

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ЛЕВИЧЕВ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

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

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант

доктор физико-математических наук,
академик РАН Логачев Павел Владимирович

НОВОСИБИРСК – 2025

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Общее описание линейного ускорителя инжектора	
ЦКП «СКИФ»	25
1.1 Источник СИ четвертого поколения ЦКП «СКИФ».....	25
1.2 Линейный ускоритель инжекционного комплекса	27
1.3 Источник электронов	30
1.4 Система группировки и предускорения	32
1.5 Регулярная ускоряющая секция	35
1.6 Волноводная система	37
1.7 Клистрон.....	40
1.8 Магнитная система.....	43
1.9 Система диагностики пучка	44
1.10 Вакуумная система	52
1.11 Система охлаждения и термостабилизации.....	52
1.12 Заключение к Главе 1	54
Глава 2. Моделирование и оптимизация пучка в линейном ускорителе...	56
2.1 Захват в режим ускорения	56
2.2 Источник электронов и канал группировки.....	70
2.3 Ускоряющие структуры	75
2.4 Моделирование динамики частиц в линейном ускорителе.....	78
2.5 Магнитная система ускорителя.....	86

2.6 Заключение к Главе 2	91
Глава 3. Требования на изготовление ускоряющих структур	93
3.1 Ошибки в ускоряющих ячейках, влияющие на рабочий вид колебания в структуре	93
3.2 Влияние точности частоты генератора на набор энергии	97
3.3 Влияние ошибок набега фазы на набор энергии	100
3.4 Заключение к Главе 3	109
Глава 4. Изготовление элементов ускорителя	110
4.1 Изготовление ВЧ пушки и резонатора канала группировки.....	110
4.2 Магнитная система ускорителя.....	115
4.3 Изготовление ускоряющих структур.....	116
4.4 Другие элементы линейного ускорителя	121
4.5 Заключение к Главе 4	127
Глава 5. Клистрон – источник СВЧ мощности линейного ускорителя	
ЦКП «СКИФ»	128
5.1 Разработка клистрона.....	128
5.2 Расчет катодного узла	129
5.3 Расчет поперечной динамики пучка в клистроне.....	130
5.4 Расчет возбуждающего резонатора.....	132
5.5 Расчет канала группировки клистрона	142
5.6 Изготовление клистрона	148
5.7 Исследование параметров клистрона	153
5.8 Заключение к Главе 5	162
Глава 6. Стенд ЛИНАК-20	164

6.1 Описание стенда ЛИНАК-20.....	164
6.2 Исследование параметров работы стенда ЛИНАК-20.....	169
6.3 Заключение к Главе 6.....	190
Заключение.....	193
Список литературы	196

Введение

Актуальность темы исследования

Синхротронным называется электромагнитное излучение ультрарелятивистских заряженных частиц, движущихся в магнитном поле и испытывающих ускорение, перпендикулярное вектору скорости. Синхротронное излучение (СИ) является эффективным и универсальным инструментом для широкого спектра исследований вещества и материалов, а также для технологических применений в различных областях науки и техники [1].

Источниками СИ служат накопители электронов с характерной энергией в несколько ГэВ. В таких установках интенсивные (с током в несколько сотен миллиампер) пучки заряженных частиц, двигаясь в поперечном магнитном поле, создают мощное и яркое излучение, которое по каналам вывода поступает на большое число экспериментальных станций для проведения исследований.

В мире работают несколько десятков источников СИ, где проводят исследования в области физики, химии, биологии, медицины, геологии, археологии, материаловедения, а также используют излучение для прикладных применений. Это самый многочисленный класс накопителей электронных пучков ультрарелятивистских энергий.

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) [2]:

$$B \propto \frac{I}{\Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}}$$

где I – ток пучка, $\Sigma_{x,y}$ и $\Sigma_{x',y'}$ – соответственно поперечные пространственные и угловые эффективные размеры источника – пучка электронов. Из выражения видно, что яркость тем выше, чем больше ток пучка и чем меньше произведение угловых и пространственных размеров (эмиттанс, фазовый объем пучка). Увеличение тока пучка приводит к увеличению мощности излучения и, как следствие, к нежелательному росту тепловой нагрузки на элементы вакуумного и оптического тракта, экспериментальное оборудование и образец. Поэтому основным методом увеличения яркости источника СИ является уменьшение эмиттанса электронного пучка.

По величине эмиттанса источники СИ условно делятся на несколько поколений:

1. Не специализированные установки (синхротроны или коллайдеры в «паразитном» режиме) с характерным горизонтальным эмиттансом $\varepsilon_x \sim 300-500$ нм·рад.
2. Специализированные накопители электронов. Излучение выводится из магнитов и вигглеров. $\varepsilon_x \sim 20-100$ нм·рад.
3. Специализированные и оптимизированные накопители электронов, основными излучателями служат ондуляторы. Эмиттанс минимизирован до значений $\varepsilon_x \sim 1-10$ нм·рад.
4. Специализированные, высокотехнологичные и оптимизированные накопители с высокой степенью минимизации эмиттанса до значений $\varepsilon_x \sim 500 \div 50$ пм·рад, приближающегося к дифракционному пределу для используемых длин волн СИ.

Примеры источников СИ разных поколений, их параметры и характеристики, а также ссылки на литературу могут быть найдены в [3].

Современные источники СИ функционируют в течение долгого времени жизни пучка, для поддержания которого потерянные в накопителе частицы восполняются малыми порциями так, чтобы средний ток (и тепловой режим оборудования) был постоянным с точностью $\sim 1\%$ (top-up инжекция). Поэтому эффективность инжекции, стабильность параметров, надежность, гибкость перестройки режимов инжектора, определяющие последовательность заполнения накопителя сгустками электронов, время жизни пучка, достижимый ток в накопителе и т.д. очень важны.

В настоящее время в наукограде Кольцово Новосибирской области создается современный источник СИ четвертого поколения Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») [4]. 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 [5]. 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 [6].

Диссертационная работа описывает разработку и создание линейного ускорителя 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 секции включительно. Диагностический электронно-оптический канал, оснащенный необходимой измерительной аппаратурой, позволил провести

эксперименты, подтвердившие адекватность выбранных решений. Для обеспечения 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. Следует отметить, что, так как клистроны с импульсной мощностью более 20 МВт используются только для создания линейных ускорителей частиц высокой (более 100 МэВ) энергии, то они фактически являются элементами ускорительной техники. В частности, требования к параметрам клистронов определяются параметрами ускоряющих структур, для возбуждения которых эти клистроны создаются.

Пучок с энергией 200 МэВ, в котором интенсивность, число и последовательность сгустков электронов определяются условиями и требованиями исследований, инжектируется из линейного ускорителя с частотой 1 Гц в синхротрон-бустер, где электроны, после подъема энергии до 3 ГэВ, перепускаются по транспортному каналу в основной накопитель. Именно в линейном ускорителе происходит формирование пучка, которое определяет параметры работы всего инжекционного комплекса и непосредственно источника СИ.

Поскольку источник СИ четвертого поколения создается в России впервые, то разработка для него линейного ускорителя является важной и актуальной задачей. ЦКП «СКИФ» должен обеспечивать обширную программу исследований, в том числе эксперименты с временным разрешением, для которых характер заполнения накопителя небольшим числом (вплоть до одного) интенсивных сгустков диктуется пользователями. Это накладывает дополнительные требования на возможность реализации различных режимов работы линейного ускорителя, применение гибкого управления не только током пучка, но последовательностью инжектируемых сгустков, их скважностью и частотой повторения.

Отдельно стоит отметить, что ускорение электронов происходит в сверхвысокочастотном электромагнитном поле, которое создается в ускоряющих структурах ускорителя с помощью СВЧ усилителей-клистронов. Для увеличения темпа ускорения и уменьшения размеров линейного ускорителя клистроны должны обеспечивать выходную импульсную мощность в десятки мегаватт. Такие устройства уникальны и ранее были доступны только за рубежом. Разработка отечественного клистрона, описанного ниже и обеспечивающего необходимую выходную СВЧ мощность в рамках создания линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», также подчеркивает актуальность представленной работы.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время общепринятой считается двухкаскадная схема инжекции в источник СИ с использованием в качестве первой ступени линейного ускорителя с энергией пучка ~ 100 - 200 МэВ. После линейного ускорителя пучок вводится в синхротрон-бустер, ускоряющий электроны до энергии эксперимента. Возможен вариант с использованием только линейного ускорителя на полную энергию (подробнее см. ниже). В любом случае в источниках СИ 3-4 поколений ускорение в накопительном кольце считается недопустимым из-за требования тепловой стабильности ускорительного и экспериментального оборудования, которая, в свою очередь обеспечивает пространственную стабильность пучка электронов и синхротронного излучения. Весь инжекционный комплекс работает с характерной частотой повторения порядка 1 Гц.

Для двухкаскадных схем выходная энергия пучка после линейного ускорителя для разных проектов составляет ~ 100 - 200 МэВ. Так, например, в инжекторе NSLS-II (США) [7] используется линейный ускоритель с энергией электронов 200 МэВ. Он состоит из высоковольтной электронной пушки с постоянным напряжением 90 кВ с триодным катодом EIMAC YU171. Пушка работает либо в одногустковом (заряд 0.5 нКл), либо в многогустковом 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. Далее частицы попадают в группирующий резонатор, работающий на частоте 500 МГц. После этого следуют предгруппирователь и группирователь на бегущей волне, работающие на основной частоте регулярных ускоряющих структур 2998 МГц. Регулярное ускорение происходит в пятиметровых ускоряющих структурах на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным градиентом с рабочей модой колебания $2\pi/3$. Запитаны структуры от двух клистронов Canon E37302A, каждый из которых обеспечивает 45 МВт выходной импульсной СВЧ мощности на частоте 2998 МГц. Схема СВЧ питания приведена на рисунке 1 [8]. Рисунок 2 показывает общую схему линейного ускорителя [7].

