и ускоряющей секции на бегущей, где группирователь выступает в качестве поглощающей нагрузки.

3) Результаты оптимизации геометрии ячейки шестилучевого клистрода для получения максимальной выходной мощности, а также расчёт геометрии комбинированного генераторно-ускорительного модуля, совмещающего генераторную и ускоряющую ячейку. Расчёт геометрии и динамики для гибридной структуры компактного ЛУЭ, где одна из ячеек совмещена с генераторной ячейкой. Результаты расчётов подтверждены в изготовленном макете.

4) Результаты оптимизации геометрии отдельных ускоряющих ячеек и полной секции для компактных микролинаков в Х-частотном диапазоне, позволяющих заменить радиоактивные изотопы для целей радиографии и промышленной геологии. Рассмотрен выбор диэлектрика для гибридной компенсированной метало-диэлектрической структуры, а также выбрана металлическая структура с большой групповой скоростью и сравнена с диэлектрической. Точность расчётов подтверждают измерения изготовленных макетов.

5) Результаты оптимизации геометрии ускоряющих ячеек для части медицинского высокоградиентного (50 МВ/м, 2856 МГц) линейного ускорителя протонов и ионов углерода в диапазоне относительных фазовых скоростей $\beta$=0.3-0.7. Сравнение эффективности и устойчивости к пробою бипериодической структуры на стоячей волне и структуры на обратной бегущей волне. Методика настройки ускоряющей структуры на -1 пространственной гармонике.

**Апробация результатов диссертации**

Результаты диссертации представлены на российских и международных конференциях:

- Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва 2012-2015;

- XXV Международное совещание по ускорителям заряженных частиц IWCPA'13, Алушта, Крым, 2013;

- V International Particle Accelerator Conference IPAC'14, Dresden, Germany, 2014;

- XXIV Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RUPAC'14, г. Обнинск, Россия, 2014;

- XXVII International Linear Accelerator Conference LINAC'14, Geneva, Switzerland, 2014;

- VI International Particle Accelerator Conference IPAC'15, Richmond, VA, USA, 2015;

- XXV Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RUPAC'16, Санкт-Петербург, Россия, 2016;

- VII International Particle Accelerator Conference IPAC'16, Busan, Korea, 2016;

- North American Particle Accelerator Confernence, NAPAC2016, Chicago, IL, USA, 2016;

- XXVIII International Linear Accelerator Conference LINAC'16, East-Lansing, MI, USA, 2016;

- II и III международные конференции «Плазменные, лазерные исследования и технологии» 2016-2017 гг, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

**Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 31 печатной работе. 4 статьи – в рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК РФ, 20 статей опубликовано в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus. 7 статей – как в перечке ВАК РФ, так и индексируемые Web of Science и Scopus.

**Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Её объём составляет 166 страниц, она включает 146 рисунков и 32 таблицы. Список литературы включает 91 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, раскрыта новизна работы и её практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** «Ускоряющие структуры линейных электронных ускорителей прикладного назначения» посвящена расчётам динамики пучка и геометрии ускоряющих структур ЛУЭ. В **разделе 1.1** приводятся общие принципы расчёта ускоряющих структур как на стоячей, так и на бегущей волне, указания наиболее популярных геометрий структур.

В **разделе 1.2** описываются расчёты динамики и геометрии ускорителя электронов РЭЛУС-6 на энергию 30 МэВ и импульсный ток 100 мА с энергетическим спектром на выходе 2% [9]. Ускоритель с БУС состоит из 4 секций и питается от двух клистронов с импульсной мощностью 6 МВт каждый на частоте 2856 МГц. Каждая секция включает 12 ускоряющих ячеек. В первой секции начальные 3 ячейки являются группирующими. Каждая пара секций питается от клистрона через трехдецибельный волноводный мост. Расстояние между центрами крайних ячеек соседних секций 131.25 мм, что соответствует 1.25 длины волны в свободном пространстве. Схема ускорителя представлена на рис.1, где цифрами проставлены длины элементов (в сантиметрах).

