

Левичев Алексей Евгеньевич

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КОНЦЕПЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ – ИНЖЕКТОРА ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ ЦКП «СКИФ»

Семинар по материалам диссертации на соискание степени доктора физико-математических наук Специальность: 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорителей

Научный консультант: д.ф.-м.н., академик Логачев П. В.

Оглавление

Введение

Глава 1. Общее описание линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Глава 2. Моделирование и оптимизация пучка в линейном ускорителе

Глава 4. Изготовление элементов ускорителя

Глава 5. Клистрон – источник СВЧ мощности линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»

Глава 6. Стенд ЛИНАК-20

Заключение

Выносимые на защиту положения

Апробация работы

Публикации по теме диссертации

Благодарности

Введение

Актуальность работы

Синхротронным называется электромагнитное излучение ультрарелятивистских заряженных частиц, движущихся в магнитном поле и испытывающих ускорение, перпендикулярное вектору скорости. Оно является эффективным и универсальным инструментом для широкого спектра исследований вещества и материалов, а также для технологических применений в различных областях науки и техники

Одним из важнейших параметров таких источников является яркость – число фотонов, излучаемых в единицу времени с единицы площади источника в единицу телесного угла (плотность потока фотонов в фазовом объеме источника). Яркость тем выше, чем меньше поперечный фазовый объем пучка. Таким образом, поперечный фазовый объем (эмиттанс) является важным параметром, определяющим свойства синхротронного излучения, а по величине эмиттанса определяются поколения источников СИ.

В настоящее время в наукограде Кольцово Новосибирской области создается современный источник СИ четвертого поколения (эмиттанс ~500-50 пм·рад) Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ») включает линейный ускоритель электронов с энергией 200 МэВ, промежуточный синхротрон-бустер и накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ и длиной орбиты 476 м. Проектный «естественный» (без вставных устройств и при нулевом токе пучка и связи мод бетатронных колебаний) горизонтальный эмиттанс пучка в накопителе равен 73.2 пм·рад.



Актуальность работы

Диссертационная работа описывает разработку и создание линейного укорителя для инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ», включая мощный клистрон-усилитель и другие системы. В процессе работы была рассчитана, разработана, создана и испытана начальная, самая ответственная и сложная часть линейного ускорителя от источника электронов до первой регулярной ускоряющей включительно. Диагностический секции электронно-оптический канал, оснащенный необходимой измерительной аппаратурой, эксперименты, провести позволил выбранных адекватность подтвердившие решений. обеспечения Для питания ускоряющих структур сверхвысокочастотной (СВЧ) мощностью был разработан, изготовлен и измерен мощный импульсный клистрон. Данная разработка позволила отказаться от импортных клистронов, которые перестали быть доступны в Российской Федерации. Необходимые параметры клистрона были продемонстрированы на созданном стенде.



Степень разработанности темы исследования

Параметры	Требования		Достигнуто в режимах		
			Односгустковый	Многосгустковый	
			режим	режим	
Энергия	200 1	МэВ	201 МэВ	210 МэВ	
Заряд	>0.5 нКл ОР	>15 нКл МР	0.5 нКл	11 нКл	
Длина пучка	160-300	нс МР	н/д	160-300 нс	
Однородность пучка	<10%	MP	н/д	25%	
Энерг.разброс	<0.5%	% rms	0.14% (ширина на	0.41% (ширига на	
			полувысоте)	полувысоте)	
Эмиттанс	Требуемый <38 нм rms		Х: 58 нм, Ү: 63 нм	Х: 56 нм, Ү: 47 нм	
	Акцептоно	<70 IBV rms			
Actigerrande <70 HM rms Hodeliker (V.1.DEV					
GUN SPB PB Structure #1 Structure #2 Structure #2 Structure #4 Cxema CBU питания линейного ускорителя инжектора NSLS-II				Winshakine #4	

Инжектор NSLS-II:

- Высоковольтная электронная пушка с постоянным напряжением 90 кВ с триодным катодом ЕІМАС YU171. Пушка работает либо в односгустковом (заряд 0.5 нКл), либо в многосгустковом режиме (период последовательности 2 нс, длительность импульса 160-300 нс, полный заряд 15 нКл). Величина тока регулируется модулятором катодно-сеточного узла, который также работает либо в одноимпульсном режиме, либо с частотой 500 МГц.
- Группирующий резонатор работает на частоте 500 МГц.
- Предгруппирователь и группирователь работают на бегущей волне с частотой 2998 МГц.
- Регулярное ускорение происходит в четырех пятиметровых ускоряющих структурах на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным градиентом с рабочей модой колебания 2π/3.
- Запитаны структуры от двух клистронов Canon E37302A, каждый из которых обеспечивает 45 МВт выходной импульсной СВЧ мощности на частоте 2998 МГц.

Схема линейного ускорителя ESRF-EBS

- Высоковольтная электронная пушка с напряжением 90 кВ.
- Катодный узел ЕІМАС Ү-845 с управлением по сетке.
- Предгруппирователь на основной частоте 2998 МГц обеспечивает энергетический разброс в пучке ±10 кВ
- Группирователь состоит из 22 ячеек, работающих в режиме стоячей волны на моде колебания π/2 с амплитудой ускоряющего поля 25 МВ/м. Выходная энергию пучка 15 МэВ.
- Для корректного заполнения сепаратрис синхротрона-бустера и удаления лишних сгустков используются пластины дефлектора, который с помощью короткого (2.5 нс) импульса амплитудой 700 В отклоняет ненужные сгустки на расположенную далее диафрагму коллиматора.
- Регулярное ускорение пучка осуществляется двумя ускоряющими структурами по 6 м на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным градиентом, работающих на 2π/3моде колебания.
- В качестве источников СВЧ используются два клистрона Thomson TH2100 с СВЧ мощностью 35 МВт. Частота работы электронной пушки 1 Гц или 10 Гц.



Источник электронов и канал группировки линейного ускорителя инжектора ESRF-EBS: вверху схема с обозначениями, внизу – 3D модель

Схема линейного ускорителя MAX-IV

- Линейный ускоритель обеспечивает электронами на энергии эксперимента два источника СИ с энергиями 1.5 ГэВ и 3 ГэВ соответственно, а также будет снабжать электронами лазер на свободных электронах.
- В регулярном режиме линейный ускоритель работает с частотой повторения 100 Гц и зарядом в одном сгустке 100 пКл.
- СВЧ фотопушка обеспечивает три сгустка, разделенных периодом ускоряющего поля (3 ГГц).
- Быстрый кикер направляет эти три сгустка в соответствующее накопительное кольцо (1.5 ГэВ или 3 ГэВ).
- Кикер работает с частотой 10 Гц.
- Линейный ускоритель сконструирован по модульному принципу. Один ускоряющий модуль состоит из клистрона мощностью 35 МВт и двух ускоряющих структур с частотой 3 ГГц на основе диафрагмированного волновода с постоянным градиентом, запитанных от системы умножения мощности SLED.
- Ускоряющая структура длиной 5.2 м обеспечивает набор энергии электронов 95 МэВ.
- В качестве источников электронов применяются две СВЧ пушки: с фотокатодом для работ с ультракороткими пучками в режиме лазера на свободных электронах и с термоэмиссионным катодом для инжекции в накопительные кольца.

Схема линейного ускорителя МАХ-IV



9

Недостатки предложенных схем

- Схема инжекционного комплекса MAX-IV сложна и неактуальна для ЦКП «СКИФ»
- Высоковольтные источники электронов в NSLS-II и ESRF-EBD обеспечивают небольшую начальную энергию пучка (90 кВ) при высокой длительности 1 нс, что усложняет схему группировки и предускорения пучка
- СВЧ фотопушка MAX-IV обладает высокой начальной энергией, но не может обеспечить большую интенсивность эмитируемого заряда и требует сложную дополнительную лазерную систему.
- Заряд сгустка электронов из СВЧ пушки с термоэмиссионным катодом MAX-IV невелик, что требует увеличения частоты работы инжектора.
- Термоэмиссионная пушка MAX-IV требует сложную систему с коллиматором и поворотом пучка для уменьшения энергетического разброса и сокращения длительности сгустка.

Для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» было решено использовать:

- Для облегчения процесса предускорения и продольной группировки, а также для дополнительного управления параметрами пучка с помощью задержки отпирающего напряжения по отношению к ускоряющему, было решено в качестве инжектора использовать ВЧ пушку с управлением тока пучка по сетке.
- Для облегчения создания предускорителя использовать уменьшенную копию регулярной ускоряющей структуры, поскольку это позволяет осуществить начальная энергия (~1 МэВ) пучка после ВЧ пушки
- Отказаться от магнитного поля первой регулярной ускоряющей структуры
- Использовать в качестве регулярной ускоряющей структуры структуру с постоянным импедансом на основе круглого диафрагмированного волновода на бегущей волне с модой колебания $2\pi/3$. Такая структура имеет постоянную геометрию ускоряющих ячеек, что дешевле в производстве по сравнению со структурами с постоянным градиентом при небольшом количестве структур.
- Использовать для линеаризации продольных группирующих сил резонатор с утроенной частотой ВЧ пушки
- В качестве источника СВЧ мощности применить 3 клистрона с выходной импульсной мощностью 50 МВт

Цели и задачи диссертации

Целью диссертационной работы являлась разработка всего комплекса линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», включая клистрон, производство его оборудования, а также испытание и проверка наиболее сложных систем линейного ускорителя при работе с пучком и выходных параметров клистрона на отдельном стенде.