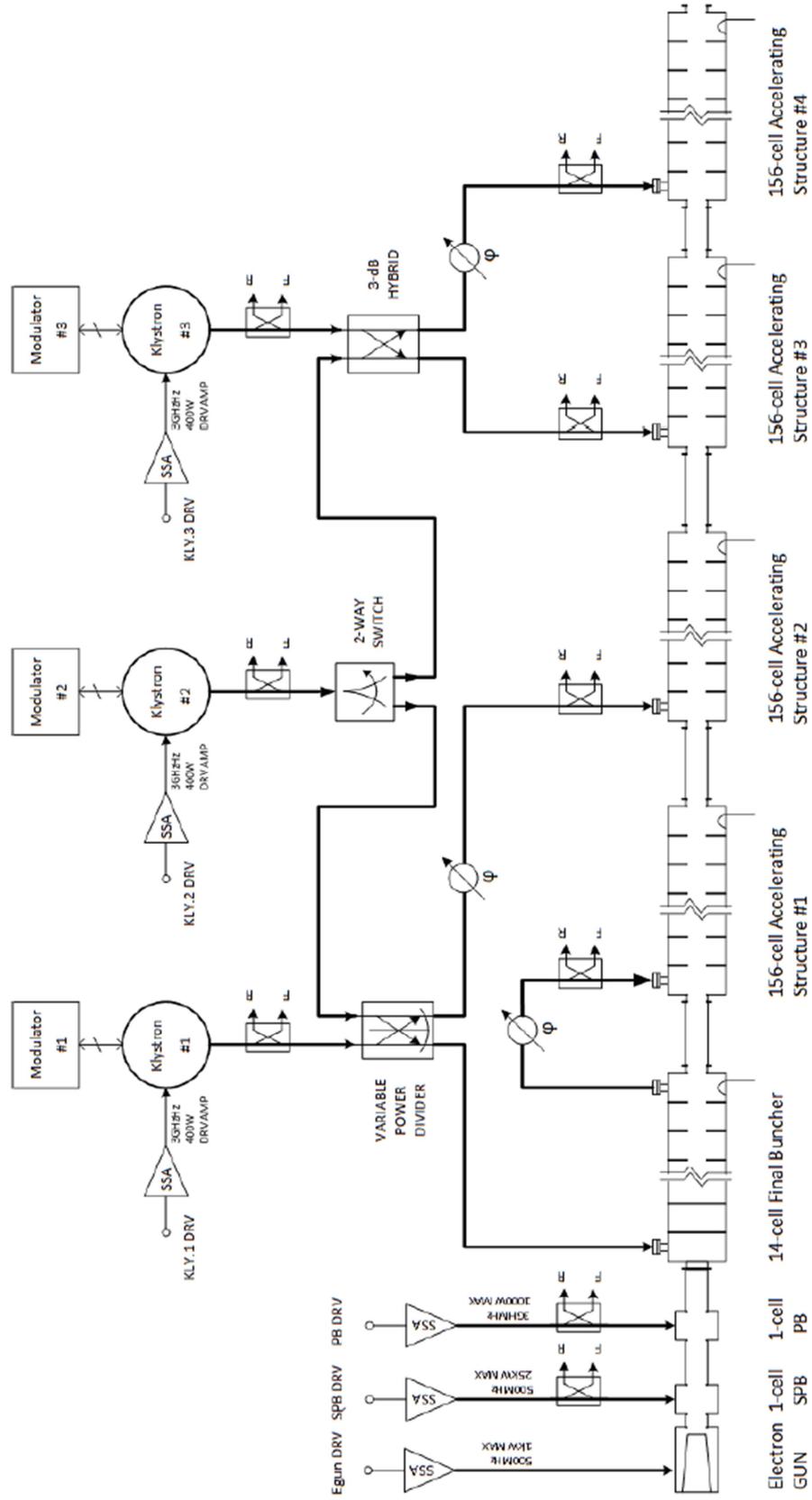


Рисунок 1 - Схема СВЧ питания линейного ускорителя инжектора NSLS-II

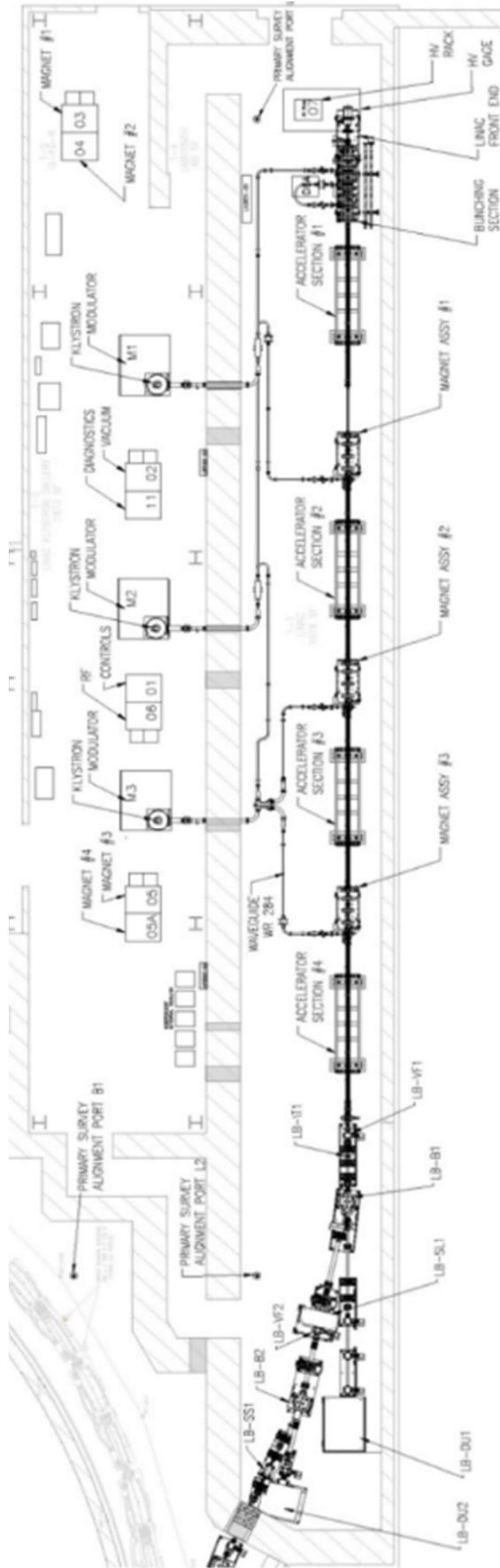


Рисунок 2 - Схема линейного ускорителя инжектора NLSL-II

Стоит отметить, что третий клистрон является запасным и может использоваться при выходе из строя одного из штатных клистронов. При этом волноводный тракт заранее подведен к запасному клистрону, что позволяет оперативно заменить любой вышедший из строя клистрон, как это показано на рисунке 1. Параметры линейного ускорителя NSLS II, приведены в таблице 1. Здесь и далее среднеквадратичное значение обозначается как rms.

Таблица 1 - Параметры линейного ускорителя инжектора NSLS-II (OP – одногустковый режим, MP – многугустковый режим)

Параметры	Требования		Достигнуто в режимах	
			Одногустковый режим (OP)	Многугустковый режим (MP)
Энергия	200 МэВ		201 МэВ	210 МэВ
Заряд	>0.5 нКл OP	>15 нКл MP	0.5 нКл	11 нКл
Длина пучка	160-300 нс MP		н/д	160-300 нс
Однородность пучка	<10% MP		н/д	25%
Энерг.разброс	<0.5% rms		0.14% (ширина на полувысоте) 0.5% для 80% заряда	0.41% (ширина на полувысоте) 0.5% для 72% заряда
Эмиттанс	Требуемый <38 нм rms Акцептанс <70 нм rms		X: 58 нм, Y: 63 нм	X: 56 нм, Y: 47 нм

Другим примером современного источника синхротронного излучения 4-го поколения является Европейский источник СИ ESRF-EBS (Франция), где инжекционная часть также состоит из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ и синхротрона-бустера с выходной энергией 6 ГэВ.

Линейный ускоритель инжектора ESRF-EBS состоит из высоковольтной электронной пушки с напряжением 90 кВ. Катодный узел использует катод EIMAC Y-845 и имеет управление по сетке. Последующая фокусировка пучка осуществляется четырьмя соленоидами, как показано на рисунке 3 [9].

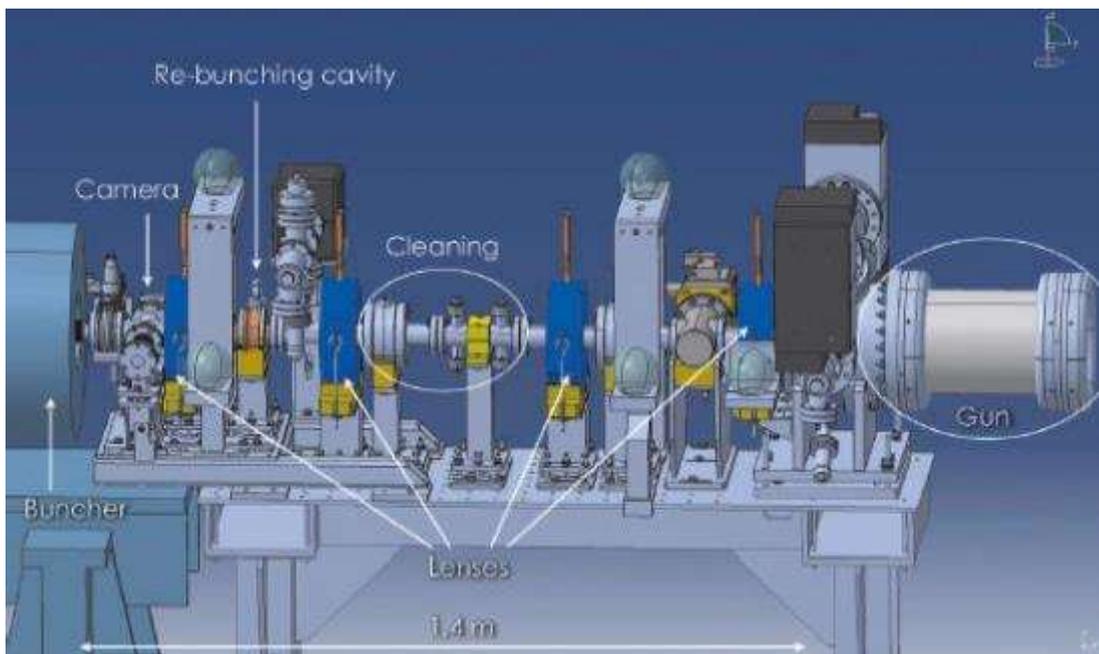
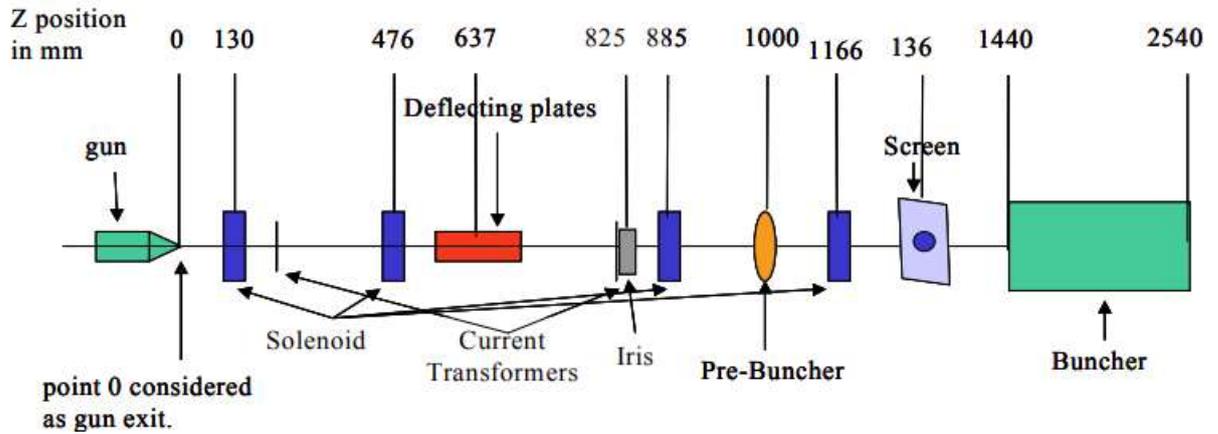


Рисунок 3 - Источник электронов и канал группировки линейного ускорителя инжектора ESRF-EBS: вверху схема с обозначениями, внизу – 3D модель

Для продольной группировки применяются предгруппирователь и группирователь, работающие на частоте регулярных ускоряющих секций 2998 МГц. Предгруппирователь обеспечивает дополнительный энергетический разброс в пучке ± 10 кВ, который в промежутке дрейфа переходит в пространственную модуляцию плотности частиц пучка. Группирователь состоит из 22 ячеек, работающих в режиме стоячей волны на моде колебания $\pi/2$ с

максимальной амплитудой ускоряющего поля 25 МВ/м и обеспечивает выходную энергию пучка 15 МэВ [9]. Люминофорный датчик позволяет наблюдать ускоряемый пучок, положение которого корректируется горизонтальными и вертикальными катушками с током, расположенными в каждом соленоиде.

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 (см. рисунок 3).

Регулярное ускорение пучка осуществляется двумя шестиметровыми ускоряющими структурами на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным градиентом, работающих на $2\pi/3$ -моду колебания. В качестве источников ускоряющего поля используются два клистрона Thomson TH2100 с СВЧ мощностью 35 МВт. Частота работы электронной пушки 1 Гц или 10 Гц. Модулятор клистрона может работать с частотой до 10 Гц [10].

Отличается от рассмотренных каскадных схем инжекционный комплекс источника СИ четвертого поколения MAX IV (Швеция), где не используется промежуточный синхротрон-бустер, и линейный ускоритель поставляет пучок электронов на энергии эксперимента в два источника СИ с энергиями 1.5 ГэВ и 3 ГэВ соответственно, а также будет снабжать электронами лазер на свободных электронах [11].