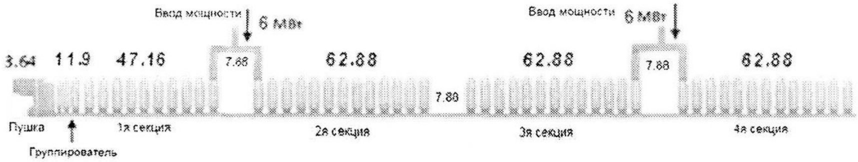



*Рис.1.*. Схема ускорителя РЭЛУС-6

Параметры пучка электронов поля каждой секции приведены в табл. 1, где $P_{пучка}$-импульсная мощность электронного пучка на выходе секции, $P_{потерь}$-мощность, теряемая суммарно в текущей и предыдущих секциях, а $P_{входная}$ – импульсная мощность питания. Ширина энергетического спектра на выходе ускорителя составила 2%, а радиус пучка – 0.3 см. Максимальное электрическое поле на оси группирующих ячеек в первой секции составляет

6,10,18 и 20.9 в первой – четвёртой ячейках соответственно. В дальнейших секциях поле распределено равномерно.

*Таблица 1.* Результаты расчёта динамики для четырёх секций ЛУЭ на 30 МэВ. Входной ток – 0.2 А

| Секция | $W_{\text{ср}}$, МэВ | $P_{\text{пучка}}$, МВт | $P_{\text{потерь}}$, МВт | $P_{\text{входная}}$, МВт |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.98 | 1.49 | 1.53 | 3.02 |
| 2 | 14.45 | 2.95 | 3.05 | 6.00 |
| 3 | 22.05 | 4.4 | 4.59 | 8.99 |
| 4 | 29.81 | 5.87 | 6.15 | 12.01 |

По полученным результатам расчета динамики была смоделирована и оптимизирована геометрия структуры. В качестве ускоряющей структуры выбрана БУС. Была подобрана оптимальная геометрия ускоряющих ячеек, ячеек связи, окон связи между ними, узла ввода мощности в структуру. Общий вид ЛУЭ, а также собранная из настроенных ячеек секция с вводом мощности представлены на рис.2.

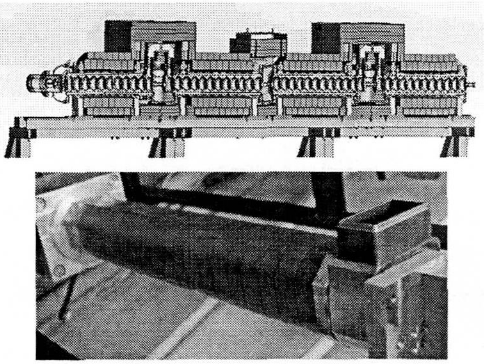


*Рис.2.* Общий вид ЛУЭ на 30 МэВ (сверху) и изготовленная секция с вводом мощности (снизу)

Измеренное распределение электрического поля на оси структуры соответствует рассчитанному. Результат измерения профиля поля в группирующей секции представлен на рис.3.