В рамках этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1. Расчет параметров мощного импульсного клистрона. Разработка технологии изготовления, как элементов клистрона, так и всего клистрона в целом.
- 2. Определение необходимых частотных характеристик резонаторов клистрона. Получение проектных выходных параметров клистрона, измерение выходной СВЧ мощности.
- Обоснование концептуальных решений, схемы и конструкции систем линейного ускорителя. Определение основных принципов 3. его работы и состава элементов. Создание комплексной схемы установки с учетом всех подсистем.
- Теоретические оценки возможности достижения необходимых параметров пучка с учетом разработанной концепции ускорителя и 4. схемы его работы.
- Моделирование основных элементов ускорителя. Расчет динамики пучка с учетом реалистичных ошибок, погрешностей и 5. неточностей изготовления и функционирования отдельных элементов.
- 6. Выбор и обоснование конструктивных и технологических решений.
- Разработка и испытание основных компонентов, включая источник электронов ВЧ пушку, канал группировки пучка, первую секцию регулярного ускорения, системы фокусировки, диагностики и коррекции траектории пучка и т.д.
- Разработка и создание стенда ЛИНАК-20, который является начальной частью линейного ускорителя инжектора СКИФ до второй 8. регулярной ускоряющей структуры.
- 9. Экспериментальное исследование работы элементов ускорителя. Получение ускоренного пучка на стенде ЛИНАК-20, исследование его параметров. Демонстрация достижения характеристик, требуемых для создания полноценного линейного ускорителя – инжектора источника СИ четвертого поколения ЦКП «СКИФ».

- 1. Впервые в России разработан, изготовлен и настроен на проектные параметры отечественный клистрон с выходной импульсной СВЧ мощностью 50 МВт при рабочей частоте 2856 МГц.
- 2. Впервые разработана и реализована схема линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения на основе ВЧ пушки с термоэмиссионным катодом и управлением тока пучка по сетке с одним предускорителем-группирователем, работающим в режиме бегущей волны без изменения ее фазовой скорости.
- Впервые создан специализированный экспериментальный стенд, включающий в себя источник электронов, канал группировки и первую регулярную ускоряющую структуру линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», продемонстрировавший адекватность и работоспособность принятых и использованных решений.
- 4. Впервые на основе оригинальной концепции получен ускоренный пучок и измерены его параметры с использованием созданного стенда на основе линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».

Общее описание линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Параметры основного кольца и линейного ускорителя ЦКП «СКИФ

Строительный план участка для размещения ЦКП «СКИФ». Красным цветом показан основной накопитель электронов (и, для примера, два длинных канала вывода излучения), синим –синхротрон-бустер, зеленым – линейный ускоритель



Конфигурация источника СИ «СКИФ»



Основные проектные параметры накопителя электронов ЦКП «СКИФ»

Энергия, ГэВ	3
Периметр, м	476.14
Натуральный горизонтальный эмиттанс, пм рад	73.2
Бетатронные частоты (гор./верт.)	50.81/18.84
Натуральный хроматизм (гор./верт.)	-149/-55
Коэффициент расширения орбит	7.64·10 ⁻⁵
Потери энергии на оборот, кэВ	531
Энергетический разброс в пучке	1.032·10 ⁻³
Время затухания горизон./продольн. колебаний,	9.2/17
мс	

Проектные параметры линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Энергия электронов	200 МэВ	
Максимальная энергия	210 МэВ	
Частота циклов	1 Гц	
Геометр. эмиттанс на 200 МэВ	150 нм	
Разброс по энергии на 200 МэВ	\leq 1% (rms)	14

Общая схема линейного ускорителя





- Источник электронов ВЧ пушка с рабочей частотой 178.5 МГц.
- Резонатор группировки пучка с частотой 535.5 МГц (третья гармоника рабочей частоты ВЧ пушки).
- Предускоритель-группирователь, представляющий собой структуру на бегущей волне (набег фазы колебания на ускоряющую ячейку 2π/3) с частотой 2856 МГц.
- Регулярная ускоряющая структура (5 секций длиной 3 м каждая) на бегущей волне (набег фазы колебания на ускоряющую ячейку 2π/3) с частотой 2856 МГц.
- Источник ВЧ питания пушки с выходной мощностью примерно 0.7 МВт, длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения 10 Гц.
- Модулятор, обеспечивающий управление током катода, должен генерировать импульсы напряжения до -150 В с длительностью 1 нс относительно заземленной сетки. Постоянный запирающий потенциал на катоде должен быть в районе 20 В.
- ВЧ питание резонатора группировки пучка на частоту 535.5 МГц мощностью 10 кВт с длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения 10 Гц.
- Три клистрона, питающие предускоритель и пять секций основной УС (см. рисунок 1.5). Параметры клистрона: частота 2856 МГц, выходная номинальная мощность 50 МВт с длительностью импульса до 4 мкс и частотой повторения до 10 Гц.
- Модулятор клистрона должен обеспечить напряжение 350 кВ в импульсе длительностью до 7 мкс при импульсной мощности около 120 МВт и частоте повторения до 10 Гц. 15

Источник электронов



Конфигурация резонатора пушки (слева) и распределение ускоряющего поля на его оси (справа)

Параметры резонатора ВЧ пушки

Резонансная частота, МГц	178.5
Максимальное поле на оси, МВ/м	13
Коэффициент перенапряженности электрического поля	1.8
Собственная добротность	10300
Импульсная мощность, кВт	500

Для линейного ускорителя в качестве источника электронов выбрана ВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, с возможностью управления током катода. В ней может использоваться диспенсерный или оксидный катодный узел ВЧ триода (например, лампы ГС-34). Система позволяет не только получать необходимый заряд пучка электронов, но и управлять им, запирая эмиссию электронов напряжением в зазоре катод-сетка с помощью отдельного модулятора.

Основные параметры катодно-сеточного узла ВЧ триода ГС-34

Мощность, рассеиваемая сеткой, Вт	3
Напряжение накала, В	12÷13.2
Напряжение смещения, В	-150÷0
Максимальный импульсный ток катода, А	11
Импульсный ток сетки, А	4
Длительность импульса, мкс	10
Прозрачность сетки	75%
Коэфф проникновения электринеского пола	260/

Внешний вид катодно-сеточного узла ВЧ триода ГС-34 (слева). Модель узла для расчетов (справа)



Система группировки



1 – ВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, 2 – резонатор третьей гармоники с частотой 535.5 МГц, 3 – предускоритель-группирователь с частотой 2856 МГц, 4 – соленоиды дрейфового промежутка, 5 – соленоиды предускорителя-группирователя (2 шт.), 6 – согласующий соленоид, 7 – корректоры траектории пучка, 8 – измерители длительности пучка, 9 – люминофор, 10 – датчики тока пучка, 11 – пикап станция, 12 – автоматический вакуумный шибер, 13 – волноводная СВЧ- нагрузка



Расчетная модель группирователя 3-й гармоники и его

параметры	Резонансная частота, МГц	535.3-
		535.5
	Собственная добротность	20210
	Эффективный импеданс, Ом	148.2
	Максимальное поле Е на оси,	2.42
	МВ/м	
	Максимальное ВЧ поле на	4.4
	поверхности, МВ/м	
	Коэффициент пролета	0.9614
	Накопленная ВЧ энергия, Дж	0.036
	Максимальная рассеиваемая	6.02
	импульсная мощность в	
	стенках, кВт	

Пучок из ВЧ пушки эмиттируется уже в группирующей фазе. Для линеаризации группирующих сил дополнительно используется группирующий резонатор третьей гармоники с частотой 535.5 МГц. Релятивистский пучок с энергией 3 МэВ формируется в предускорителе-группирователе. В систему группировки входят также фокусирующие соленоиды и оборудование диагностики пучка. ¹⁷

Регулярная ускоряющая секция



1 – ускоряющие структуры, 2 – ввод СВЧ мощности, 3 – волноводные СВЧ нагрузки



Ускоряющая структура – диафрагмированный волновод: 1 – резонатор (регулярная ускоряющая ячейка), 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения

Схема регулярного ускорения состоит из пяти регулярных ускоряющих структур с частотой 2856 МГц, длиной 3 м каждая и с видом колебания 2 $\pi/3$ (сдвиг фазы колебания электромагнитного поля на ускоряющую ячейку), пяти волноводных СВЧ нагрузок.