В регулярном режиме линейный ускоритель MAX IV 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 отклоняющий магнит («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 [12]. Ускоряющая структура длиной 5.2 м обеспечивает набор энергии электронов 95 МэВ. Схема ускорителя показана на рисунке 4 [11].

В качестве источников электронов в инжекторе MAX IV 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.

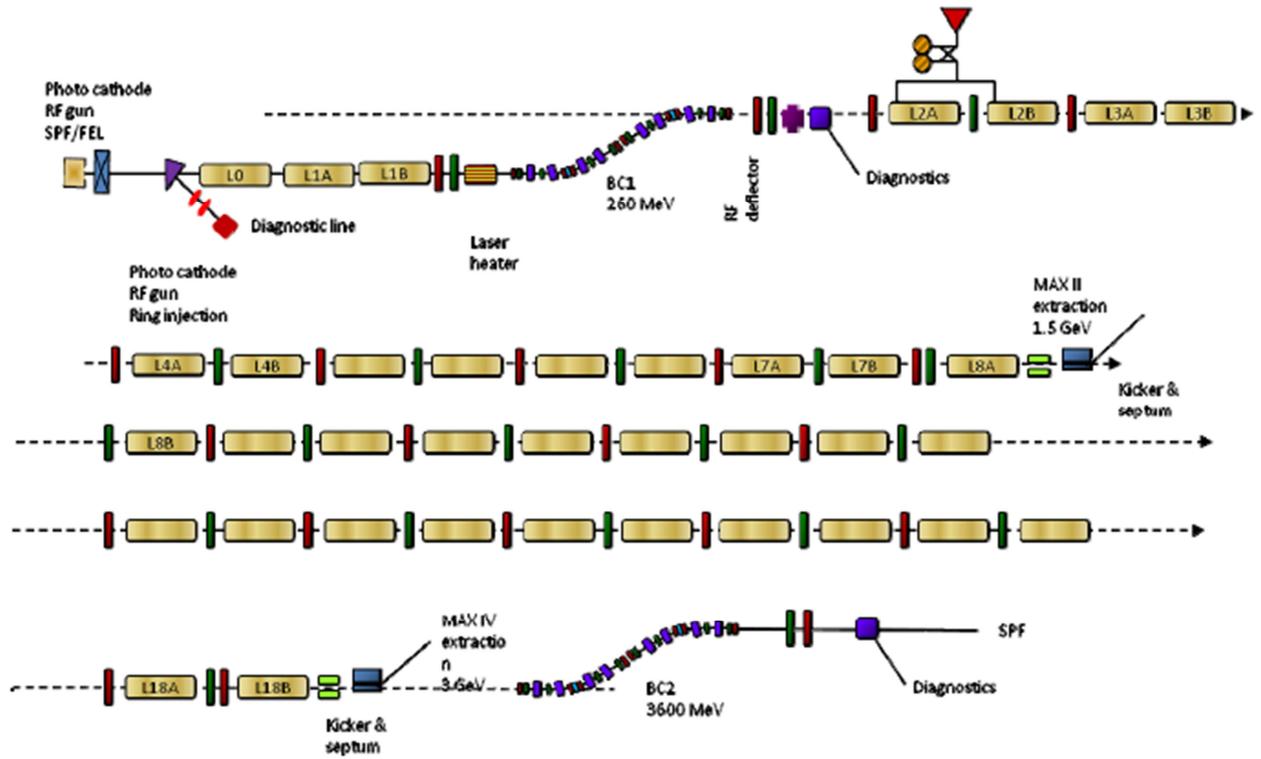


Рисунок 4 - Схема линейного ускорителя источника СИ MAX-IV

СВЧ фотопушка имеет полторы ускоряющих ячейки и медный фотокатод [13] (см. рисунок 5). Особенностью ее является СВЧ питание от системы умножения мощности SLED [12], что приводит к укорочению импульса СВЧ мощности и сильной пересвязи пушки с внешним волноводным трактом [11].

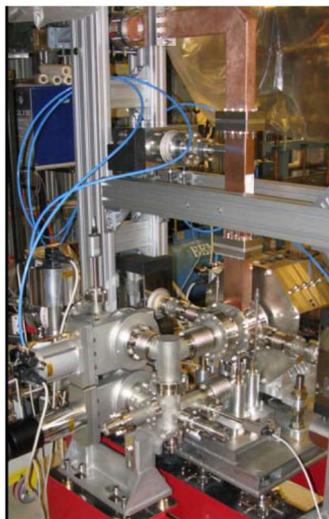


Рисунок 5 - СВЧ фотопушка для MAX-IV, разработанная совместно Sincrotrone Trieste (Италия), MAX-lab (Швеция) и UCLA (США)

Термоэмиссионная пушка для работы с кольцевыми источниками СИ MAX IV [14], расчётная модель которой показана на рисунке 6, использует дополнительный коллиматор и поворот для уменьшения длительности пучка и энергетического разброса, как изображено на рисунке 7.

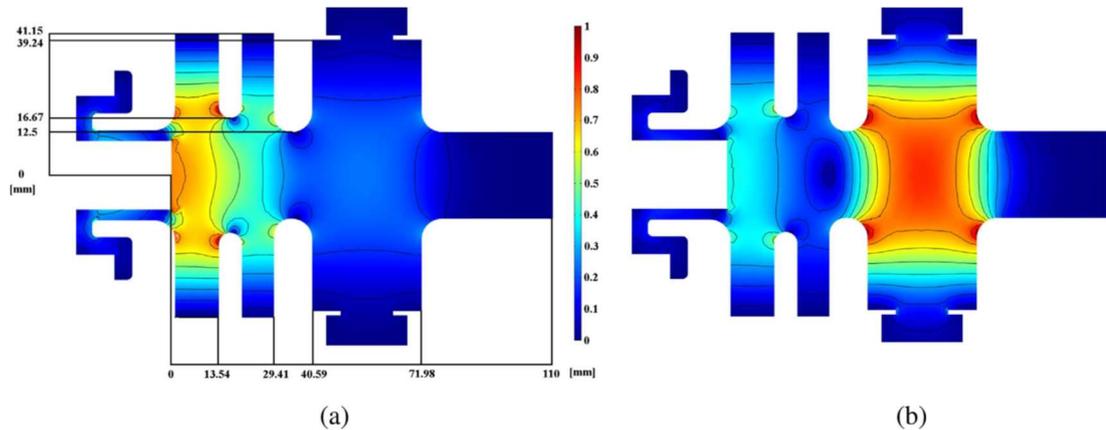


Рисунок 6 - Модель СВЧ пушки с термоэмиссионным катодом линейного ускорителя MAX-IV: а) распределение электрического поля при моде колебания 0, б) распределение электрического поля при моде колебания π

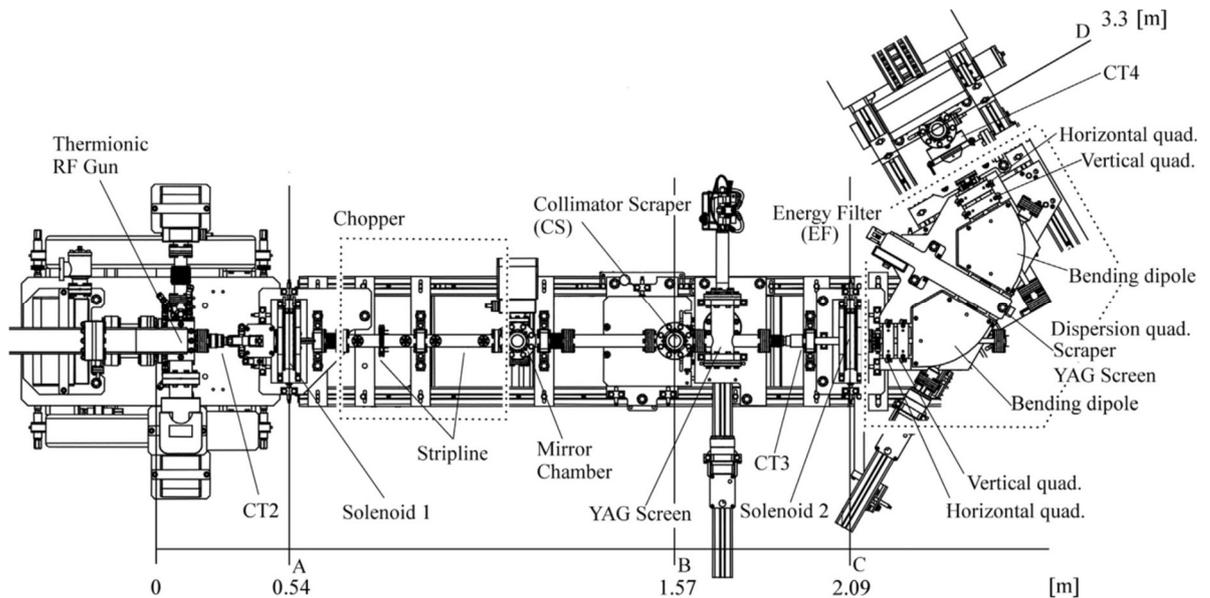


Рисунок 7 - Схема получения пучка с помощью СВЧ пушки с термоэмиссионным катодом

Необходимость инъекции сразу в три установки (накопительные кольца с энергиями 1.5 ГэВ и 3 ГэВ, и в лазер на свободных электронах) диктует особенность построения инжекционного комплекса МАХ-IV. Для проекта ЦКП «СКИФ» такая схема выглядит сложной, неактуальной и дорогой. В итоге, нами была взята за основу каскадная схема с энергией пучка 200 МэВ после линейного ускорителя, близкая к схемам NSLS-II и ESRF-EBS, которая опирается на компетенции, технологии и опыт Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

В нашем линейном ускорителе используются ускоряющие структуры на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом длиной 3 м. При относительно небольшом необходимом числе ускоряющих структур было решено, что постоянный ускоряющий градиент, требующий переменной геометрии ускоряющих ячеек, будет экономически не выгоден. Выбранные структуры разрабатывались и производились ранее в ИЯФ СО РАН, что также представляется положительным фактором.

В качестве источника электронов в NSLS-II и ESRF-EBS применяются высоковольтные пушки с термоэмиссионным катодом и с управлением тока пучка по сетке. Такой подход требует сложной системы группировки пучка и предускорения, поскольку начальная длительность пучка достаточно велика (~1 нс) по сравнению с периодом СВЧ поля регулярных участков ускорения (<100 пс), а энергия мала (90 кэВ). СВЧ фотопушка МАХ-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 МАХ-IV также невелик, и этот факт требует увеличивать частоту работы инжектора. Кроме того, недостатком термоэмиссионной пушки МАХ-IV является сложная система с коллиматором и поворотом пучка для уменьшения энергетического разброса и сокращения длительности сгустка.

В итоге для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» было решено использовать высокочастотную (ВЧ) пушку с термоэмиссионным катодом, работающую на 1/16 частоты регулярных ускоряющих структур (178.5 МГц), с сеточным управлением током пучка, которое обеспечивается модулятором, работающим с той же максимальной частотой 178.5 МГц. В этом случае, по нашему мнению, достигается определенный компромисс. Резонатор высокочастотной пушки способен обеспечить достаточно высокую выходную энергию пучка, близкую к 1 МэВ, что, с одной стороны, все еще позволяет использовать клистронную группировку пучка, а с другой – такая энергия достаточна, чтобы при следующем

предускорении пучка использовать стандартную структуру на бегущей волне без изменения ее фазовой скорости, что значительно упрощает производство изделия. Кроме этого, модулятор управления током пучка обеспечивает определенную фазовую задержку по отношению к ускоряющему полю резонатора ВЧ пушки. Это приводит к дополнительной возможности управления вытягиваемым зарядом, его длительностью и процессом начальной продольной группировки пучка. Таким образом, линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ» опирается на мировой опыт создания подобных установок, но обладает своими уникальными особенностями, достоинствами и возможностями.