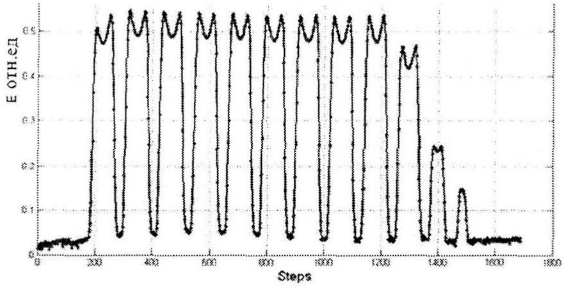



*Рис.3.* Продольное поле вдоль оси секции с группирующими ячейками

В **разделе 1.3** представлены результаты расчёта ускорителя на стоячей волне, предназначенного для целей стерилизации, с варьированием энергии от 5 до 10 МэВ при высоком коэффициенте использования мощности СВЧ для ускорения электронного пучка. Максимальная длина ЛУЭ ограничена значением 1.4 м. Питание обеспечивается клистроном КИУ-147 А на частоте 2856 МГц с возможностью регулировки мощности от 4 до 6 МВт. Источник электронов является трёхэлектродная пушка с напряжением на аноде 30 кВ и возможностью регулировки тока от 0.3 до 0.8 А. Разработан ЛУЭ, позволяющий ускорить электроны в диапазоне энергий от 6 до 11 МэВ при этом имея электронный КПД не менее 60 %, а коэффициент заполнения пролётного канала не более 0.5. При этом разница между максимальной и средней энергией не должна превышать 1 МэВ. В табл. 2 приведены параметры ускоренного пучка в оптимизированном ЛУЭ на 10 МэВ.

*Таблица 2.* Параметры пучка на выходе из ускоряющей секции

| | |
|---|---|
| Средняя энергия, МэВ | 10.09 |
| Максимальная энергия, МэВ | 10.76 |
| Ток, А | 0.365 |
| Коэффициент захвата, % | 78 |
| Радиус пучка, мм | 3 |
| Мощность пучка, МВт | 3.705 |
| Электронный КПД, % | 68 |

Исследована зависимость параметров ускоренного пучка при использовании одного и двух тороидальных фокусирующих магнитов. На рис.4 приведены результаты расчёта варьирования энергии на выходе ускорителя с помощью изменения тока инжекции и входной мощности. Видно, что весь диапазон требуемых энергий перекрыт.

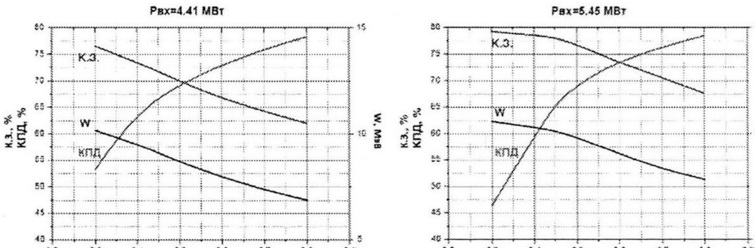



*Рис.4.* Зависимость средней энергии на выходе из ускорителя, электронного КПД и коэффициента захвата при различных токах инжектора для мощности генератора 4.41 МВт (слева) и 5.45 МВт (справа)

В **разделе 1.4** представлен способ совмещения положительных свойств ускорителей на бегущей и стоячей волне в одной установке – это гибридный ЛУЭ [10,11,12], где группировка происходит в трёх ячейках БУС, а ускорение уже релятивистского пучка происходит в секции на бегущей волне на основе надежного и простого в изготовлении круглого диафрагмированного волновода с магнитной связью (КДВ-м) [13]. Предложена новая схема ЛУЭ, где неиспользуемая мощность на выходе из КДВ-м поступает не в нагрузку, а в группирователь БУС, где в качестве нагрузки выступает инжектированный пучок (рис.5).

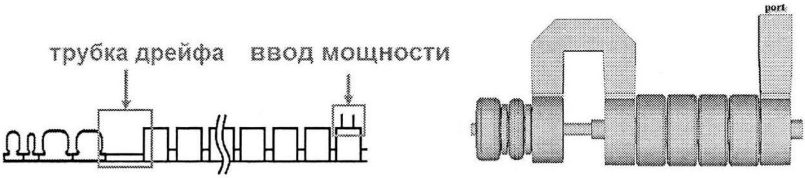



*Рис.5.* Схема гибридного ускорителя. До трубки дрейфа – БУС, после – КДВ-м. (слева) и соединение КДВ-м с БУС волноводом (справа)

После выбора оптимальной геометрии группирователя, ускоряющей секции, а также длины ЛУЭ, рассчитана динамика электронов, результаты которой представлены в табл. 3.