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний	2π/3
Собственная добротность	1.3 ·10 ⁴
Период	34.99 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.75 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Длина	2.93 м
Фазовая скорость	1 <i>c</i>
Групповая скорость	0.021c
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания по полю	0.108 m ⁻¹
Время заполнения структуры	0.456 мкс

Волноводная система



Схема волноводного 7 дБ ответвителя

1- клистрон, 2 – волноводы, 3- вакуумный волноводный шибер, 4 – 3 дБ мост, 5 – волноводный фазовращатель, 6 – волноводный аттенюатор (включает 2 3 дБ моста и 1 фазовращатель), 7 – 7 дБ волноводный ответвитель, 8 – волноводная ВЧ нагрузка

Волноводный фазовращатель







Волноводная ВЧ нагрузка на 50 МВт

Магнитная система



а) секция фокусировки и предускорения пучка, b) регулярные ускоряющие структуры, c) диагностический прямолинейный канал на выходе линейного ускорителя. Обозначения: 1 – соленоиды системы группировки, 2 – соленоид предускорителя-группирователя, 3 – согласующий соленоид перед первой регулярной ускоряющей-структурой, 4 – квадруполи регулярной части линейного ускорителя, 5 – корректоры, 6 – квадруполи диагностического промежутка

Магниты	Кол.	Поле	I, A
Соленоиды канала	5	До 0.07 Т	6
группировки			
Соленоиды	2	До 0.1 Т	200
предускорителя-			
группирователя			
Согласующий	1	До 0.1 Т	3
соленоид			
Корректора канала	8	0.001 T	3
группировки			
Квадрупольные линзы	3	До 12 Т/м	6
Корректора	3	До 0.04 Т	6
регулярной части			
ускорителя			

Система диагностики пучка



а) секция фокусировки и предускорения пучка, b) секция регулярных ускоряющих структур, c) диагностический промежуток. Обозначения: 1 – датчик тока пучка, 2 – датчик черенковского излучения, 3 – люминофоры, 4 – датчик положения пучка, 5 – пучковый датчик-профилометр, 6 – спектрометр, 7 – цилиндр Фарадея

	Датчик	Кол	Функция
		-B0	
	Полосковый	7	Однопролетное измерение
	датчик		траектории движения пучка
)	Быстрый	3	Измерение абсолютного
	токовый датчик		значения заряда пучка
	FCT		
	Люминофорный	8	Измерение положения и
	датчик		поперечной формы пучка
	Датчик	1	Регистрация потерь частиц
	радиационных		ускоряемого пучка
	потерь		
	Цилиндр	1	Измерение заряда пучка при
	Фарадея		его поглощении
	Черенковский	3	Измерение длительности
	датчик		сгустка
	Спектрометр	1	Измерение энергии и
			разброса энергии

Моделирование и оптимизация пучка в линейном ускорителе

Продольная динамика

Гамильтониан не являясь явной функцией времени, потому он сохраняется и определяется начальными условиями

$$\begin{split} \frac{d\gamma}{d\xi} &= G\cos\varphi, \quad \frac{d\varphi}{d\xi} = 2\pi\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \\ \xi &= \frac{z}{\lambda}, \quad \gamma = \frac{\varepsilon}{m_0c^2} \quad \text{if} \quad G = \frac{eE_0\lambda}{m_0c^2}, \end{split}$$

где *E*₀ – амплитуда основной гармоники,

 φ – фаза частицы относительно волны,

е – заряд частицы.

 λ – длина волны ускоряющей структуры, а m_0 – масса покоя электрона

$$H = H_i = -G\sin\varphi_i + 2\pi\gamma_i(1-\beta_i)$$

где φ_i – начальная фаза частицы относительно волны, γ_i и β_i – соответствующие кинетические параметры в момент инжекции

Условие непрерывного ускорения

$$\sin \varphi_{\gamma \to \infty} \to \sin \varphi_{\infty} = -H/G$$

или

Решение данного неравенства приводит к двум случаям:

$$2\pi\gamma_i\sqrt{1-\frac{1}{\gamma_i^2}} > 2\pi\gamma_i - G(1+\sin\varphi_i)$$

 $\frac{dz}{dt} = v_e = c\beta$ - скорость частицы

$$\begin{cases} 2\pi\gamma_i - G(1+\sin\varphi_i) > 0, \\ \left\{ 4\pi^2\gamma_i^2 \left(1 - \frac{1}{\gamma_i^2} \right) > 2\pi\gamma_i - G(1+\sin\varphi_i)^2 \\ \mathbf{UJIU} \\ \left\{ \gamma_i > \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{G(1+\sin\varphi_i)} + \frac{G(1+\sin\varphi_i)}{2\pi} \right] \end{cases} \end{cases}$$

 $G < \frac{2\pi\gamma_i}{(1+\sin\varphi_i)}$

малый темпу ускорения. В от параметра зависимости G при инжекции фазах заданных можно определить минимальную начальную энергию, необходимую, чтобы захватить частицу В режим стационарного ускорения.

 $\begin{cases} 2\pi\gamma_i - G(1 + \sin\varphi_i) < 0 \\ 1 - \frac{1}{\gamma_i^2} \ge 0 \end{cases}$ - случай соответствует условно большому темпу ускорения, когда существует множество значений амплитуд поля и начальных фаз, когда возможно ускорение частиц с любыми начальными энергиями.

Захват в режим ускорения



1 – область захвата в ускорение при энергии инжекции 0.7 МэВ, точек полной остановки нет; 2 – захват в ускорение при энергии инжекции 0.7 МэВ, точки полной остановки есть; 3 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, точек полной остановки нет, 4 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, точки полной остановки есть 1 – захват в ускорение при энергии инжекции 3 МэВ, нет точек полной остановки, область 2 – захват в ускорение при энергии инжекции 3 МэВ, существуют точки полной остановки, область 3 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, нет точек полной остановки, область 4 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, существуют точки полной остановки

Группировка пучка при инжекции около 90⁰

E0, [MV/m]

10



Зависимость выходной фазы пучка от начальной Δφ

Существует амплитуда поля, при которой достигается минимальная длительность ускоренного пучка

$$\Delta \varphi_f = \frac{(\Delta \varphi)^2}{8} \qquad G = 2\pi \gamma_i (1 - \beta_i)$$



Зависимость фазовой длительности ускоренного пучка от амплитуды поля при начальной длительности $\Delta \varphi = 30^{\circ}$

Зависимость амплитуды электрического поля от энергии инжекции для достижения минимального размера ускоренного пучка при инжекции в районе фазы 90⁰



25

Группировка пучка



Зависимость продольного размера сгруппированного пучка от размера инжектируемого пучка: 1 – начальная энергия 3 МэВ, амплитуда поля 20 МВ/м; 2 - начальная энергия 0.7 МэВ, амплитуда поля 10 МВ/м

- Согласно требованию на энергетический разброс ускоренного пучка ≤1%, заключаем, что фазовая длительность пучка должна быть около 5.7⁰.
- Если считать, что поле в первой ускоряющей структуре 20 МВ/м, то согласно графику на входе пучок должен иметь длительность в районе 10⁰.
- Если используем предускоритель-группирователь с амплитудой 10 МВ/м, то для выходной длительности 10⁰ входная длина пучка должна быть в районе 34⁰.
- Обеспечить такую длительность пучка должен канал группировки, расположенный перед предускорителем-группирователм.
- Выбранные амплитуды полей не критические и не приводят к перенапряжениям, что облегчает процесс тренировки и выхода на рабочий режим

Катодно-сеточный узел источника электронов



Слева – вид и размеры паркетной сетки катодного узла ГС-34. Справа – модель резонатора ВЧ пушки с катодно-сеточным узлом для расчета в CST-Studio

- 1. В CST-studio моделируются 3D поля резонатора ВЧ пушки с реальной сеткой: поля проникновения за сетку, поля резонатора
- 2. Поля экспортируются в код ASTRA
- 3. В коде ASTRA подбирается эквивалентная сетка. Признаки эквивалентности: прозрачность и углы электронов, приобретаемые за счет рассеивания на узлах сетки. Сравнение происходит с моделирование в CST-studio



 $-4.7 \times 10^6 -4.85 \times 10^4 -4.8 \times 10^4 -4.56 \times 10^6 -4.8 \times 10^6 -4.4 \times 10^6 -4.35 \times 10^4 -4.35 \times 10^6 -4.35 \times$

Эквивалентная прикатодная сетка для расчета динамики частиц в коде ASTRA: сверху – 3D модель; снизу – карта электрического поля в коде ASTRA

Моделирование динамики в ВЧ пушке

Расчетные параметры пучка на выходе ВЧ-пушки при фиксированной амплитуде напряженности поля 13 МВ/м в зависимости от фазы



- Средняя энергия пучка из пушки получается около 0.7÷0.8 МэВ.
- Извлекаемый заряд близок к 1 нКл при фазах инжекции 40÷50° и напряженности поля 13 МВ/м.
- При увеличении фазы инжекции возрастает не только заряд извлекаемого пучка, но и его продольный размер

Моделирование динамики в ВЧ пушке





Поперечные фазовые профили сгустка с зарядом 1 нКл. Нормализованный выходной эмиттанс в 23 мм мрад

- 1. После пушки характерная длина пучка около 40 мм, что, с учетом энергии 0.7 МэВ, соответствует 147 пс.
- 2. С точки зрения регулярной ускоряющей структуры с частотой 2856 МГц такая длительность равна фазовой протяженности 151°.
- 3. Перед предускорителем-группирователем пучок должен иметь фазовую протяженность в районе 34⁰.
- 4. Таким образом, после ВЧ пушки пучок необходимо сгруппировать в продольном направлении минимум в 5 раз.
- 5. С учетом того, что приводится среднеквадратичное значение длины пучка после пушки, коэффициент группировки необходим >5. Степень группировки в 10 раз выглядит оправданной и достижимой.