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.
3. Обоснование концептуальных решений, схемы и конструкции систем линейного ускорителя. Определение основных принципов его работы и состава элементов. Создание комплексной схемы установки с учетом всех подсистем.
4. Теоретические оценки возможности достижения необходимых параметров пучка с учетом разработанной концепции ускорителя и схемы его работы.
5. Моделирование основных элементов ускорителя. Расчет динамики пучка с учетом реалистичных ошибок, погрешностей и неточностей изготовления и функционирования отдельных элементов.
6. Выбор и обоснование конструктивных и технологических решений.
7. 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.
8. Разработка и создание стенда ЛИНАК-20, который является начальной частью линейного ускорителя инжектора СКИФ до второй 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».

Научная новизна

Следует заметить, что сроки создания линейного ускорителя инжектора, определенные государственным контрактом на создание ЦКП «СКИФ», были весьма сжаты. В связи с этим в конструкции линейного ускорителя максимально использованы узлы, ранее разработанные и произведенные в ИЯФ СО РАН, но с внесением существенных изменений, основанных на накопленном опыте их эксплуатации. Линейный ускоритель подобной схемы ранее в ИЯФ СО РАН и в России не создавался. Научная новизна проделанной работы заключается в следующем:

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 субгармонической (рабочая частота 178.5 МГц) 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.
3. 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».

Теоретическая и практическая значимость

Выполненные теоретические исследования позволили определить схему линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Выбранная схема является достаточно гибкой с точки зрения управления током пучка и его длительностью. Предложенная магнитная система фокусировки и нацеливания пучка проста в изготовлении и эффективна при настройке и эксплуатации ускорителя. Найденные решения могут в будущем использоваться для разработки инжекторов источников синхротронного излучения, демпфирующих колец или электрон-позитронных коллайдеров. Проведенные исследования привели к созданию отечественно

мощного СВЧ усилителя – клистрона, способного питать ускоряющие структуры линейных ускорителей. Ранее такая техника в России не производилась. Теоретическая проработка позволила оценить необходимую точность изготовления резонансных ячеек ускоряющих структур и определить технологию их производства, а также выработать способ уменьшения влияния погрешности изготовления ускоряющих ячеек на параметры пучка.

Практическая значимость представляемой диссертации заключается в методическом комплексном описании всего цикла разработки и производства высокоэнергетических линейных СВЧ ускорителей электронов для различных научных комплексов, таких как источники электромагнитного излучения или коллайдеры, начиная от формулировки основных идей и заканчивая получением и исследованием ускоренного пучка электронов. Разработанные устройства и технологии производства позволяют создавать не только непосредственно линейные ускорители, но и источники СВЧ мощности клистрона для питания ускоряющих структур.

Методология и методы исследования

В процессе работы над поставленной задачей по созданию линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ» использовались аналитические и численные методы расчётов высокочастотного электромагнитного поля и динамики пучка в линейных ускорителях. Результаты аналитических расчётов проверялись результатами численного моделирования и показали хорошее согласие (Глава 2). Заключительным способом проверки корректности выбранных концепций и решений являлась разработка и тестирование ключевых элементов и прототипов узлов ускорителя. Экспериментальное исследование динамики и параметров пучка (Глава 6) продемонстрировало соответствие теоретических расчетов и экспериментальных данных, тем самым подтвердив пригодность как выбранной концепции, так и адекватность конкретных технических решений.

При создании клистрона была сформирована его теоретическая модель, основанная на разработанных и опубликованных ранее методиках. Эта модель была проверена в ходе численного моделирования с использованием 2D и 3D кодов. Было достигнуто приемлемое согласование результатов, полученных разными способами. Экспериментальные измерения параметров созданного клистрона соответствуют его теоретической модели.

Основные положения, выносимые на защиту

1. 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.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. XIV Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц памяти проф. В.П. Саранцева, Россия, г. Алушта, 22-25 сентября 2022 г.
2. XXVIII Международная конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2023, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, г. Новосибирск, 11-15 сентября 2023 г.
3. 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.

Основные результаты диссертационного исследования получены в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в 2018-2024 годах. Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных и электронных работах, из них 12 статей [72, 18, 70, 15, 37, 49, 71, 75, 44, 45, 30, 20] с основными результатами в **рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:**

1. 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: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S003281621802012X>. – Дата обращения 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
3. Разработка клистрона S-диапазона. / А. В. Андрианов [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ – 2020. – Т. 17, № 4(229). – С. 580–586. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/32_Andrianov_2.pdf. – Дата обращения 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). – С. 492–50. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2021_5/08_Dronova.pdf. – Дата обращения 04.06.2024
6. 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 Instrumentation](#). – 2023. – V.18. –URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001>. – Дата публикации 03.07.2023
7. 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. – С. 1-10. – URL: <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
9. 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. – URL:

http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/39_Levichev_r.pdf. – Дата обращения 22.10.2024

10. 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: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/T09001>. – Дата публикации 02.09.2024
11. 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 Instrumentation. – 2020 – V. 15. – P10015. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/P10015/pdf>. – Дата публикации 16.10.2020
12. 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.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>. – Дата публикации 28.02.2022

Личный вклад автора в получение результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Под руководством автора разработан весь линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ». Им были утверждены концептуальные и технические решения, включая конструкцию линейного ускорителя и его основных систем. Под его руководством выбраны технологические решения и изготовлены базовые элементы линейного ускорителя. Автором полностью был исследован клистрон. Под его руководством был сконструирован клистрон и выработана технология его изготовления. Под руководством автора был создан стенд с полномасштабным макетом клистрона. На этом стенде были экспериментально изучены и оптимизированы параметры клистрона. В частности, были настроены частотные характеристики резонаторов клистрона, получены и измерены его выходные характеристики. Под руководством автора был запущен стенд на основе линейного ускорителя ЛИНАК-20, получен пучок электронов, измерены его параметры.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Список публикаций в изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией (ВАК), содержит 12 работ. Авторский вклад соискателя заключается: в статье 1 – в создание стенда для тренировки вакуумного волноводного СВЧ окна и в получение измеренных характеристик окна на стенде;

в статье 2 – в измерениях параметров пучка после ВЧ пушки линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», в разработке СВЧ фотопушки с вводом мощности коаксиального типа; в идее создания фотопушки на основе ускоряющей структуры с параллельной связью, а также в моделирование динамики пучка в предложенной фотопушке;

в статье 3 – в проработке и описание методики изготовления клистрона, в получение измеренных параметров и в их анализе;

в статье 4 – в определении требований к линейному ускорителю инжектора ЦКП «СКИФ», в создание и описание его компоновки и дизайна;

в статье 5 – в выводе аналитических уравнений для сравнения эффективности различных ускоряющих структур, в анализе полученных данных;

в статье 6 – в создание стенда измерения регулярных ускоряющих структур и структуры предускорителя-группирователя, в участие в экспериментах по измерению ускоряющих структур и выходной энергии пучка;

в статье 7 – в изготовлении, настройке, измерение и получение проектных выходных параметров клистрона;

в статье 8 – в обеспечение работы с пучком на стенде линейного ускорителя в режиме ускорения пучка, в участие в измерениях параметров пучка;

в статье 9 – в разработке аналитической модели ускорения пучка при смещенной рабочей частоте генератора питания ускоряющей структуры на основе круглого диафрагмированного волновода и анализе полученных данных;

в статье 10 – в разработке аналитической модели влияния случайных фазовых ошибок ячеек ускоряющих структур на основе диафрагмированного волновода на энергию пучка и его энергетический разброс;

в статье 11 – под руководством автора была поставлена задача по определению критериев, влияющих на захват в режим ускорения электронов в ускоряющей структуре на основе круглого диафрагмированного волновода. Автор непосредственно разработал механизм описания критериев захвата, который был развит и доведен до получения конкретных критериев Арсентьевой Марией Васильевной, что легло в основу ее диссертационной работы «Разработка ускоряющей структуры резонаторов W-диапазона» на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, которая была защищена под руководством автора в 2022 году;

в статье 12 – автором была определена и описана структура линейного ускорителя инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ». Под его руководством поставлена задача по моделированию динамики пучка и влияния ошибок выставки элементов на выходные

параметры пучка в разработанной схеме линейного ускорителя. Данная задача выполнялась Арсентьевой Марией Васильевной, что легло в основу ее диссертационной работы «Разработка ускоряющей структуры резонаторов W-диапазона» на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, которая была защищена под руководством автора в 2022 году

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 203 страницы, включая 169 рисунков. Библиография включает 79 наименований на 8 страницах.

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

1.1 Источник СИ четвертого поколения ЦКП «СКИФ»

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» – новый источник синхротронного излучения четвертого поколения, сооружаемый в наукограде Кольцово (Новосибирская область). Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ» состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, промежуточного синхротрона-бустера и накопительного кольца с энергией 3 ГэВ и длиной орбиты 476 м [4, 5, 15]. Проектный «естественный» (без вставных устройств и при нулевых токе пучка и связи мод бетатронных колебаний) горизонтальный эмиттанс пучка в накопителе равен 73.2 пм·рад, что в настоящее время является рекордом для работающих или планируемых источников СИ с энергией 3 ГэВ [6]. Основные проектные параметры источника СИ ЦКП «СКИФ» приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные проектные параметры накопителя электронов ЦКП «СКИФ»

Энергия, ГэВ	3
Периметр, м	476.14
Натуральный горизонтальный эмиттанс, пм·рад	73.2
Бетатронные частоты (горизонтальные/вертикальные)	50.81/18.84
Натуральный хроматизм (горизонтальный/вертикальный)	-149/-55
Коэффициент расширения орбит	$7.64 \cdot 10^{-5}$
Потери энергии на оборот, кэВ	531
Энергетический разброс в пучке	$1.032 \cdot 10^{-3}$
Время затухания горизонтальных/продольных колебаний, мс	9.2/17

Общая схема ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ» показана на рисунке 1.1. Схематичное изображение установок ускорительного комплекса на строительном плане приведено на рисунке 1.2. Кроме зданий, где размещаются ускорительное и экспериментальное

оборудование, в ЦКП «СКИФ» входят лабораторный корпус, корпуса энергообеспечения и инженерных систем, стендов и испытаний, административные здания и т.д.

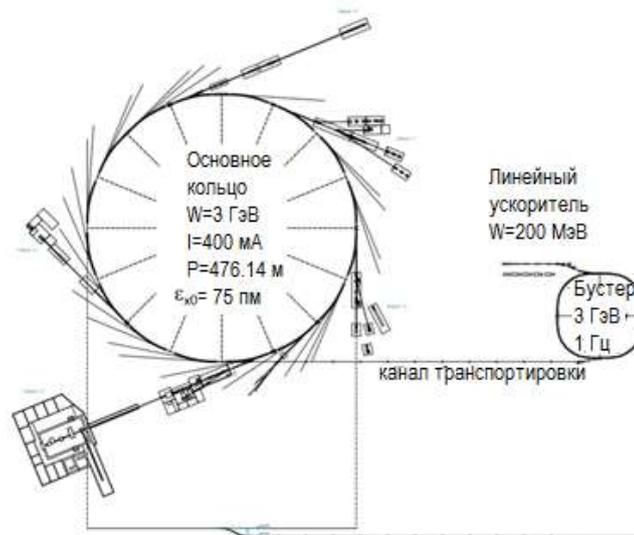


Рисунок 1.1 - Конфигурация источника СИ «СКИФ»



Рисунок 1.2 - 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

Пучок с энергией 200 МэВ, в котором интенсивностью, числом и последовательностью сгустков электронов можно управлять в зависимости от экспериментальной программы основного накопителя, инжектируется из линейного ускорителя с частотой 1 Гц в бустерный синхротрон, и после подъема энергии до 3 ГэВ, перепускается по транспортному каналу в основной накопитель.

1.2 Линейный ускоритель инжекционного комплекса

Инжекция электронов в источник СИ ЦКП «СКИФ» осуществляется на энергии эксперимента 3 ГэВ (top-up injection) с частотой, задаваемой требуемым током и временем жизни пучка в основном накопителе. Кроме технических параметров выбор конфигурации инжекционного комплекса [15] определяется возможностью максимально ускорить и упростить его изготовление путем использования оборудования, ранее производившегося в ИЯФ. Линейный ускоритель с энергией 200 МэВ аналогичен тому, который много лет работает в составе инжекционного комплекса ВЭПП-5 [16], синхротрон-бустер с максимальной энергией 3 ГэВ является модификацией синхротрона, разработанного ИЯФ для источника СИ NSLS II [17].