*Таблица 3.* Результаты расчёта динамики в гибридном ускорителе

| | |
|---|---|
| Мощность пучка, МВт | 2.93 |
| Ускоренный ток, А | 0.274 |
| Захват, % | 63.7 |
| Максимальная энергия, МэВ | 11.8 |
| Средняя энергия, МэВ | 10.13 |
| КПД, % | 53.3 |

В **главе 2** «Генераторно – ускорительный модуль» приводятся результаты расчётов различных конфигураций ячейки шестилучевого клистрода, а также исследуются методы компактного совмещения этой ячейки с ускоряющей секцией.

В **разделе 2.1** описывается постановка проблемы, принцип действия клистродов, а также основные задачи, решаемые с помощью описанной разработки.

**Раздел 2.2** посвящён разработке модели генератора с шестью оппозитными пролетными трубками (рис.6), выбраны параметры генераторного пучка, его ток и частота модуляции для получения выходной мощности 1 МВт.

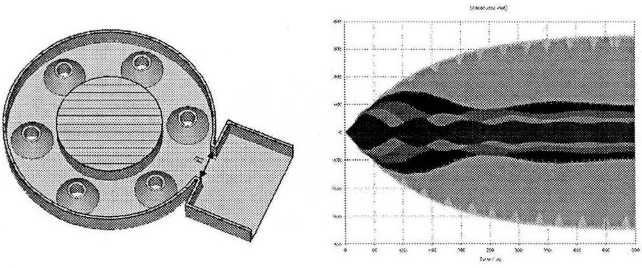
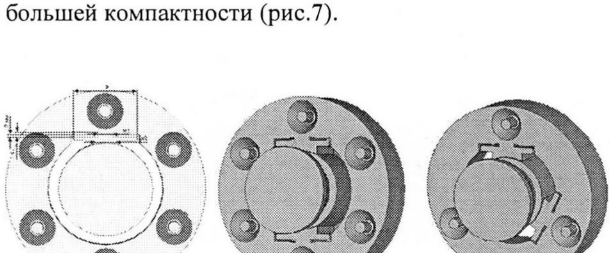


*Рис.6.* Геометрия модуля с коаксиальным резонатором (слева) и Зависимость выходного сигнала от времени при различных диаметрах генераторной ячейки (справа). Коричневым – сигнал, соответствующий диаметру, при котором частота структуры при нагрузке пучками соответствует частоте модуляции пучков

В **разделе 2.3** представлен обзор различных возможностей совмещения выходной ячейки клистрона с ускоряющими структурами для придания установке большей компактности (рис.7).



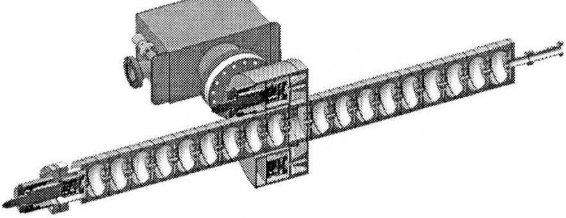
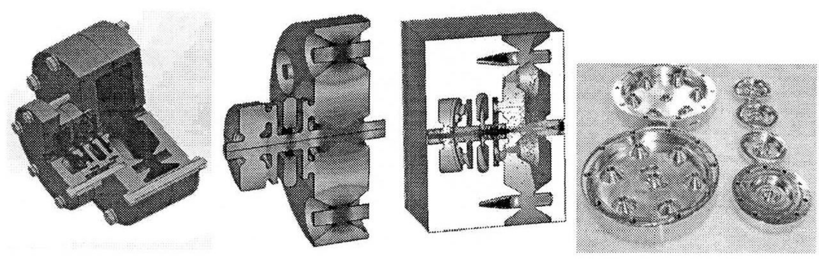


*Рис.7.* Различные виды схем связи генераторной и ускоряющей ячеек (сверху) и пример совмещения генераторной ячейки с ЛУЭ (снизу)

Предложен элегантный вариант совмещения генераторной и ускоряющих ячеек (рис.8). В качестве ускоряющей секции рассмотрен группирователь из трёх ячеек, оптимизированный на инжекцию электронов 50 кэВ и входную ВЧ мощность 0.5 МВт. Вместо соединения третьей ячейки с вводом мощности, заменим её ячейкой на волне $E_{020}$, где периферийные максимумы возбуждаются в области пролёта генераторных пучков, а центральный максимум используется для ускорения.