Амплитуда поля в ускоряющих структурах



Ускоряющая структура – диафрагмированный волновод: 1 – резонатор (регулярная ускоряющая ячейка), 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения



Распределения электрического поля вдоль ускоряющей структуры для входной мощности 40 МВт (слева) и 25 МВт (справа)

 $P(z) = P_0 e^{-2\alpha z}$ Распределение СВЧ мощности вдоль
структуры $E(z) = E_0 e^{-\alpha z}$ Распределение ускоряющего поля
вдоль структуры

 P_0 – мощность от генератора, которая считается постоянной, $E_0 = \sqrt{2P_0R_{sh}L}$, R_{sh} – шунтовое сопротивление, нормированное на длину, L – длина структуры, α – коэффициент затухания по полю, z – продольная координата.



Структура предускорителя-группирователя и распределение электрического поля вдоль нее при входной мощности 10 МВт

Моделирование динамики в линейном ускорителе



Среднеквадратичные поперечные размеры пучка



Продольная фазовая плоскость в конце ускорителя



Longitudinal Distribution

Продольное распределение плотности заряда пучка

Нагрузка током пучка

$$\Delta U_b(\tau) = -R_{sh}L \cdot I_0 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\tau_{0A}}{T_f}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{0A}}\right)\right] + \frac{\tau}{T_f} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{0A}}\right) \right\}$$

 $\tau_{0A} = 2Q_{0A}/\omega_0$ – постоянная времени, Q_{0A} – собственная добротность структуры, T_f – время заполнения структуры, τ – длительность пучка. Средний ток линейного ускорителя $I_0 = 54$ мА.



Параметры	Значение
Энергия	200 МэВ
Энергетический разброс в одиночном	0.3 %
сгустке (RMS)	
Горизонтальный эмиттанс (норм.)	20 мкм
Заряд пучка в одиночном сгустке	0.3 нКл
Энергетический разброс в	2.5%
последовательности 55 сгустков З	1

Ошибки выставки элементов канала группировки

Элементы отклонялись от оси случайным образом, следуя нормальному распределению со стандартным отклонением 1 мм



Распределение величины эмиттанса в конце предускорителя-группирователя при наличии случайных ошибок в выставке элементов, подчиняющихся нормальному распределению с дисперсией 1 мм

Распределение смещения пучка от оси в конце предускорителя-группирователя при наличии случайных ошибок в выставке элементов, подчиняющихся нормальному распределению с дисперсией 1 мм

Максимальные потери пучка не превышают 4%, а максимальный рост эмиттанса может составить около 30%, но вероятность этого незначительна. Смещения предускорителя-группирователя и согласующих соленоидов обеспечивают наиболее существенные возмущения траектории пучка. Ошибки выставки регулярных секций не приводят к потерям пучка и значительному увеличению эмиттанса 32

Стабильность фаз элементов линейного ускорителя



1 – первая регулярная ускоряющая структура, 2 – предускоритель-группирователь, 3 – резонатор третьей гармоники

Заряд, нКл	0.3	1
Для резонатора третьей гармоники, пс	51	21
Для структуры предускорителя-группирователя, пс	9.7	4.5
Для регулярных ускоряющих структур, пс		9.7
Минимальная величина фазовой стабильности	4.5	50

33

Магнитная система



«Рамочный» корректор



«М-образный» корректор



Соленоид канала группировки



Соленоид предускорителя

Тип корректора	Рамка	М	
Ток максимальный (А)	3	3.75	
Максимальная индукция поля	20.4·10 ⁻⁴	495·10 ⁻⁴	
в центре корректора (Тл)			
Максимальный интеграл	0.29	4.69	
магнитного поля (Тл•мм)			
Однородность интеграла поля	<5·10 ⁻³		
в области R=10 мм ∆∫B/∫B			

Апертура (мм)	38
Габаритные размеры линзы (мм)	342×3
	×100
Максимальный ток (А)	6
Магнитное поле в центре линзы пр	8.39.1
токе 6 А (Тл)	

	Апертура (мм)	225
<u>)</u>		555×55
	таоаритные размеры линзы (мм)	
	Ток максимальный (А)	200
ļ	Магнитное поле в центре линзы при	0.23
	включении двух соленоидов (Тл)	
	Эффективная длина линзы (мм)	330

Магнитная система

«Согласующий» соленоид



Апертура (мм)	40
	190×190×10
таоаритные размеры линзы (мм)	0
Ток максимальный (А)	3
Максимальное магнитное поле в центре линзы	0.1
(Тл)	
Эффективная длина линзы (мм)	92

Квадрупольная линза



Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	310×310×2
	00
Ток максимальный (А)	6
Интеграл градиент в центре линзы при токе 6 А (Тл)	0.62
Нормированная на основную шестая нормальная	<5.0.10-4
интегральная гармоника (B ₆ /B ₂) на радиусе 15 мм	
Нормированная на основную десятая нормальная	<5.0.10-4
интегральная гармоника (В ₁₀ /В ₂) на радиусе 15 мм	

Требования на изготовление ускоряющих структур
Ошибки ускоряющих ячеек







На основе приведенных выражений можно получить:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta d}{d} - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta f}{f_0}$$
$$\frac{\Delta\theta}{\Delta d} = \frac{\theta_0}{d} = 3.4^0 / \text{MM}$$
$$\frac{\Delta\theta}{\Delta R} = -\theta_0 \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{1}{R} = -136^0 / \text{MM}$$



Ускоряющая ячейка

 ω_{10} – резонансная круговая частота одиночной ячейки связи (частота при $\theta = \pi/2$),

 θ – фазовый набег на ячейку (вид колебания),

d – период структуры,

k_c – коэффициент связи ускоряющих ячеек

 $\omega(\theta = \pi)$ – конечная частота полосы (при моде колебания π), $\omega(\theta = 0)$ – начальная частота полосы (при моде колебания 0), $\omega(\theta = \pi/2)$ – середина полосы, при моде колебания $\pi/2$

Л — длина волны в диафрагмированном волноводе.

Влияние точности частоты СВЧ генератора регулярной ускоряющей структуры



$$W_{CZ} = \frac{e E_0}{\alpha^2 + \tilde{\beta}^2} \left[e^{-\alpha L} \left(\tilde{\beta} \sin(\tilde{\beta}L + \varphi_0) - \alpha \cos(\tilde{\beta}L + \varphi_0) \right) + (\alpha \cos \varphi_0 - \tilde{\beta} \sin \varphi_0) \right]$$
 - изменение энергии пучка для структуры с постоянным импедансом

Влияние ошибок набега фазы на набор энергии ПУЧКОМ

$\omega = \frac{\omega_{10}}{\sqrt{1 + k_c \cos\theta}}$	- полоса частот ускоряющей структуры

$$\beta_p = \frac{\omega_{10}d}{\theta c} \frac{1}{\sqrt{1 + k_c \cos\theta}}$$

 $k_c = \frac{\omega(\theta = \pi) - \omega(\theta = 0)}{\omega(\theta = \pi/2)}$

 $\beta_{gr} = k\omega_{10}d \, \frac{\sin\theta}{2c(1+k_c\cos\theta)^{3/2}}$

- коэффициент связи ускоряющих ячеек

- нормированная групповая скорость волны

 $\theta = \beta d = \frac{2\pi d}{\Lambda}$

- основной вид колебания





- ω_{10} резонансная круговая частота одиночной ячейки связи (частота при $\theta = \pi/2$),
- θ фазовый набег на ячейку (вид колебания),
- d период структуры,
- *k*_c коэффициент связи ускоряющих ячеек

 $\omega(\theta = \pi)$ – конечная частота полосы (при моде колебания π), $\omega(\theta = 0)$ – начальная частота полосы (при моде колебания 0), $\omega(\theta = \pi/2)$ – середина полосы, при моде колебания π/2

Л — длина волны в диафрагмированном волноводе.

 $\frac{dW}{dz} = eE_z(z)\cos\varphi(z)$ - изменение энергии частицы $\frac{d\varphi}{dz} = \tilde{\beta}$ $\tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{\beta_n} - 1 \right)$

- изменение фазы частицы

- эффективное волновое число для частицы, скорость которой близка к скорости света 39

Пусть рабочая мода колебания имеет отклонение $\Delta \theta$, тогда фазовая скорость

 $\beta_p = \frac{\omega_0 d}{\theta_0 + \Delta \theta} \frac{1}{c\sqrt{1 + k\cos(\theta_0 + \Delta \theta)}}$

 $\frac{1}{\beta_p} \approx \frac{1}{\beta_{p0}} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{k \sin \theta_0}{1 + k \cos \theta_0} \Delta \theta + \frac{\Delta \theta}{\theta_0} \right]$

 β_{p0} – нормированная фазовая скорость при основном виде колебания θ_0)

$$\frac{ksin\theta_0}{2(1+kcos\theta_0)} = \frac{\beta_{gr}}{\theta_0\beta_p} \longrightarrow \frac{1}{\beta_p} \approx \frac{1}{\beta_{p0}} \left[1 - \frac{\beta_{gr}}{\beta_{p0}} \frac{\Delta\theta}{\theta_0} + \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \right]$$

Если считать, что фазовая скорость волны при рабочем виде колебания без фазовых отклонений совпадает со скоростью пучка и близка к скорости света $\beta_{p0} \approx 1$, то с учетом определения фазы рабочего вида колебаний $\theta_0 = 2\pi d/\lambda_0$ можно окончательно записать

$$\tilde{\beta} \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 - \beta_{gr}\right) \frac{\Delta \theta}{\theta_0} = \left(1 - \beta_{gr}\right) \frac{\Delta \theta}{d}$$