В основном режиме работы источник СИ ЦКП «СКИФ» заполняется приблизительно 500-ми сгустками электронов (частота ВЧ-резонаторов бустера и накопителя – 357 МГц) с полным током 400 мА. Частота повторения циклов инжекции 1 Гц. Для экспериментов с временным разрешением могут быть настроены специальные режимы с одним или несколькими сгустками, распределенными требуемым образом вдоль орбиты.

На рисунке 1.3 показана временная диаграмма ВЧ-импульсов и импульсов тока для основного режима. ВЧ пушка работает на частоте 178.5 МГц, что является половинной частотой резонатора синхротрона-бустера и 1/16 частоты регулярной ускоряющей структуры 2856 МГц. Предполагается, что сгустки электронов сначала заполняют каждую вторую сепаратрису накопителя, потом с помощью фазового смещения заполняются оставшиеся сепаратрисы. Длительность импульса ВЧ пушки ≥ 38000 нс. Длительность импульсов клистронов регулярных ускоряющих структур ≥ 810 нс. Импульс поля впускного магнита-кикера в бустерном синхротроне с длительностью ≈ 310 нс позволяет инжектировать максимум 55 сгустков (частота

следования 178.5 МГц, период 5.6 нс) – именно эта длительность и определяет огибающую тока пучка в ускоряющей структуре линейного ускорителя.

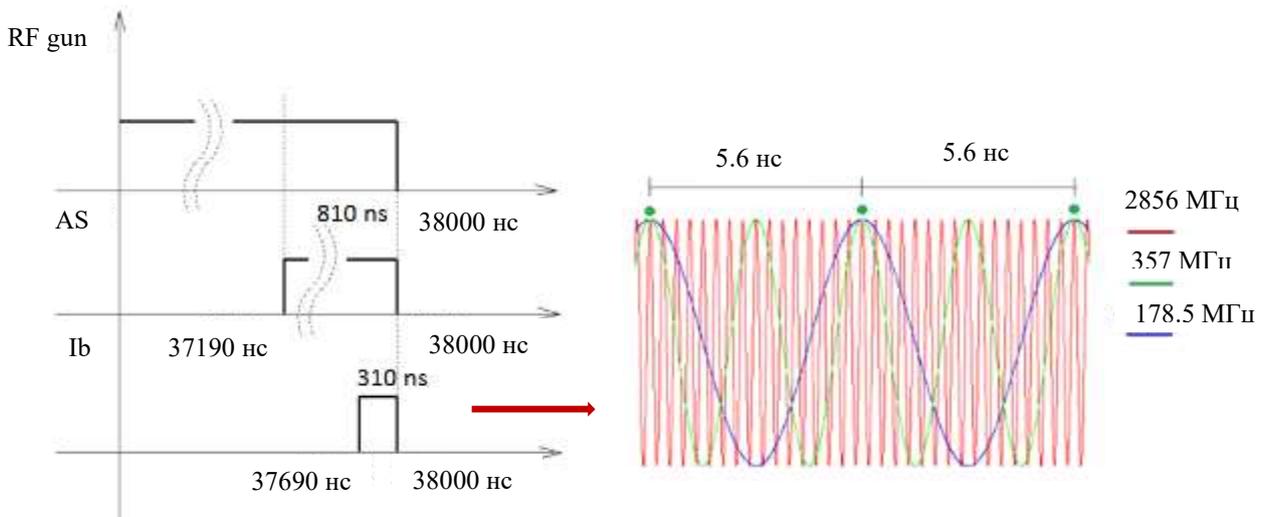


Рисунок 1.3 - Слева: импульс тока ВЧ пушки (RF gun), импульс тока максимальной длительности в регулярной ускоряющей структуре (AS), импульс тока в основном режиме (Ib). Справа: 2856 МГц – напряжение регулярной ускоряющей структуры, 357 МГц – напряжение резонатора накопителя, 178.5 МГц – напряжение СВЧ пушки. Зеленые точки обозначают электронные сгустки

Для основного режима накопителя инжекция осуществляется цугами по 55 сгустков с зарядом ≈ 0.3 нКл в каждом, для специальных режимов модулятор пушки позволяет получить в цуге один или несколько (в пределах огибающей 310 нс) сгустков. В последнем случае для уменьшения времени заполнения кольца заряд сгустка может быть увеличен до ≈ 1 нКл. Параметры линейного ускорителя приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – 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)

Линейный ускоритель состоит из трех основных частей (рисунок 1.4) [15]: источника электронов, системы группировки и предускорения и регулярных ускоряющих структур. В каждой части имеются элементы, обеспечивающие фокусировку и диагностику пучка, необходимые вакуумные условия и т.п. Рисунок 1.5 показывает 3D модель линейного ускорителя с клистронной галереей.

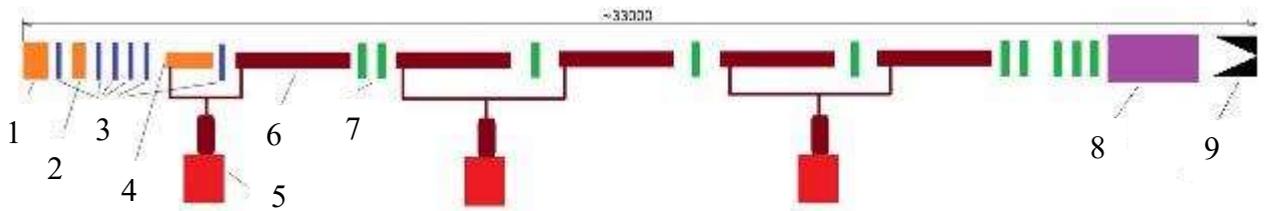


Рисунок 1.4 - Схематичный вид линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»: 1 – ВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, 2 – резонатор группировки с частотой 535.5 МГц (резонатор третьей гармоники), 3 – соленоиды, 4 – предускоритель-группирователь с частотой 2856 МГц, 5 – клистрон с выходной импульсной мощностью 50 МВт и частотой 2856 МГц, 6 – регулярная ускоряющая секция с частотой 2856 МГц, 7 – квадрупольный дублет, 8 – спектрометр, 9 – цилиндр Фарадея

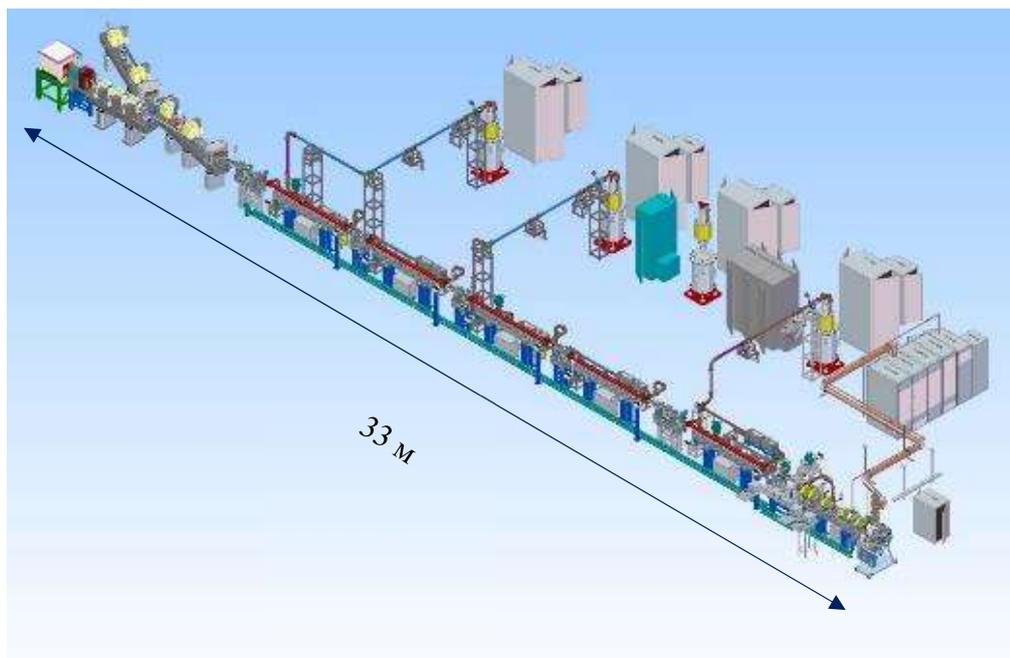


Рисунок 1.5 - 3D модель линейного ускорителя с клистронной галереей

К основным компонентам линейного ускорителя относятся:

- Источник электронов – ВЧ пушка с рабочей частотой 178.5 МГц.
- Резонатор группировки пучка с частотой 535.5 МГц (третья гармоника рабочей частоты ВЧ пушки). Мы будем обозначать резонатор РГЗ.
- Предускоритель-группирователь (ПГ), представляющий собой структуру на бегущей волне (набег фазы колебания на ускоряющую ячейку $2\pi/3$) с частотой 2856 МГц.
- Основная (регулярная) ускоряющая структура (УС, 5 секций длиной 3 м каждая) на бегущей волне (набег фазы колебания на ускоряющую ячейку $2\pi/3$) 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 (РГЗ) на частоту 535.5 МГц мощностью 10 кВт с длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения 10 Гц.
- Три клистрона, питающие ПГ 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.

Максимальная частота повторения ВЧ импульсов до 10 Гц не предполагает работу с пучком, а выбрана с целью тренировки ВЧ-систем.

Для достижения требуемой стабильности работы ускорителя, ускоряющая структура должна быть термостатирована в диапазоне $\Delta T \approx \pm 0.1^\circ$, для чего предусмотрена система стабилизации температуры и потока деионизированной воды, подаваемой в ускоряющие структуры, на основе нагревателей мощностью 4 кВт каждый.

1.3 Источник электронов

Во Введении упоминалось, что для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» наиболее оптимальным решением в качестве источника электронов [18] является ВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, с возможностью управления током катода. В ней используется

диспенсерный или оксидный катодный узел ВЧ триода (например, лампы ГС-34 [19]). 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. Конфигурация резонатора пушки и распределение электрического поля на его оси показаны на рисунке 1.6. Проектные параметры приведены в таблице 1.3.

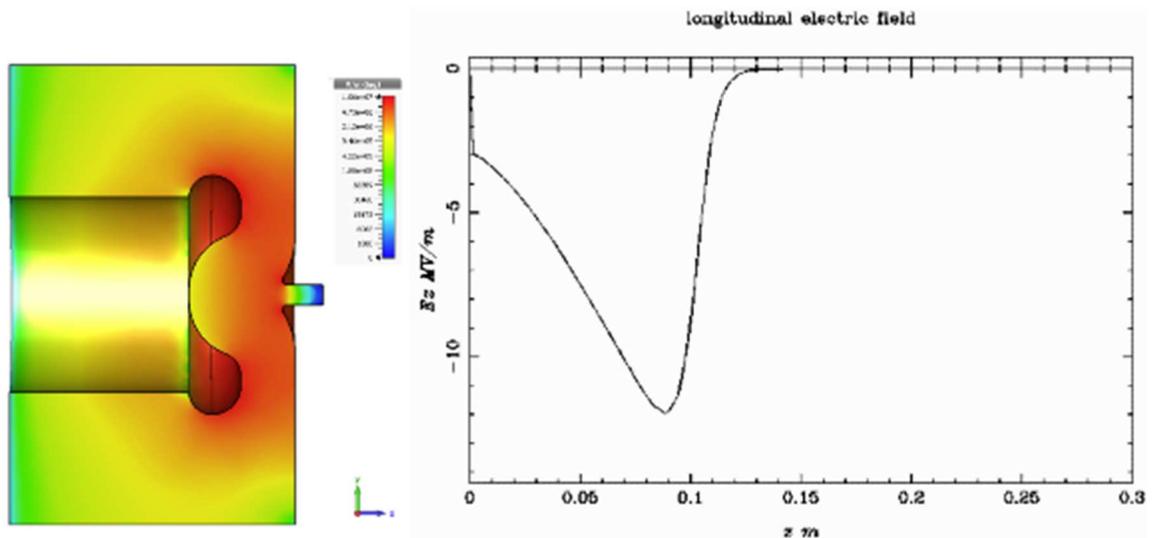


Рисунок 1.6 - Конфигурация резонатора пушки (слева) и распределение ускоряющего поля на его оси (справа)

Таблица 1.3 - 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

За основу катодно-сеточного узла взят узел от ВЧ триода ГС-34 (рисунок 1.7). Его параметры приведены в таблице 1.4. Катодно-сеточный узел ГС-34 обладает паркетной сектой с коэффициентом прозрачности 75%.