а б в г

*Рис 8.* а) макет ГУМ, б) распределение модуля электрического поля в нём, в) динамика электронов в ГУМ, г) изготовленный макет

**Разделы 2.4-2.7** посвящены разработке геометрии и моделированию динамики в многолучевом резонаторе для питания секции ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами (УСШД) [14] на частоте 991 МГц, которая используется в Московской мезонной фабрике (ММФ) ИЯИ РАН [15]. Геометрия совмещённой структуры приведена на рис. 9.

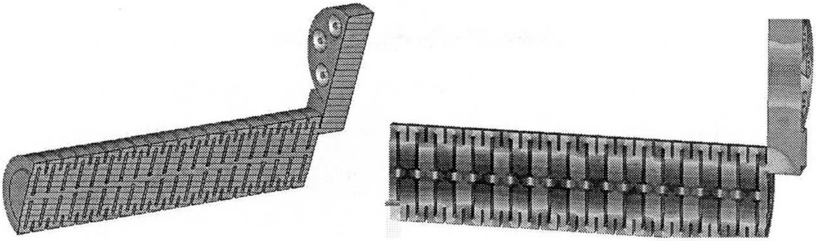
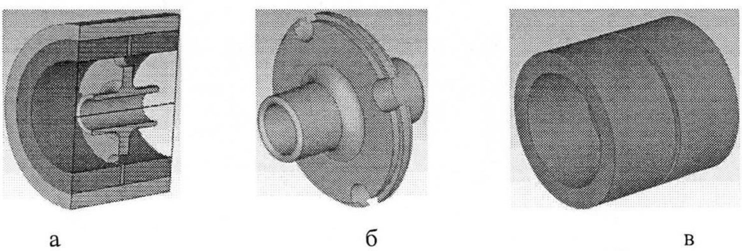


*Рис.9.* Совмещение генераторной ячейки и ускоряющей секции (слева) и распределение модуля амплитуды электрического поля в секции (справа)

В **главе 3** «Микролинаки» приводятся результаты расчётов различных геометрий ускоряющих ячеек и полных секций для компактных микролинаков в Х-частотном диапазоне, позволяющих заменить радиоактивные изотопы для целей радиографии и промышленной геологии.

**Раздел 3.1** Посвящён расчёту и оптимизации ускоряющих ячеек, основанных на гибридной метало-диэлектрической структуре [16] (рис.10). Это относительно недорогой, портативный ЛУЭ с возможностью регулировки энергии, позволяющий эффективно захватывать электронный пучок с энергией ~15 КэВ, инжектированный из доступной электронной пушки, и ускорить его до энергии до 1 МэВ, импульсный ток 10 мА. Источник мощности – магнетрон с частотным диапазоном 8.5 – 9.6 ГГц, пиковой выходной мощностью 220 кВт и со скважностью 0.001.



а б в

*Рис. 10.* Геометрия а) гибридной метало-диэлектрической ячейки с поддерживающими кольцами в сборе, б) металлического диска, в) диэлектрических колец

В установке (рис.11) мощность поступает от магнетрона, напряжение на котором управляется модулятором, а выходная мощность делится на 2 секции через 3дБ мост. Энергия электронов преобразуется в рентгеновское излучение с помощью конвертера. Разработан макет, где две секции микролинака совмещены в одну (рис.12), подобран сапфир, который, при использовании его в качестве диэлектрических колец позволяет получить рабочую частоту 9.4 ГГц и ускорение до 1 МэВ при входной мощности 200 кВт.