Для частицы, пролетевшей *N* периодов:

$$W_{t} = ed \sum_{i=1}^{N} E_{i} \frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2)}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2} \cos\left(\left[1-\beta_{gr}\right]\left[\sum_{k=1}^{i}\Delta\theta_{k}-\frac{\Delta\theta_{i}}{2}\right]+\varphi_{0}\right)$$

$$\delta W_{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2)}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2} \cos\left(\left(1-\beta_{gr}\right)\left[\sum_{k=1}^{i}\Delta\theta_{k}-\frac{\Delta\theta_{i}}{2}\right]+\varphi_{0}\right)$$

$$\frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_{i}/2} \approx 1 \quad \Longrightarrow \quad \delta W_{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \cos\left(\left(1-\beta_{gr}\right)\left[\sum_{k=1}^{i}\Delta\theta_{k}-\frac{\Delta\theta_{i}}{2}\right]+\varphi_{0}\right)$$

Для иллюстрации рассмотрим набор энергии в ускоряющей структуре линейного ускорителя ЦКП «СКИФ» из 85 ускоряющих ячеек с периодом d = 34.98 мм, модой колебания $\theta_0 = 120^{\circ}$, групповой скоростью $\beta_{gr} = 0.021$ и частотой 2856 МГц. В качестве начального будем использовать нормальное распределение частиц по фазе с $\sigma_{\varphi} = 1.7^{\circ}$ ($6\sigma_{\varphi} = 10^{\circ}$)



Нормальное распределение частиц, инжектируемого в ускоряющую структуру с $\sigma_{\varphi} = 1.7^0$

Для нулевого прироста энергии набег фазы через *N* ячеек должен быть равен

ЗЫ
$$\Delta \theta = \frac{\pi}{(1-\beta_{gr})N}$$



энергии будет нулевым при пролете 85 ячеек - $\Delta \theta = 2.163^{\circ}$. Это соответствует изменению периода $\Delta d = 0.6$ мм или изменению радиуса ускоряющей ячейки $\Delta R = -16 \, \mu$ м 41



Плотность относительного распределения средней энергии частиц с $\sigma_{\varphi} = 1.7^{\circ}$ при пролете через структуры со случайным набором фазовых ошибок (слева направо): 1- $\Delta \theta \in [-1^{\circ}, 1^{\circ}]$, 2 - $\Delta \theta \in [-5^{\circ}, 5^{\circ}]$, 3 - $\Delta \theta \in [-9^{\circ}, 9^{\circ}]$



Плотность распределения энергетического разброса в пучке с $\sigma_{\varphi} = 1.7^{\circ}$ при пролете через структуры со случайным набором фазовых ошибок в диапазонах: 1- $\Delta \theta \in [-1^{\circ}, 1^{\circ}]$, 2- $\Delta \theta \in [-5^{\circ}, 5^{\circ}]$, 3 - $\Delta \theta \in [-9^{\circ}, 9^{\circ}]$. Разброс в отсутствии фазовых ошибок вычтен из полученных данных

Δθ, °	Наиболее вероятная	Среднеквадратичный энергетический разброса с
	средняя энергия, %	вычетом разброса в пучке без ошибок, %
0	99.96	0
±1	99.92	0.1
±5	99.6	0.6
±9	98.2	1.7

43

Изготовление элементов ускорителя

Изготовление ВЧ пушки



Блок-схема (слева) и чертеж ВЧ пушки. 1- задняя стенка, 2 – ввод ВЧ мощности, 3- электрод, 4 – передняя стенка, 5 – бобышка, 6 – катод, 7 – порт вакуумной откачки, 8 – пьезоактюатор, 9 – винт регулировки наклона вставки, 10 – винт ручной регулировки резонансной частоты, 11 – трубки водяного охлаждения вставки, 12 – сильфон, 13 – каналы водяного охлаждения корпуса, 14 – вставка, 15 – модулятор катодно-сеточного узла, 16 – обечайка, 17 – вакуумный затвор

Резонансная частота, МГц	178.5
Импульсная ВЧ мощность, кВт	325.2 (до 600 кВт)
Полное напряжение на резонаторе, МВ	0.74
Нагруженная добротность	14700
Эффективный импеданс, Ом	56.6
Электрическое поле на оси, МВ/м	11.0
Максимальное ВЧ поле на	19.6
поверхности, МВ/м	
ВЧ напряжение измерительных петель,	20
В	
Коэффициент связи ввода ВЧ мощности	1
Длительность ВЧ импульса, мкс	100
Диапазон перестройки частоты,	100\100
мкм\кГц	

Изготовленная ВЧ пушка



Катодно-сеточный узел и модулятор управления током пучка





Катодно-сеточный узел



Импульсы модулятора и его вид





Модулятор управления током эмиссии катодно-сеточного узла работает в импульсном режиме в диапазоне частот 0 - 178.5 МГш. Последовательность импульсов регулируется «шаблонами» требованиям специальными согласно экспериментаторов импульса OT одного ЛО ИХ последовательности с частотой ≤178.5 МГц. Длительность отпирающего импульса на полувысоте около 1 нс. Отпирающее напряжение модулятора регулируется до -100 В. Для запирания пучка на катод подается положительное постоянное напряжение ≥20 В. 8

Резонатор третьей гармоники



Резонансная частота, МГц	535.5
Импульсная ВЧ мощность, кВт	5.3 (до 10 кВт)
Средняя ВЧ мощность, Вт	1.5
Полное напряжение на резонаторе, МВ	0.151
Нагруженная добротность	20200
Эффективный импеданс, Ом	148.2
Максимальное поле Е на оси, МВ/м	2.42
Максимальное ВЧ поле на поверхности,	4.4
МВ/м	
ВЧ напряжение измерительных петель, В	20
Коэффициент связи ввода ВЧ мощности	1
Длительность ВЧ импульса, мкс	100
Диапазон перестройки частоты, мкм/кГц	100/160

Магнитная система





Квадруполи



Согласующий соленоид



Магниты	КОЛ.	В, ІЛ	I , A
Соленоиды канала	5	0.0858	6
группировки			
Соленоиды ПГ	2	0.23	200
Согласующий	1	0.098	3
соленоид			
Корректора	8	0.0019	3
канала			
группировки			
Квадрупольные	3	0.6	6
линзы		(интеграл)	
Корректора	3	0.047	6
регулярной части			
линака		50	
/1		50	

Соленоид канала группировки



М-образный корректор

Рамочный корректор

Соленоид предускорителя

Изготовление ускоряющих структур



Ускоряющая структура – диафрагмированный волновод: 1 – резонатор (регулярная ускоряющая ячейка), 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка







охлаждения

3D модель трансформатора типа волны

Ускоряющие ячейки: слева - регулярная; справа – переходная







Структура преускорителя-группирователя

Изготовление ускоряющих структур



Ускоряющие структуры регулярная и предускоритель-группирователь









Возбуждающее тело в структуре



Измерения ускоряющих структур



Фазовые диаграммы ускоряющих структур. Верхний ряд слева-направо: регулярные структуры 1, 2 и 3. Нижний – структуры 4, 5 и предускоритель-группирователь

Структу	Рабочая частота	Рабочая	Суммарная	RMS	Отражен
ра	при вакууме и	температ	ошибка фазы	фазовое	ие по
	рабочей	ypa, ⁰ C	на структуру	отклоне	мощност
	температуре,		по модулю	ние	И
	ΜГц		менее		
1	2856	36	0.8^{0}	$\pm 1.2^{0}$	3%
2	2856	27	2.5°	$\pm 1.7^{0}$	2.5%
3	2856	31	0.9^{0}	$\pm 1.5^{0}$	3%
4	2856	30	1.9^{0}	$\pm 2.4^{0}$	2.4%
5	2856	36	1.7^{0}	$\pm 4^0$	5%
ПГ	2856	31	2^{0}	$\pm 3^{0}$	3%

Измеренный коэффициент стоячей волны от структуры



Другие элементы ускорителя

Термоэлектрический нагреватель



Волноводные нагрузки



Волноводный аттенюатор



100000

200000

Шаги шагового двигателя — При движении двигателя в прямом наравлении

---- При движении двигателя в обратном направлении

300000

400000

0

0

-10

920 194 (1940 -50

-60

Затухание проходящей

Волноводный фазовращатель





— — — движение центральной калодки от шагового двигателя

Клистрон – источник СВЧ мощности линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»

Разработка клистрона

За основу разработки был выбран клистрон 5045 производства SLAC (Stanford Linear Accelerator Laboratory), не уступающий по характеристикам клистрону E3730A и хорошо знакомый в ИЯФ СО РАН, поскольку эти клистроны давно и успешно используются для питания линейного ускорителя инжекционного комплекса ВЭПП-5. Приобретенный опыт эксплуатации, имеющиеся решения по ряду элементов – соленоид с источником питания, система радиационной защиты, источники напряжения накала, магниторазрядного насоса и т.д. позволяли существенно сократить время разработки.