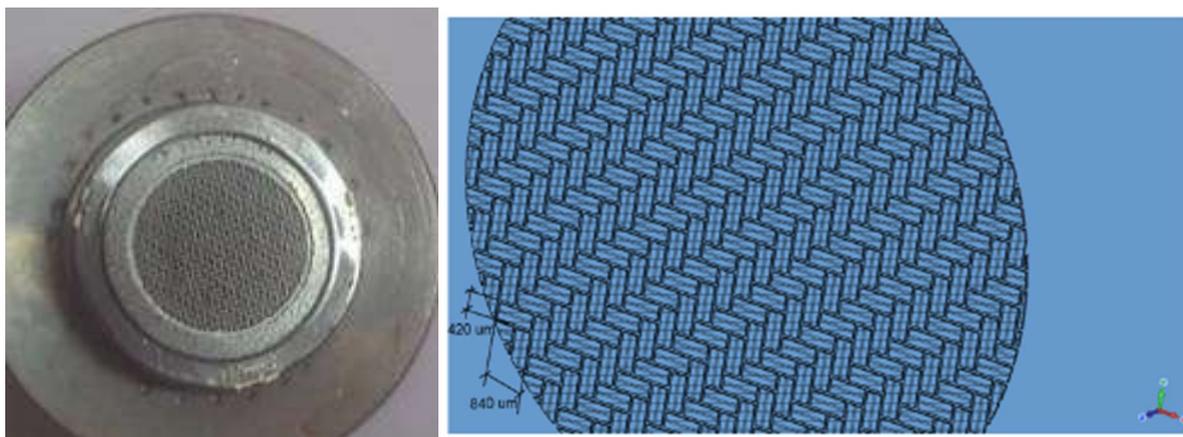


Рисунок 1.7 - Внешний вид катодно-сеточного узла ВЧ триода ГС-34 (слева). Модель узла для расчетов (справа)

Таблица 1.4 - 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%
Коэффициент проникновения электрического поля	26%

1.4 Система группировки и предускорения

Схема системы группировки и ее состав представлены на рисунке 1.8 [20]. Пучок из ВЧ пушки эмиттируется уже в группирующей фазе. Для линеаризации группирующих сил дополнительно используется группирующий резонатор третьей гармоники РГЗ с частотой 535.5 МГц. Его схематическая конструкция приведена на рисунке 1.9, а расчетные параметры – в таблице 1.5. Регулярные ускоряющие секции линейного ускорителя предназначены для работы с релятивистским пучком. Такой пучок формируется в предускорителе-группирователе, который служит для окончательной группировки и ускорения пучка до энергии около 3 МэВ. В

систему группировки входят также фокусирующие соленоиды и оборудование диагностики пучка.

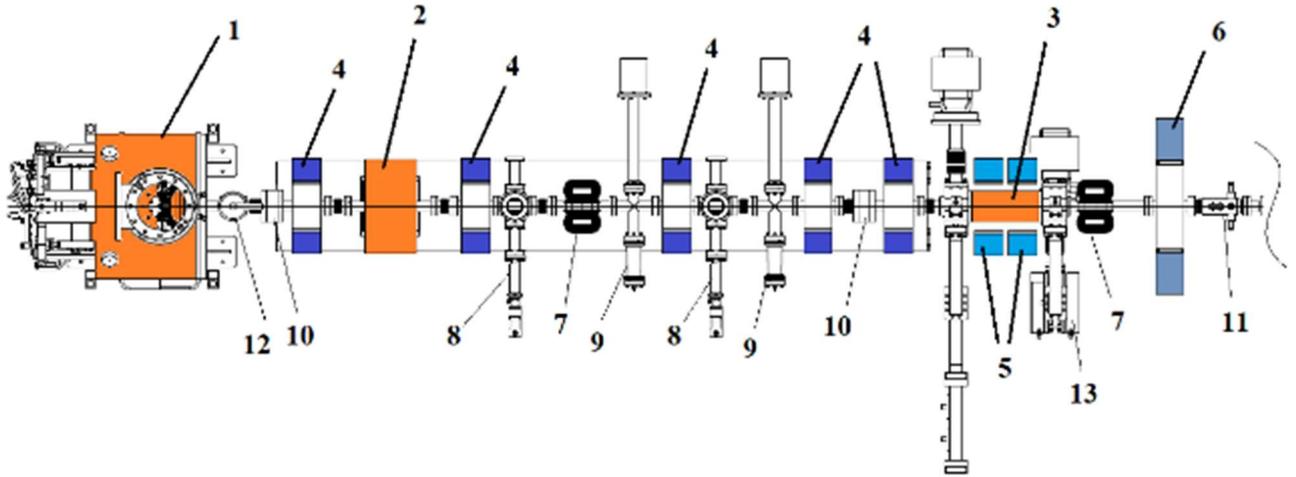


Рисунок 1.8 - Схема системы группировки. Обозначения: 1 – ВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, 2 – РГЗ с частотой 535.5 МГц, 3 – ПГ с частотой 2856 МГц, 4 – соленоиды дрейфового промежутка, 5 – соленоиды ПГ (2 шт.), 6 – согласующий соленоид, 7 – корректоры траектории пучка, 8 – измерители длительности пучка, 9 – люминофор, 10 – датчики тока пучка, 11 – пикап станция, 12 – автоматический вакуумный шибер, 13 – волноводная СВЧ- нагрузка

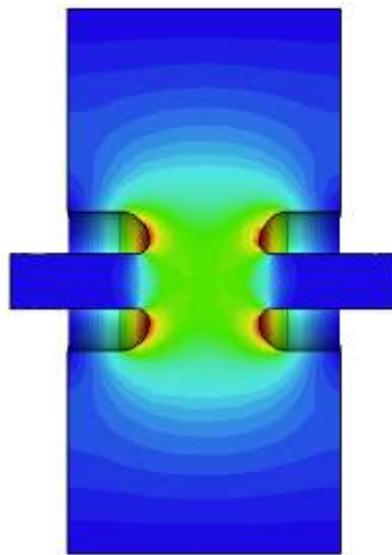


Рисунок 1.9 – Расчетная модель группирователя 3-й гармоники

Таблица 1.5 – Расчетные параметры резонатора третьей гармоники РГЗ

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

Предускоритель-группирователь ПГ является укороченной регулярной ускоряющей структурой на основе круглого диафрагмированного волновода с частотой 2856 МГц и видом колебания $2\pi/3$ (сдвиг фазы колебания электромагнитного поля на ускоряющую ячейку), который используется на инжекционном комплексе ВЭПП-5 ИЯФ [21], ее конфигурация показана на рисунке 1.10.

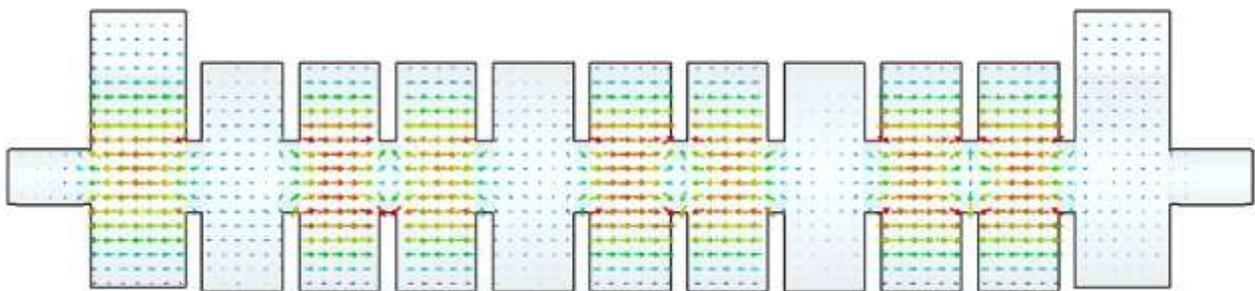


Рисунок 1.10 - Структура предускорителя –группирователя и распределение в ней напряжённости электрического поля

Структура состоит из девяти регулярных ускоряющих ячеек и двух трансформаторов типа волны. Ожидаемые параметры структуры приведены в таблице 1.6. Благодаря энергии пучка на выходе СВЧ пушки в районе 0.7 МэВ нет необходимости в оптимизации размеров первых ускоряющих ячеек. При выборе необходимой фазы инжекции пучка в структуру предускорителя-группирователя можно добиться дополнительной продольной группировки пучка и его ускорения до релятивистских значений энергии.

Таблица 1.6 - Параметры структуры предускорителя-группирователя

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний (сдвиг фазы колебания электромагнитного поля на ускоряющую ячейку)	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.32 \cdot 10^4$
Групповая скорость	0.021c
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания в УС по полю	0.108 1/м
Период	34.98 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.8 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Коэффициент перенапряжения	1.7
Время заполнения структуры	56 нс

1.5 Регулярная ускоряющая секция

Схема секции регулярного ускорения линейного ускорителя представлена на рисунке 1.11. Она 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) (обозначены 1 на рисунке 1.11), вводов СВЧ мощности (обозначение - 2), пяти волноводных СВЧ нагрузок (обозначены - 3).

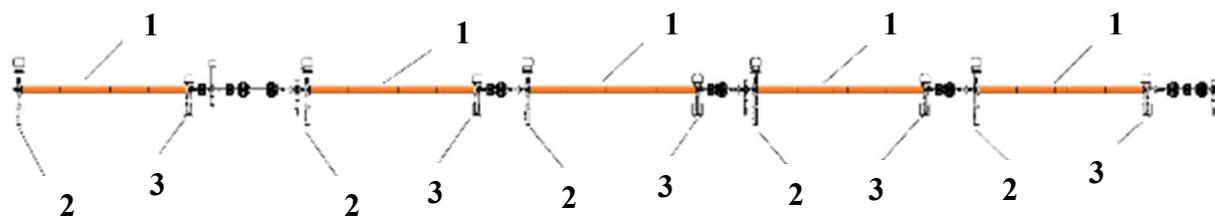


Рисунок 1.11 - Регулярные секции ускорения пучка: 1 – ускоряющие структуры, 2 – ввод СВЧ мощности, 3 – волноводные СВЧ нагрузки

Регулярные ускоряющие структуры (рисунок 1.12, параметры в таблице 1.7) выполнены на основе круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом с модой колебания $2\pi/3$. Такие структуры давно и успешно используются в ИЯФ СО РАН на инжекционном комплексе ВЭПП-5 [21].