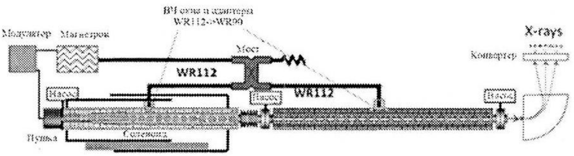



*Рис. 11.* Первичная концептуальная схема микролинака (длина ~ 0.5 метра)

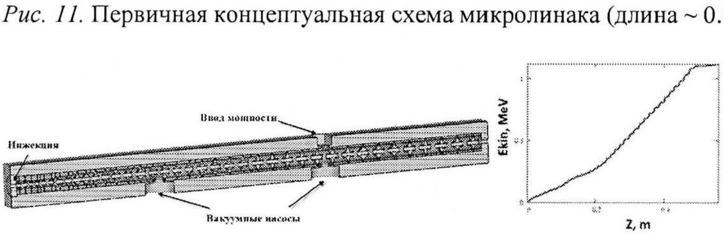



*Рис. 12.* Финальный макет односекционного микролинака (слева) и кинетическая энергия электронов вдоль его оси (справа)

В **разделе 3.2** приведён выбор и оптимизация ускоряющей геометрии, а также полной ускоряющей секции микролинака для использования в промышленной геологии при экстремальных температурах до 200 °С. Основными требованиями, предъявляемыми при выборе ускоряющей структуры являются получение большой групповой скорости [17,18,19] на рабочем виде колебаний (более 20 %) при приемлемом значении шунтового сопротивления и простоте изготовления. Рабочая частота – 9.4 ГГц. Рассмотрены и оптимизированы две структуры, но в качестве рабочей выбрана структура с поперечными штырями (рис.13) [20]. В неё групповая скорость равна 24% от скорости света при $r_{ш.эфф}$=36 МОм/м.

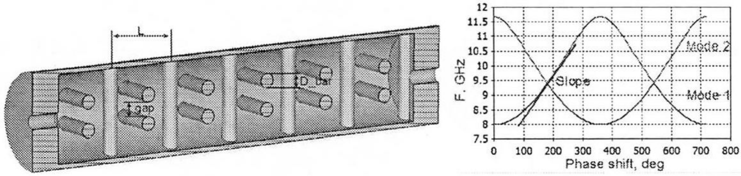



*Рис. 13.* Геометрия оптимизированной структуры с поперечными штырями (слева) и её дисперсионная зависимость (справа)

В структуру настроен узел ввода мощности, а расчёт динамики в ней показывает плавное ускорение до 1 МэВ при значении импульсной мощности 140 кВт и захвате ~20%.

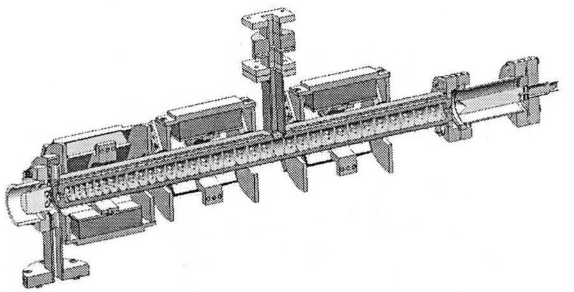


*Рис. 14.* Узел ввода мощности в микролинак на основе поперечно-штырьевой структуры.

В **главе 4** «Ускоряющая структура протонного линейного ускорителя с большим градиентом» приведены результаты расчёта УС для использования в секции с β=0.3-0.7 высокоградиентного (50 МВ/м, 2856 МГц) линейного ускорителя протонов и ионов углерода для облучения раковых опухолей.

В **разделах 4.1** и **4.2** проводится описание проблемы, задачи исследований и основных ограничений, с которыми сталкиваются при разработке высокоградиентных структур.

В **разделах 4.3 - 4.5** приведён выбор и оптимизация ускоряющих структур как на бегущей, так и на стоячей волне для использования в секции с β=0.43. Различные геометрии представлены на рис. 15. Лучше всего себя показали БУС с ячейками связи на оси и КДВ-м. Эти структуры оптимизированы по параметрам пробоя для градиента 50 МВ/м.