Параметр	Клистрон	Клистрон
	5045	E3730A
Частота	2856 МГц	2856 МГц
Выходная импульсная мощность	60 МВт	50 МВт
Входная мощность	500 Вт	500 Вт
Длительность СВЧ импульса	3.5 мкс	4 мкс
Частота повторения	До 120 Гц	До 50 Гц
Ток пучка	400 A	400 A
Высокое напряжение анода	350 кВ	325 кВ

Расчет катодного узла и магнитной системы



Магнитное поле, Гс

900 1000 1100

65

Расчет возбуждающего резонатора

Одним из ключевых элементов клистрона, определяющих эффективность его работы, является возбуждающий резонатор, к конструкции которого предъявляются ряд технических и технологических требований. Возбуждающий резонатор клистрона должен быть:

- согласован с внешней линией и с рабочей частотой при пролете пучка,
- обладать вакуумным СВЧ вводом,
- позволять удобную коррекцию частоты и связи по результатам измерений,
- обеспечивать размещение клистрона внутри фокусирующего соленоида,
- обеспечивать подсоединение коаксиальной линии возбуждения с учетом особенностей конструкции и сборки клистрона,
- позволять коррекцию частоты резонатора после окончательной пайки системы группировки пучка.



Модель возбуждающего резонатора

Эквивалентная схема возбуждающего резонатора



Эквивалентная схема возбуждающего резонатора

 $G_{bg} = \frac{I}{U} \frac{1 - \frac{\theta_d}{2} sin \theta_d - cos \theta_d}{\theta_d^2} \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}$ - активная пучка для

проводимость для сеточного резонатора

 $B_{bg} = \frac{I}{U} \frac{\sin\theta_d - \frac{\theta_d}{2}(1 + \cos\theta_d)}{\theta_d^2} \frac{2}{v_b(v_b + 1)} - \text{реактивная проводимость}$

для пучка сеточного резонатора

$$G_{bc} = \frac{I}{U}M^2 \left[\left(\frac{1}{m_b^2} - \frac{\theta_b^2}{4}\right) \left(1 - \frac{\theta_d}{2}ctg\frac{\theta_d}{2} + \frac{1}{2}\theta_a^2 m_a \right) - \frac{\theta_b^2}{4} \right] \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}$$

 $\theta_b = \beta b \ \theta_a = \beta a$ – пролетные углы, связанные с радиусами пучка b и вакуумной камеры a соответственно,

I - ток пучка,

U – напряжение катод-анод, $\theta_d = \beta d$ – пролетный угол, $\beta = \omega_0 / v$,

 ω_0 – круговая частота резонатора,

v – скорость электронов, γ_b – релятивистский фактор.

d - промежуток взаимодействия с резонатором

 $m_b = 2 \frac{I_1(\theta_b)}{\theta_b I_0(\theta_b)}$, $m_a = 2 \frac{I_1(\theta_a)}{\theta_a I_0(\theta_a)}$ – коэффициенты связи $(I_0(x) \, \mathrm{u} \, I_1(x) - \mathrm{модифицированные функции Бесселя нулевого и$ первого порядка соответственно),

 $M = \frac{\sin\left(\frac{\theta_d}{2}\right)}{\frac{\theta_d}{2}} \frac{2I_1\left(\frac{\theta_b}{\gamma_b}\right)}{\frac{\theta_b}{\gamma_c}I_0\left(\frac{\theta_d}{\gamma_c}\right)} -$ коэффициент связи пучка с резонатором

Параметры резонатора



Распределение электрического поля на оси возбуждающего резонатора клистрона ИЯФ СО РАН при запасенной энергии 1 Дж

Активная проводимость в зависимости от тока пучка ($P_{\mu} = 1.7$ мкА/В^{1.5}). Сплошная линия получена для объемного резонатора, пунктирная – для сеточного. При высоких напряжениях отличие реактивностей пучка 7%.

- характеристическое сопротивление $\rho = 68 \text{ Om}$,
- шунтовое сопротивление $R_{sh} = 0.72$ МОм,
- собственная добротность $Q_0 = 5430$.
- Радиус пролетного канала a = 15.85 мм.
- Длина зазора связи с пролетной камерой 9 мм.



Изменение частоты входного резонатора под действием тока пучка

Изменение частоты резонатора от тока пучка ($P_{\mu} = 1.7 \text{ мкA/B}^{1.5}$). При напряжении 350 кВ изменение частоты резонатора составляет 2 МГц



63

Расчет резонатора с пучком



Отражение минимально вблизи значения внешней добротности $Q_e \approx 130$, что при расчетной собственной добротности резонатора $Q_0 = 5430$ дает коэффициент связи равным $\beta = 41.8$.



Среднеквадратичное напряжение, действующее на пучок, в зависимости от входной мощности

- 1. В реальности значение коэффициента связи β = 41.8 получить затруднительно.
- 2. Коэффициент связи будет близким к $\beta = 10$. Тогда внешняя добротность $Q_e = 543$, а отражение по мощности 36%.
- 3. При входной мощности 500 Вт среднеквадратичное изменение энергии пучка 1.7 кэВ. 64

Расчет канала группировки



Общий вид клистрона: 1 – катод, 2 – анод, 3 – первый возбуждающий резонатор, 4-7 – пассивные группирующие резонаторы (№ 2-5 соответственно), 8 – коллектор, 9 – выходное волноводное СВЧ окно

Расчет канала группировки

$$v_i = \frac{1}{2} k_r M_i^2 I_{m_{i-1}} G_0 R_i \cos(\varphi_i)$$
 - коэффициенты скоростной модуляции для каждого зазора резонатора

 $v_1 = \frac{M_1}{2} \frac{v_1}{v_b} k_r$ - коэффициенты скоростной модуляции для первого зазора резонатора с учетом найденного напряжения

 $V_i = I_b M_i \chi_{i-1} R_i \cos(\varphi_i)$ - напряжение в *i*-м резонаторе

 $\chi_i = \frac{v_i}{a_q} \sin(a_q \varsigma_{0_i})$ - параметр группировки пучка в дрейфовом промежутке перед резонатором

$$\varsigma_{0_{i}} = \frac{L_{i}\omega_{0}}{\beta_{b}c} - \text{угол пролета промежутка дрейфа} \qquad \qquad R_{p}^{2} = 4 \left[\frac{J_{1} \left(2.405 \frac{b}{a} \right)^{2}}{2.405^{2} J_{1} \left(2.405 \right)^{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{2.405}{\theta_{a}} \right)^{2} \right)} + \frac{J_{1} \left(5.527 \frac{b}{a} \right)^{2}}{5.527^{2} J_{1} \left(5.527 \right)^{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{5.527}{\theta_{a}} \right)^{2} \right)} \right] - \text{коэффициент редукции плазменной частоты}$$

 $I_i = I_b \chi_{i-1}$ - ток первой гармоники пучка

$$a_q = \frac{R_p}{\gamma_b} \cdot \left(\frac{2}{1+\gamma_b}\right)^{1/4}$$
 - параметр расталкивания

 $k_r = \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b+1)}$ - коэффициент релятивистской поправки

 $R_i = \frac{1}{1/\rho_i Q_{0i} + G_{bi}}$ - полное активное сопротивление резонатора

$$\varphi_i = arctg\left(rac{B_i + B_{b_i}}{rac{1}{R_i} + G_{b_i}}
ight)$$
 - фаза колебания в резонаторе

$$B_i = \frac{\omega_0^2 - \omega_i^2}{\omega_0 \omega_i} \cdot \frac{1}{\rho_i Q_{0_i}} -$$
реактивные проводимости резонаторов

66

Предпоследний резонатор

Предпоследний резонатор клистрона должен быть значительно расстроен по частоте, что приводит к сильной группировке пучка в последнем дрейфовом промежутке. В итоге процесс сжатия пучка становится нелинейным, что приводит к увеличению параметров расталкивания и группировки в последнем дрейфовом промежутке χ_{N-1}

 $\chi_{N-1} = \frac{\nu_{N-1}}{a_{qn}} \sin(a_{qn} \varsigma_{0_i}) + I_{m_{N-1}} \left(1 - \cos(a_{qn} \varsigma_{0_{N-1}}) \right)$

 $a_{an} = f_a(\theta)a_a$

 $f_a(\theta) = 0.705 \left[1 + \frac{\pi}{2\theta} \left(1 - e^{-4.8\theta/\theta_a} \right) \right]^{1/2}$

 $cos\theta = \frac{J_2(2\chi_{N-1})}{J_1(\chi_{N-1})}$

КПД электронного пучка с учетом нелинейного группирования перед выходным резонатором определяется как

$$\eta_e = J_1(\chi_{N-1}) \left(1 + \frac{I_{mN-2}}{\chi_{N-1}} \right) \xi$$
$$\xi = \left(\frac{\beta_{bmin}}{\beta_b} \right)^2 \qquad \beta_{bmin} = \beta_b - |\beta_{bmax}|$$

$$eta_{bmax}$$
 – максимум выражения

$$\beta(t) = -\left[a_{qn}I_{m_{N-1}}\left(\sin\left(a_{qn}\varsigma_{0_{N-1}}\right) - a_{qn}\chi_{N-1}\sin\left(a_{qn}\varsigma_{0_{N-1}}\right)\sin(\omega_{0}t) - \left(\cos\left(a_{qn}\varsigma_{0_{N-1}}\right) + a_{qn}\chi_{N-1}\sin\left(a_{qn}\varsigma_{0_{N-1}}\right)\sin(\omega_{0}t)\right)\right]\beta_{b}\sin(\omega_{0}t).$$

Полную выходную СВЧ мощность η , которая будет поступать в нагрузку, можно найти с учетом контурного КПД выходного резонатора

 $\eta_{c} = 1 - \frac{R_{LN}}{R_{N}}, \qquad R_{LN} -$ нагруженное сопротивление выходного *N*-го резонатора $\eta = \eta_{e} \eta_{c} = J_{1}(\chi_{N-1}) \left(1 + \frac{I_{mN-2}}{\chi_{N-1}}\right) \left(1 - \frac{R_{LN}}{R_{N}}\right) \xi_{1} \qquad \qquad 67$

Результаты расчета



Номер	Напряжение в	Параметр	Ток первой
резонатора	резонаторе, кВ	группировки	гармоники
		после і-го	модуляции пучка,
		резонатора χ_i	Α
1	1.7	3.8×10 ⁻³	
2	10.3	0.023	1.3
3	26.2	0.055	7.9
4	53.2	0.483	19.4
5	212.0	0.881	169
6	323.7		432.4

Распределения электрических полей на оси резонаторов при запасенной энергии 1 Дж: 1- резонатор 2, 2 – резонатор 3, 3 – резонатор 4, 4 – резонатор 5



Для согласованного с пучком выходного резонатора получаемая СВЧ мощность составила 52 МВт. Внешняя добротность выходного резонатора в этом случае составила $Q_e = 16.5$. С учетом входной СВЧ мощности 500 Вт, коэффициент усиления составил 50.2 дБ, а КПД – 42.4%.