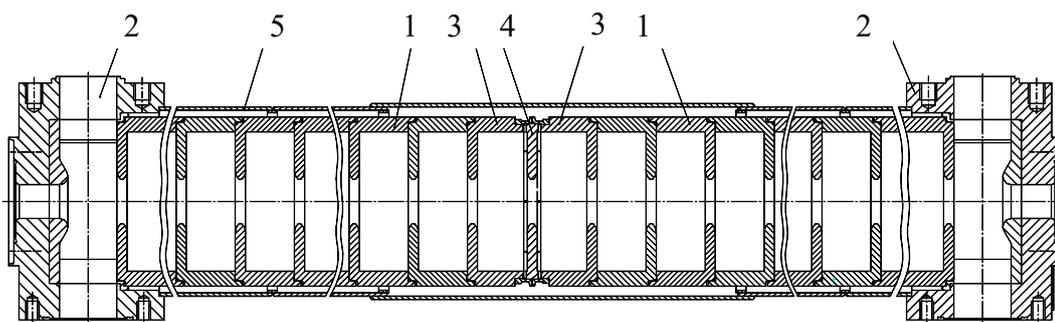


Рисунок 1.12 – Ускоряющая структура типа круглый диафрагмированный волновод: 1 – регулярная ускоряющая ячейка, 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная (соединительная) ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения

Таблица 1.7 - Параметры регулярной ускоряющей структуры

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.3 \cdot 10^4$
Период	34.99 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.75 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм

Продолжение таблицы 1.7

Длина	2.93 м
Фазовая скорость	1с
Групповая скорость	0.021с
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания по полю	0.108 м ⁻¹
Время заполнения структуры	0.456 мкс

1.6 Волноводная система

Для передачи СВЧ-мощности от клистронов к ускоряющим структурам планируется использовать волноводы с внутренним поперечным сечением 72×34 мм² с водяным термостатированием под вакуумной откачкой [20]. Схема волноводного тракта приведена на рисунке 1.13.

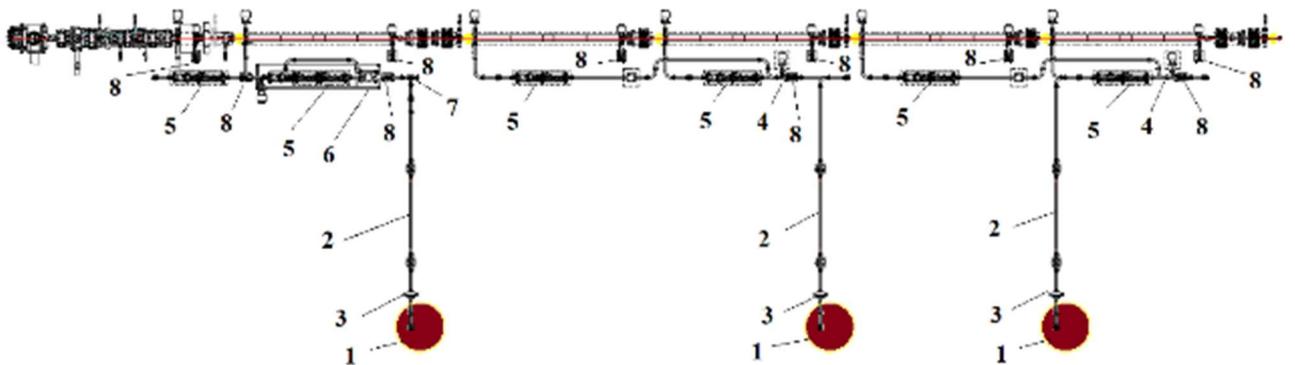


Рисунок 1.13 - Схема волноводного тракта: 1- клистрон, 2 – волноводы, 3- вакуумный волноводный шибер, 4 – 3 дБ мост, 5 – волноводный фазовращатель, 6 – волноводный аттенюатор (включает два 3 дБ моста и один фазовращатель), 7 – 7 дБ волноводный ответвитель, 8 – волноводная ВЧ нагрузка

Первый клистрон питает первую регулярную ускоряющую структуру и предускоритель-группирователь, куда с помощью волноводного ответвителя на 7 дБ поступает 10 МВт СВЧ

мощности [15, 20]. Соответственно, в первую регулярную ускоряющую структуру поступает 40 МВт. Для возможности более тонкой настройки мощности, которая поступает в предускоритель-группирователь, планируется использовать волноводный аттенюатор. Для остальных структур мощность от клистрона делится пополам с помощью 3 дБ мостов и составляет 25 МВт в каждую структуру. Все регулярные ускоряющие структуры, а также предускоритель-группирователь, имеют на входе волноводные фазовращатели. Для возможности монтажа клистронов без нарушения вакуума всего линейного ускорителя предусмотрены волноводные вакуумные шиберы. Прошедшая и отраженная СВЧ мощности поглощаются в нагрузках. Список волноводных элементов приведен в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Элементы волноводного тракта

Элемент	Кол-во	Функция
Волноводные фазовращатели (включая фазовращатель для аттенюатора)	7	Подбор фазы ускоряющего поля
Вакуумные волноводные шиберы	3	Разделение вакуумного и невакуумного объемов в случае необходимости
7 дБ ответвитель	1	Ответвление СВЧ мощности в предускоритель-группирователь
3 дБ волноводный мост (включая мост для аттенюатора)	4	Разделение СВЧ мощности пополам
Волноводные СВЧ нагрузки	10	Поглощение СВЧ мощности

Вид семидецибельного волноводного ответвителя показан на рисунке 1.14. В верхнее плечо 1 поступает 50 МВт, в плечо 2 - 40 МВт, в плечо 3 — 10 МВт. Коэффициент ответвления может настраиваться с помощью короткозамыкающего плунжера 4.

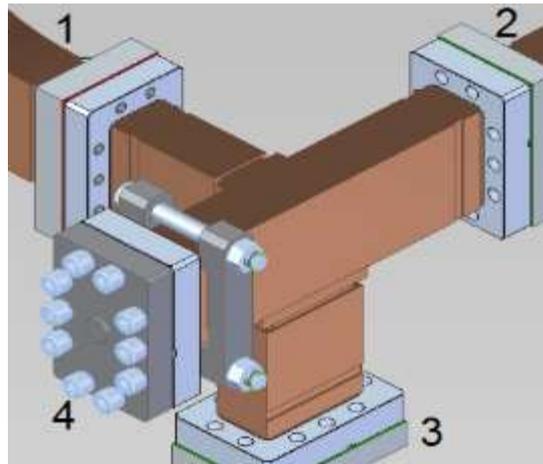


Рисунок 1.14 - Схема волноводного 7 дБ ответвителя

Волноводный фазовращатель (левый рисунок 1.15) представляет собой часть гладкого прямоугольного волновода, широкая стенка которого может деформироваться с помощью электропривода. Изменение длины волны в волноводе Λ приводит к изменению фазы согласно:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} z,$$

где z – расстояние вдоль волновода.

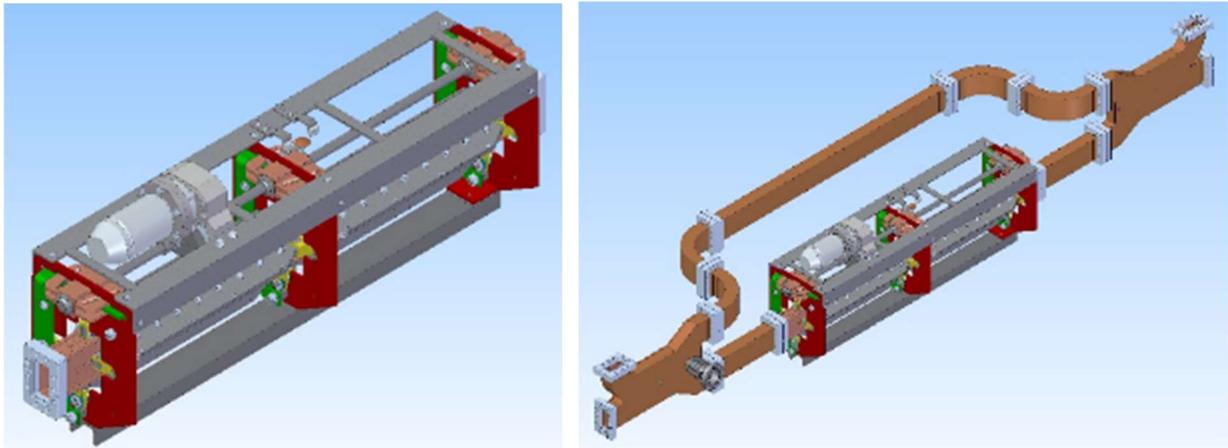


Рисунок 1.15 - Волноводные фазовращатель (слева) и аттенюатор (справа)

Волноводный аттенюатор (правый рисунок 1.15) является сборкой из двух трехдецибельных щелевых мостов и волноводного фазовращателя между ними. Принцип его работы основан на свойствах щелевого моста, в котором мощность, поступающая от генератора, делится поровну между противоположными каналами со сдвигом фазы $\pi/2$ [22]. При этом в

четвертое плечо аттенюатора мощность не поступает. Так же работает зеркальное отображение: если пустить две волны с разностью фаз $\pi/2$ в два плеча щелевого моста, то они сложатся и поступят только в одно противоположное плечо. Таким образом, если поставить два зеркально-симметричных моста и между ними разместить фазовращатель, то при отсутствии дополнительного набега фазы, мощность из генератора вся поступит во второй мост и далее в одно из его плеч. Если изменить разность фаз на $\pi/2$ между поделенными волнами, то часть мощности начнет поступать в нагрузку первого моста, а во второй мост будет поступать уменьшенная СВЧ мощность.

Для последующих регулярных ускоряющих структур мощность от одного клистрона делится пополам с помощью вышеописанного волноводного щелевого 3-х дБ-ого моста и поступает в каждую из структур. При этом каждая структура будет иметь свой волноводный фазовращатель, что должно дать возможность точной настройки входных фаз для любого режима работы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». В качестве волноводных нагрузок используются нагрузка с водяным охлаждением на основе поглощающих резонаторов (рисунок 1.16), способная поглотить более 50 МВт импульсной мощности [23].

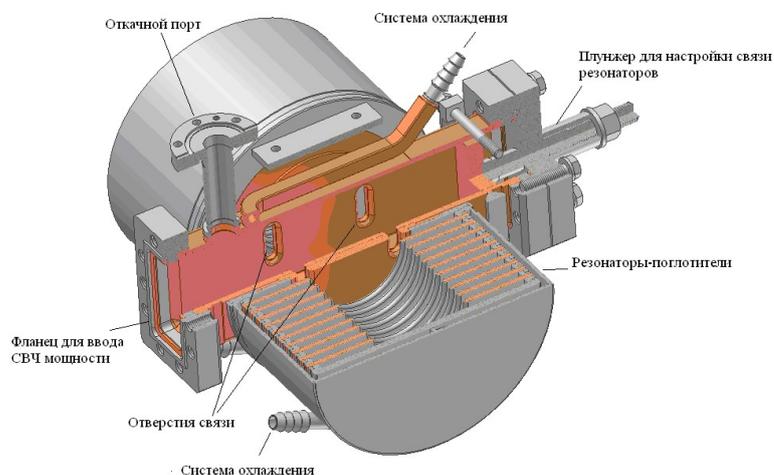


Рисунок 1.16 - Волноводная ВЧ нагрузка на 50 МВт

1.7 Клистрон

Для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» требуется три рабочих клистрона и один запасной для обеспечения бесперебойной работы. Схематичный вид клистрона сбоку (с

основными размерами) показаны на рисунке 1.17. Клистрон должен располагаться не далее, чем на расстоянии 1 м от модулятора. Вокруг клистрона необходимо иметь свободную зону радиусом 1.5 м от его внешнего размера. Основные необходимые параметры клистрона приведены в таблице 1.9.