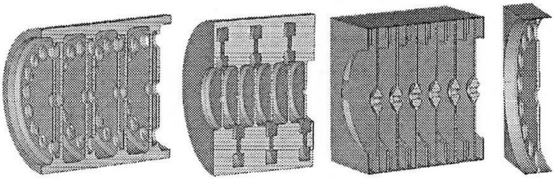


*Рис. 15.* Рассмотренные УС. Слева направо: БУС с ячейкой связи на оси, БУС с ячейкой связи на периферии, УСШД, КДВ-м

**Разделы 4.6 – 4.8** посвящены выбору ускоряющей структуры для β=0.3. Так как структура является очень короткой, то, чтобы повысить её длину и увеличить шунтовое сопротивление, предложена и разработана структура на -1 пространственной гармонике (рис. 16) [21].

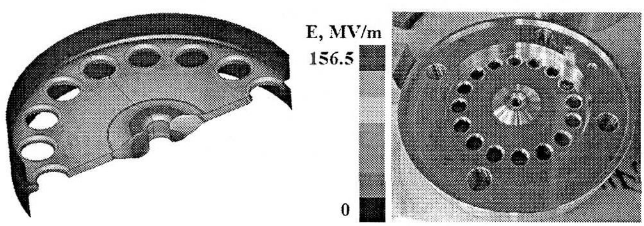



*Рис. 16.* Распределение электрического поля на поверхности настроенной ячейки для β=0.3 и -1 пространственной гармоники при ускоряющем градиенте 50 МВ/м (слева) и изготовленная ячейка (справа)

**Заключение** содержит основные результаты, полученные в диссертационной работе.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *E.A. Savin, N.P. Sobenin*, Biperiodic accelerating structure with inner coupling cells offering an increased coupling coefficient // Technical Physics, 2013, Vol. 58, No. 5, p. 760-765. (ВАК, Web of Science, Scopus).
2. *A.V. Smirnov, E.A. Savin*, Hybrid-dielectric, slow wave structure with magnetic coupling and compensation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 820 (2016) p. 48-53. (ВАК, Web of Science, Scopus).
3. *Завадцев А.А., Савин Е.А., et. al*, Расчет и настройка линейного ускорителя на 40 МэВ // Приборы и техника эксперимента, 2013, №4, с. 14-23. (ВАК, Web of Science, Scopus).
4. *Е.А. Савин, А.А. Завадцев et. al* // Высокочастотный тракт линейного ускорителя электронов на 40 МэВ, Вестник НИЯУ МИФИ, 2014, том 3, №1, с. 71-77. (ВАК).
5. *E. A. Savin, A. Yu. Smirnov et. al*, Components of the radio-frequency system for traveling wave deflecting structures // Instruments and Experimental Techniques, Volume 57, Issue 6, p. 706-713. (ВАК, Web of Science, Scopus).
6. *E. A. Savin, M. V. Lalayan et. al*, Development of the software for the accelerating fields in linear structures measurement // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, p. 407-409. (Scopus).
7. *E. A. Savin, D. B. Tikhonov et al.*, Thermal Calculation of Accelerating Structures in Electron Linacs // Technical Physics, Volume 58, Issue 4, p. 601-607. (ВАК, Web of Science, Scopus).
8. *S.V. Matsievskiy, E.A. Savin et al.*, Hybrid electron linac with standing and travelling wave accelerating sections // Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, p. 1791-1793. (Scopus).
9. *A. V. Smirnov, E. Savin et al.*, Multi-cell disk-and-ring tapered structure for compact RF linacs // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 830 (2016), p. 294-302. (ВАК, Web of Science, Scopus).