Результаты расчета полосы усиления клистрона



Коэффициент усиления клистрона при токе пучка 350 А и напряжении 350 кВ: 1 – моделирование программой CST-Studio, 2 – теоретическая оценка, 3 – одномерный численный расчет с помощью кода VIDISK

Изготовление клистрона



Номер	Измеренная	Расчетная
резонатора	собственная	собственная
	добротность	добротность
1	2640 при связи	5430
	с внешним	
	коаксиалом $\beta =$	
	10	
2	6354	6940
3	6310	6900
4	7349	7790
5	7900	8520



Стенд для испытания клистрона: 1 и 2 соленоид и система группировки пучка внутри соленоида соответственно, 3 – измерительные волноводные ответвители, 4 – выходное вакуумное волноводное окно, 5 – согласованная водяная нагрузка, 6 – магниторазрядный насос 70

Результаты измерений



клистрона

Рассчитанное среднеквадратичное напряжение изготовленного резонатора при пролете тока пучка 310 A с ускоряющим напряжением между катодом и анодом 350 кВ

Уточненный расчет

Номер	Напряжение в	Параметр	Ток первой
резонатора	резонаторе, кВ	группировки	гармоники
		после і-го	модуляции
		резонатора χ_i	пучка, А
1	2.2	4.8×10 ⁻³	
2	12.9	0.028	1.5
3	29.9	0.063	8.7
4	54.7	0.507	19.5
5	198.9	0.802	157.2
6	272.4		378.6

С учетом уменьшенной измеренной добротности возбуждающего резонатора и тока пучка клистрона 310 А, полная добротность резонатора увеличится, а согласование с внешним подводящим коаксиалом улучшится. Это должно привести к увеличению напряжения в возбуждающем резонаторе на 23%. В итоге, уменьшение несмотря тока на пучка, степень группировки в возбуждающем резонаторе увеличится, частично должно компенсировать уменьшение ЧТО выходной СВЧ мощности клистрона.

Согласно аналитическому расчету с новыми параметрами СВЧ мощность составит 47 МВт. Однако выходная мощность зависит от поперечного размера пучка. Если при токе 310 А увеличить радиус пучка на 8% (12 мм вместо 11 мм), то расчет показывает выходную СВЧ мощность 50.5 МВт. С учетом проделанного анализа было решено, что клистрон может обеспечить выходную СВЧ мощность в районе 50 МВт при подстройке поперечного размера пучка с помощью магнитного поля.

Результаты измерений





 State
 <th

Зависимость выходной импульсной СВЧ мощности клистрона от входной при разных токах пучка клистрона

Осциллограммы сверху вниз: синяя – огибающая СВЧ мощности в нагрузке, зеленая – огибающая выходной СВЧ мощности перед выходным вакуумным окном, красная – огибающая СВЧ сигнала, отраженного в клистрон вакуумным окном, желтая – импульс запуска

Огибающая отраженного сигнала из резонатора с магнитным полем соленоида; ток пучка 300 А. Сверху вниз: синий – сигнал в нагрузке после вакуумного СВЧ окна, зеленый – отраженный сигнал из резонатора, красный – отраженный сигнал от СВЧ окна, желтый – импульс запуска
Результаты измерений



рассчитанная численным м Измеренная выходная СВЧ мощность клистрона в измеренная выходная импу. зависимости от входной мощности для разных токов пучка. анодного напряжения при вхс Точность измерения ±2.3%

Стенд ЛИНАК-20

Описание стенда



Схема ускорительного стенда: 1 – ВЧ пушка, 2 – канал группировки, 3 – предускоритель-группирователь, 4 – регулярная ускоряющая структура, 5 – цилиндр Фарадея в радиационной защите, 6 – датчик тока пучка, 7 – люминофорные датчики, 8 – черенковские датчики, 9 – магнитный спектрометр, 10 – резонатор третьей гармоники



Описание стенда



Волноводный тракт стенда линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»: 1 – предускоритель группирователь 2856 МГц, 2 – регулярная ускоряющая структура, 3 – клистрон, 4 – 7 дБ ответвитель, 5 – фазовращатель регулярной ускоряющей структуры, 6 – фазовращатель в составе аттенюатора для предускорителя-группирователя, 7 – фазовращатель предускорителя-группирователя



Модулятор клистрона



Клистрон Canon E3730A



ВЧ усилители для питания пушки и резонатора группировки

Работа с ВЧ пушкой



Состав оборудования для запуска ВЧ пушки: 1 – пушка, 2 – вакуумный шибер, 3 – датчик тока FCT (Fast Current Transformer), 5 – датчик черенковского излучения, 6 – люминофорный датчик, 7 – коллиматор, 8 – спектрометр, 9 – цилиндр Фарадея

Осциллограммы сигналов с ВЧ пушки: С2 (синий) – сигнал с петли резонатора ВЧ пушки (прошедший), С3 (красный) – сигнал с петли в фидере (отраженный от резонатора пушки), С4 (зеленый) – сигнал, поступающий из ВЧ усилителя

Работа с ВЧ пушкой



Следы электронов темнового тока на первом люминофоре после ВЧ пушки



Заряд пучка в ВЧ пушке в зависимости от напряжения в зазоре сетка-катод. Постоянное запирающее напряжение равно





Результат измерения энергии пучка ВЧ пушки в зависимости от мощности резонатора

Квадрат размера пучка после ВЧ пушки в зависимости от силы линзы фокусирующего соленоида

Работа с ВЧ пушкой



Длительность пучка ВЧ пушки от фазы напряжения предусилителя: кружки/точки – запирающее напряжение катода 40/20 В и отпирающего напряжения модулятора – 90/–30 В

Работа с клистроном



Сигналы клистрона: 1 и 2 – выходная и отраженная огибающие СВЧ мощности, 3 – высокое напряжение на катоде клистрона, 4 – сигнал с предусилителя клистрона



Баланс мощностей ускорителя стенда ЛИНАК-20

Первое прохождение пучка



Осциллограммы тока пучка с датчиков FCT сразу после пушки – желтый сигнал (канал 1), перед – голубой (2) и после – розовый (3) ускоряющей структуры



Изображение пучка после ускоряющей структуры на люминофоре спектрометра спектрометра

По измерениям спектрометра, средняя энергия пучка составила 30 МэВ при мощности клистрона 20 МВт, что оказалось примерно на 10% меньше ожидаемого

Группировка пучка



Зависимость длительности пучка с зарядом 0.4 нКл (ширина на полувысоте) на первом черенковском датчике канала группировки от фазы резонатора третьей гармоники



Продольный профиль пучка после предускорителя-группирователя: слева – изображение со стрик-камеры, справа – продольный профиль пучка (зеленая кривая) и аппаратная функция стрик-камеры (синяя кривая). Ширина пучка на полувысоте – 18 пс



Зависимости пучка смешения на люминофорном датчике после предускорителя-группирователя от тока Мощность корректора. дипольного В предускорителе 2 МВт вместо 10 МВт. Ожидаемая энергия 1.6 МэВ вместо 3.6 MэB.

Полный захват в режим ускорения



Осциллограммы тока пучка с датчика тока FCT сразу после ВЧ пушки (желтый), перед (красный) ускоряющей структурой на выходе канала группировки и после структуры (зеленый)



Сигнал с цилиндра Фарадея, соответствующий заряду сгустка 0.3 нКл



Изображение продольного профиля пучка на четвертом черенковском датчике. Длительность пучка на полувысоте – 19 пс

Полный захват в режим ускорения



Измерение энергии одного сгустка спектрометром в конце ускорителя. Средняя энергия $34\pm0.5\%$ МэВ, разность энергий на полувысоте распределения 0.9 МэВ (rms $\frac{\Delta W}{W} = 1.1$ %). Заряд пучка 0.3 нКл, мощность клистрона 20 МВт

Увеличение энергии



Сигналы клистрона: огибающая СВЧ мощности с выхода клистрона – желтый график (канал 1) и отраженная в клистрон – красный (3), высокое напряжение на катоде клистрона – голубой (2), сигнал с предусилителя клистрона – зеленый (4)





Измерение энергии пучка спектрометром в конце ускорителя. Средняя энергия $39\pm0.5\%$ МэВ, разность энергии на полувысоте 0.9 МэВ (среднеквадратичное относительное значение $\Delta W/W = 1.1$ %). Заряд пучка 0.3 нКл, мощность клистрона 30 МВт



Результаты измерения поперечного эмиттанса пучка в конце ускоряющей структуры. Нормализован ный эмиттанс составил 40 мкм.рад

Многосгустковый режим



Осциллограммы последовательности сгустков: желтый сигнал – сразу после ВЧ пушки, оранжевый – перед ускоряющей структурой на выходе канала группировки, зеленый – после ускоряющей структуры



Измерение энергии 38-ми сгустков электронов. Средняя энергия $39\pm0.5\%$ МэВ, разность энергии на полувысоте разпределения 0.9 МэВ (среднеквадратичное относительное значение $\Delta W/W = 1.1\%$). Заряд пучка в сгутске 0.3 нКл, мощность клистрона 30 МВт



Итоговый достигнутые параметры

СВЧ мощность клистрона	30 МВт
Энергия пучка	39±0.5% МэВ
Ср. квадр. энергетический разброс	1.1%
Нормализованный поперечный	40 мкм
эмиттанс	
Длительность пучка на полувысоте	20 пс
Заряд в сгустке	0.3÷1 нКл

Заключение

- 1. Разработаны концепция и схема линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», сформулированы принципы его создания, запуска, настройки и эксплуатации.
- 2. Выработаны основные конструктивные решения, как всего линейного ускорителя, так и его отдельных систем м узлов.
- 3. Проведено исследование возможности и условий достижения проектных параметров пучка с учетом выбранной схемы ускорителя и его систем.
- 4. Проведен цикл расчетов (аналитических и численных) динамики пучка, оценено влияние возможных погрешностей выставки, изготовления, настройки и работы элементов ускорителя на параметры пучка.
- 5. Разработаны методические подходы к созданию элементов ускорителя, включая ускоряющие структуры и клистрон.
- 6. Разработаны подходы и созданы измерительные стенды для испытания и настройки элементов линейного ускорителя.
- 7. Создан стенд ЛИНАК-20, который является начальной секцией линейного ускорителя и включает в себя критически важные элементы ускорителя, влияющие на дальнейшее ускорение пучка: источник электронов, канал группировки, предускоритель-группирователь и первая регулярная ускоряющая структура. Проведенные на стенде эксперименты подтвердили работоспособность концепции и позволили получить необходимые параметры пучка.

Создан первый отечественный СВЧ клистрон с импульсной выходной мощностью 50 МВт на частоту 2856 МГц. Проектные параметры клистрона подтверждены экспериментально. По результатам создания первого клистрона были изготовлены дополнительно два клистрона с выходной СВЧ мощностью в районе 60 МВт.

Выносимые на защиту положения

- Результаты проделанных расчетов нового мощного импульсного клистрона показывают возможность получения выходной импульсной СВЧ мощности 50 МВт на рабочей частоте 2856 МГц.
- 2. Разработанный и созданный макет клистрона позволил провести экспериментальное исследование и оптимизацию параметров клистрона.
- 3. Измеренные параметры клистрона подтвердили правильность учета эффектов, влияющих на параметры электронного пучка и выходного СВЧ сигнала, а также работоспособность клистрона в нужных режимах с выходной импульсной мощностью 50 МВт.
- 4. Разработанные концептуальная схема и конструкция линейного ускорителя позволили получить пучок электронов с параметрами, требуемыми для инжектора источника СИ ЦКП «СКИФ».
- 5. Измеренные параметры пучка электронов в начальной части линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» подтверждают правильность расчетов и эффективность технических решений, использованных при создании линейного ускорителя. 90

Апробация работы

- 1. XIV Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц памяти проф. В.П. Саранцева, Россия, г. Алушта, 22-25 сентября 2022 г.
- XXVIII Международная конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2023, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 11-15 сентября 2023 г.
- Рабочее совещание по проблемам создания источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ», 21-22 марта 2019 г., ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
- 4. Рабочее совещание по проблемам создания источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ», 7-8 сентября 2023 г., ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

Публикации по теме диссертации

- Вакуумное СВЧ-окно S-диапазона для мощного клистрона / А. М. Барняков [и др.] Текст : электронный // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. с. 72–77. URL: 1. https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S003281621802012X. – Лата обрашения 22.10.2022
- 2. Д. А. Никифоров, А. Е. Левичев, Н. Абед. Разработка источников электронов для современных и будущих источников СИ и коллайдеров в ИЯФ СО РАН. – Текст : электронный // Письма ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 55, №4. - С. 1304-13.17. URL: http://www1.jinr.ru/Pepan/v-55-4/87 Nikifirov r.pdf. - Дата обращения 20.11.2024
- Разработка клистрона S-диапазона. / А. В. Андрианов [и др.] Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ 2020. Т. 17, № 4(229). С. 580–586. URL: 3. http://www1.jinr.ru/Pepan letters/panl 2020 4/32 Andrianov 2.pdf. – Дата обрашения 15.02.2023
- 4. Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов / С. М. Гуров [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №7. – С.3-7. URL: https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S1028096020060072. – Дата обращения 01.11.2024
- 5. Дронова Е. В., Левичев А. Е., Андрианов А. В. Анализ передачи мощности от генератора в пучок для ускоряющих структур разных типов. – Текст : непосредственный // Письма в ЭЧАЯ. – 2021. – Т. 18. – № 5(237). - C. 492-50. - URL: http://www1.jinr.ru/Pepan letters/panl 2021 5/08 Dronova.pdf. - Дата обращения 04.06.2024
- Results of manufacturing and operation of the first accelerating structures for the linear accelerator of the SKIF injector based on a disk-loaded waveguide. Текст : электронный / Levichev A. [и др.]. // Journal of 6. Instrumentation. - 2023. - V.18. - URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001. - Дата публикации 03.07.2023
- Development and testing of a high-power S-band klystron at BINP SB RAS. / Levichev A. [и др.] Текст : электронный // Nuclear Science and Techniques. 2024. V. 35. No. 7. C. 1-10. URL: 7. https://link.springer.com/article/10.1007/s41365-024-01471-9. – Дата публикации 10.07.2024
- 8. Результаты работы стенда линейного ускорителя СКИФ. / Арсентьева М. В. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21 – № 3(254). – С. 334–341. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan letters/panl 2024 3/11 Arsentyeva r.pdf. – Дата обращения 04.10.2024
- О влиянии смещения рабочей частоты на эффективность ускоряющей структуры ускорителя ЛУЭ-200. / Левичев А. Е. [и др.] Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21. № 3(254). С. 557–563. 9. URL: http://www1.jinr.ru/Pepan letters/panl 2024 3/39 Levichev r.pdf. – Дата обращения 22.10.2024
- Levichev A., Arsentyeva M., Grishina K. Beam energy spectra in the presence of cell-to-cell phase advance errors. Текст : электронный // Journal of Instrumentation. 2024. V. 19. T09001. URL: 10. https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/Т09001. - Дата публикации 02.09.2024
- Arsentyeva M. V., Berdnikov K. N., Levichev A. E. Analysis of the particle longitudinal motion during the injection process into the disk loaded traveling wave accelerating structure. Текст : электронный // Journal of 11. Instrumentation. - 2020 - V. 15. - P10015. - URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/P10015/pdf. - Дата публикации 16.10.2020
- Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector. / Andrianov A. [и др.] Текст : электронный // Journal of Instrumentation. 2022 V. 17. T02009. URL: https://iopscience.jop.org/article/10.1088/1748-12. 0221/17/02/Т02009. – Дата публикации 28.02.2022 92

Благодарности

Автор благодарит всех сотрудников, которые участвовали в создании линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» и клистрона. Автор не может перечислить всех поименно, поскольку слишком много людей не только научных лабораторий, но также экспериментального производства помогали в реализации данного проекта.

Тем не менее, хотелось бы отдельно поблагодарить Никифорова Данилу Алексеевича, Арсентьеву Марию Васильевну, Барнякова Алексея Михайловича, Самойлова Сергея Леонидовича, Волкова Владимира Николаевича, Иванова Валентина Яковлевича, Павленко Антона Владимировича, Батракова Александра Матвеевича, Мешкова Олега Игоревича, Павлова Олега Анатольевича, Чекменева Дмитрия Игоревича, Сибирякову Кристину Александровну, Кондакова Алексея Анатольевича, Семенова Алексея Михаловича. Хочется отметить, что ваши профессиональные замечания всегда помогают находить правильные решения, а работать с вами не только интересно, но и весьма легко и приятно.

Так же автор благодарит научного консультанта Логачева Павла Владимировича за веру в успех и помощь в его достижении.

Самые наибольшие благодарности автор выражает своим родителем, которые не только умеют мотивировать, но и поддерживать!

Схема линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»



Работа на линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ»





СВЧ мощность клистронов



Клистрон 2: синий – ток катода клистрона, красный – огибающая СВЧ мощности в волноводном тракте. Мощность 50 МВт

Клистрон 3: желтый - огибающая СВЧ в волноводном тракте. Мощность 58 МВт

СВЧ мощность в волноводном тракте



Измерения с LLRF







СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