10. *E. A. Savin, S.V. Matsievskiy, et al.*, Different solutions for the generator-accelerator module // Physics Procedia 74 (2015) p. 108-115. (ВАК, Web of Science, Scopus).
11. *Е. А. Савин, С.В. Мациевский, et al.*, Расчёт многопучкового резонатора-генератора, Вестник НИЯУ МИФИ, 2014, т.3, №4, с. 478-483. (ВАК).
12. *A. Plastun, E. Savin et.al*, Beam Dynamics Studies for a compact carbon ion linac for therapy // Proceedings of LINAC2016, East-Lansing, MI, USA. (Scopus).
13. *P.N. Ostroumov, E. A. Savin et al.*, Compact carbon Ion linac, Proceedings of NA-PAC2016, Chicago, IL, USA – Pre-Release Snapshot 14-Oct-2016. (Scopus).

**Список литературы, цитируемой в автореферате**

1. *В.И. Шведунов*, Новое поколение ускорителей электронов НИИЯФ МГУ // НИИ ядерной физики МГУ имени М.В. Ломоносова, 28 мая 2013, ресурс http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/28.05.13.pdf.
2. *P. Hayward*, Radiography of welds using Selenium 75, IR 192 and X-rays // Proceedings of 12th A-PCNDT, 2006, Auckland, New Zealand, - 5p.
3. *R.A. Mintern, J.C. Chaston*, Gamma Radiography with Iridium 192 // Platinum metals rev., 1959,3,(1), p. 12-16.
4. *S. Boucher et. al*, Compact, inexpensive X-band linacs as radioactive isotope source replacements // Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, p. 4136-4138.
5. *K. Floettmann*, ASTRA. A space charge tracking algorithm // DESY, 2014. http://desy.de/~mpyflo.
6. CST code // https://www.cst.com. Лицензия RadiaBeam Technologies, LLC.
7. *B. Mouton*, The PARMELA program. Version 4.03. // LAL/SERA 93-455, 1995.
8. *M. Menzel, H. Stokes*, User's guide for the POISSON/SUPERFISH. Group of codes. // LA-UR-87-115, 1987.
http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml

9 . *Завадцев А.А., Савин Е.А., et. al*, Расчет и настройка линейного ускорителя на 40 МэВ // Приборы и техника эксперимента, 2013, №4, с. 14-23.
10. *D. Tronc*, Linac Accelerating structures // Proceedings of EPAC'94, London, England, 1994, p. 2164.
11. *S.V. Kutsaev, N.P. Sobenin et al.*, Design of hybrid electron linac with standing wave buncher and traveling wave structure // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 636(1): p. 13-30, April 2011.
12. *D. Alesni et al.*, The design of a hybrid photoinjector for high brightness beam application // Proceedings of EPAC 20016, Edinburgh, Scotland, p. 2487 – 2489.
13. *N.P. Sobenin et al.*, Magnetic coupled disk loaded waveguide // Proceedings of RuPAC-2010, Protvino, Russia, p.319 – 321.
14. *Андреев В.Г.*, Определение геометрии структуры со знакопеременным ускоряющим полем на π/2-волне // Журнал технической физики, т.41, вып.4, 1971, с. 788-795.
15. http://www.inr.ru/mmf.html.
16. *A.V. Smirnov, E.A. Savin*, Hybrid-dielectric, slow wave structure with magnetic coupling and compensation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 820 (2016) p. 48-53.
17. *В.Е. Балакин, Н.П. Собенин, Н.А. Соляк*, Линейные коллайдеры // М.: МИФИ, 1993. -120 с.
18. *Z.D. Farkas, P.B. Wilson*, Comparison of high group velocity accelerating structures // PAC 1987 Proceedings, p. 1561-1563.
19. *J.P. Delahaye, I. Wilson et.al*, CLIC-a two-beam multi-TeV $e^{+-}$ linear collider // XX International Linac Conference, Monterey, California, 2000, p. 6-10.
20. *A.V. Smirnov*, Precursor wave induced by a bunch in an inter-digital structure // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) p. 561-567.
21. *D. Tronc*, Traveling wave acceleration of protons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A327 (1993) p. 253-255.

Подписано в печать: 09.03.2017

Заказ № 11852 Тираж - 120 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77 (499) 788-78-56

www.autoreferat.ru