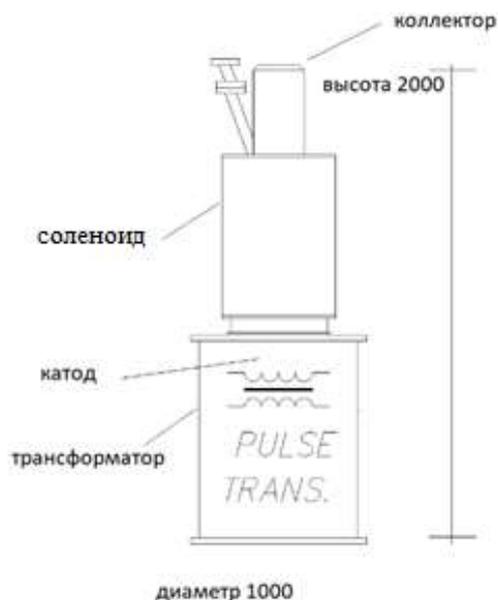


Рисунок 1.17 - Вид клистрона сбоку (слева) и размещение основных систем клистрона в плане (справа)

Таблица 1.9 - Основные параметры клистрона линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»

Частота, МГц	2856
Высокое напряжение, кВ	350
Ток пучка, А	400
Входная СВЧ мощность, Вт	500
Выходная СВЧ мощность, МВт	≥ 50
Микропервеанс, мкА/В ^{1.5}	2
Выходная средняя мощность, кВт	5÷10
Длительность импульса высокого напряжения на уровне 75%	≥ 6.7
Длительность СВЧ импульса, мкс	≥ 4
Давление остаточного газа, Торр	$\leq 10^{-9}$

В комплект оборудования клистрона входят фокусирующий электромагнит, радиационная защита, обеспечивающая уровень ионизирующего излучения 20 мкЗв/ч на расстоянии 0.3 м от клистрона, магнитоэлектрический насос с источником питания, импульсный масляный трансформатор с высоковольтным кабелем, система блокировок и т.п. Параметры необходимого импульсного трансформатора приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 - Параметры импульсного трансформатора

Напряжение, кВ	310÷350
Пиковое обратное напряжение на диоде клистрона, кВ	100
Ток, А	362÷400
Входное напряжение нагревателя, В	200÷220
Длительность плоской вершины импульса высокого напряжения, мкс	2
Частота повторения, Гц	10

Для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» требуется три модулятора (по числу клистронов) плюс один резервный. Параметры необходимого модулятора приведены в таблице 1.11. В комплект модулятора должны входить система управления, система блокировок, источник накала катода, источник магнитоэлектрического насоса, источник соленоида и т.п.

Таблица 1.11 - Параметры модулятора клистрона

Частота повторения, Гц	10
Высокое напряжение клистрона, кВ	22
Ток пучка клистрона, А	7000
Стабильность напряжения, %	$\leq \pm 0.2$
Длительность высокого напряжения, мкс	2
Разброс от импульса к импульсу, нс	$\leq \pm 2$
Разброс длительности импульса, нс	$\leq \pm 4$

1.8 Магнитная система

Схема магнитной системы линейного ускорителя [20] показана на рисунке 1.18. Для сопровождения пучка от пушки до предускорителя-группирователя используются пять фокусирующих соленоидов (1 на рисунок 1.18) с рабочим диапазоном магнитного поля $0.04 \div 0.07$ Т. Фокусировка пучка в канале группировки важна, поскольку для продольного сжатия используется фаза электрического поля, создающая значительную дефокусирующую силу. Для предускорителя-группирователя необходимы два соленоида с большим внутренним диаметром, чтобы они могли располагаться поверх структуры (2 на рисунок 1.18). Рабочий диапазон магнитного поля $0.055 \div 0.072$ Т. Между предускорителем-группирователем и первой ускоряющей структурой также будет установлен фокусирующий соленоид с диаметром апертуры 37 мм, рабочим диапазоном магнитного поля $0.06 \div 0.09$ Т и максимальным значением до 0.17 Т. После первой ускоряющей секции фокусировка релятивистского пучка производится семью электромагнитными квадрупольными линзами (4 на рисунке 1.18). Седьмая квадрупольная линза необходима для согласования пучка с последующим каналом между линейным ускорителем и накопителем. Длина линзы по ярму 100 мм. Габаритная длина линзы с катушками 130 мм. Максимальный градиент 12 Т/м.

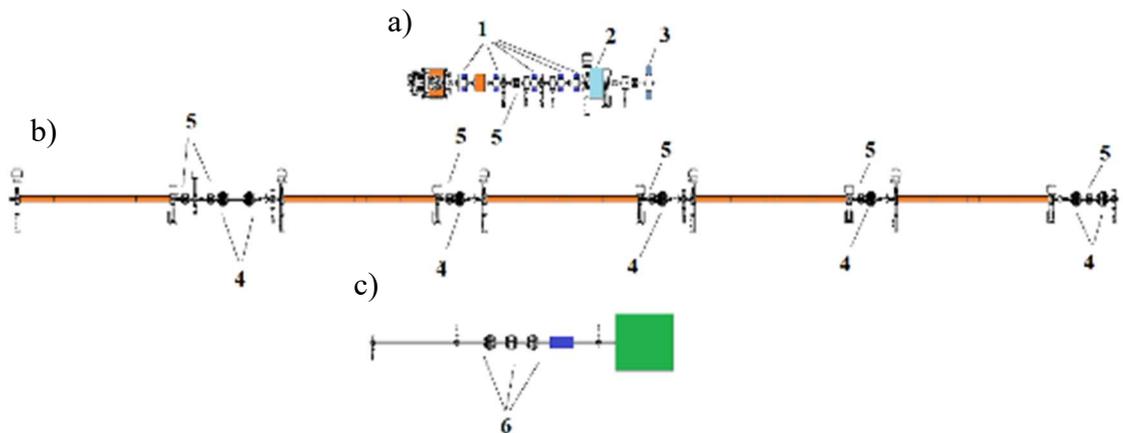


Рисунок 1.18 - Магнитная система линейного ускорителя: а) секция фокусировки и предускорения пучка, б) регулярные ускоряющие структуры, в) диагностический прямолинейный канал на выходе линейного ускорителя. Обозначения: 1 – соленоиды системы группировки, 2 – соленоид предускорителя-группирователя, 3 – согласующий соленоид перед первой регулярной ускоряющей-структурой, 4 – квадрупольные линзы регулярной части линейного ускорителя, 5 – корректоры, 6 – квадрупольные линзы диагностического промежутка

На выходе линейного ускорителя начинается канал транспортировки пучка к накопительному синхротрону и короткий диагностический промежуток, где размещены цилиндр Фарадея, спектрометр и люминофорные датчики поперечного профиля пучка. Для согласования пучка в этом промежутке используются три квадрупольные линзы (см. рисунок 1.18), конструктивно одинаковые с линзами канала с максимальным градиентом 12 Т/м.

1.9 Система диагностики пучка

Схема размещения элементов диагностики пучка линейного ускорителя показана на рисунке 1.19. Состав системы диагностики линейного ускорителя приведен в таблице 1.12 [24].

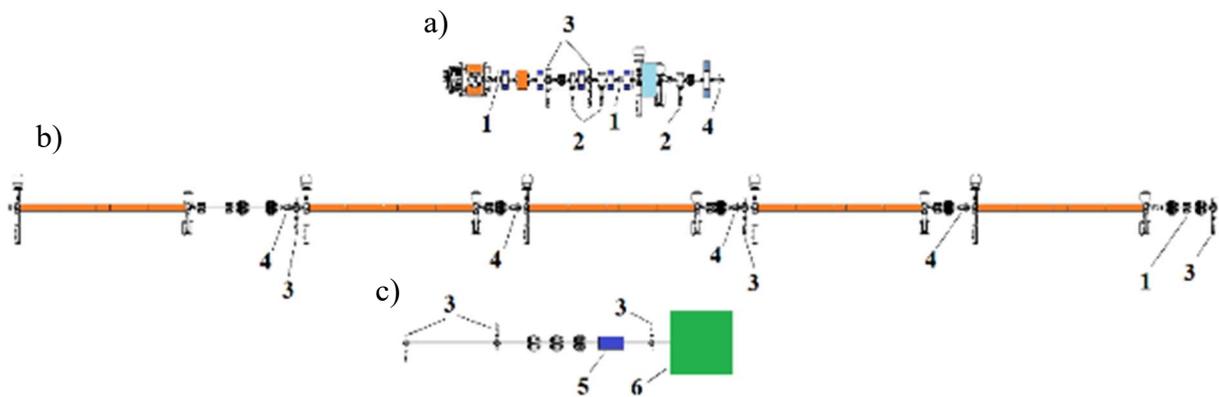


Рисунок 1.19 - Размещение элементов измерения параметров пучка: а) секция фокусировки и предускорения пучка, б) секция регулярных ускоряющих структур, в) диагностический промежуток. Обозначения: 1 – датчик тока пучка, 2 – датчик черенковского излучения, 3 – люминофоры, 4 – датчик положения пучка, 5 – спектрометр, 6 – цилиндр Фарадея

Таблица 1.12 – Состав и назначение системы диагностики пучка линейного ускорителя

Датчик	Кол-во	Функция
Полосковый датчик	7	Однопролетное измерение траектории движения пучка
Быстрый токовый датчик FCT	3	Измерение абсолютного значения заряда пучка

Продолжение таблицы 12.

Люминофорный датчик	8	Измерение положения и поперечной формы пучка
Датчик радиационных потерь	1	Регистрация потерь частиц ускоряемого пучка
Цилиндр Фарадея	1	Измерение заряда пучка при его поглощении
Черенковский датчик	3	Измерение длительности сгустка
Спектрометр	1	Измерение энергии и разброса энергии

Измерение поперечных координат пучка производится с помощью полосковых датчиков-пикапов (4 на рисунке 1.20) и соответствующей электроники обработки сигналов, которая позволяет отслеживать траекторию пучка по время пролета. Требуемая точность определения координат $\sim 10\div 20$ мкм. Электроды пикапа представляют собой короткозамкнутые на одном конце 50-омные полосковые линии, для съёма сигналов используются ввариваемые вакуумные вводы N-типа (рисунок 1.20). Внутренняя апертура датчика 30 мм, длина 170 мм.



Рисунок 1.20 - Полосковый датчик положения пучка

Для измерения заряда частиц в сгустках предполагается использовать три быстрых датчика тока пучка (Fast Current Transformer, FCT) производства Bergoz Instrumentation [25], которые могут работать при сверхвысоком вакууме, оснащены фланцами и не требуют развязки сильфонами (рисунок 1.21). Основные параметры выбранной модели FCT приведены в таблице 1.13. Для преобразования выходного сигнала FCT в цифровой вид выбран быстрый цифровой регистратор сигналов (АЦП) DN2.222-02 производства фирмы Spectrum Instrumentation (рисунок 1.21). Параметры АЦП даны в таблице 1.14. АЦП имеет Ethernet порт 1 Гбит/сек, через который он подключается к локальной сети комплекса ЦКП «СКИФ».



Рисунок 1.21 - Слева – быстрый трансформатор тока FCT фирмы Bergoz Instrumentation. Справа – быстрый АЦП DN2.222-02 фирмы Spectrum Instrumentation

Таблица 1.13 - Основные параметры выбранных моделей FCT

Параметр	Величина
Полоса	1.5 ГГц
Коэффициент трансформации	1:20
Чувствительность	1.25 В/А
Время нарастания выходного сигнала	0.23 нс
Максимальный импульсный ток	400 А (импульс 1 нс)

Таблица 1.14 - Основные параметры АЦП DN2.222-02

Параметр	Величина
Аналоговая полоса	1.5 ГГц
Частота оцифровки	2.5 ГГц
Разрядность	8 бит
Внешняя синхронизация	есть
Кол-во амплитудных диапазонов	4
Амплитудные диапазоны	от ± 200 мВ до ± 2.5 В

Поперечное распределение частиц в пучке линейного ускорителя (при энергии 0.7 МэВ, 3 МэВ, 50 МэВ и 200 МэВ) исследуется при помощи люминофорных экранов [24], вводимых в вакуумную камеру. В них используется отечественный аналог люминофорной керамики Chromax. Такая конструкция может использоваться в высоком вакууме. Внешний вид экрана показан на рисунок 1.22. Два датчика установлены по ходу пучка для измерения его поперечного профиля при энергии $E \approx 0.5 \div 0.7$ МэВ, один датчик при энергии 3 МэВ, один датчик при энергии 50 МэВ, один датчик в середине линейного ускорителя и еще 3 в диагностическом промежутке в конце ускорителя. При среднеквадратичном размере пучка $\sigma_{x,y} \approx 3$ мм видимое пятно на люминофоре имеет размер $\Delta_{x,y} \approx \pm 3\sigma_{x,y} \approx 20$ мм. Пространственное разрешение датчика около 0.15 мм. Регистрация свечения экрана под действием пучка осуществляется CMOS-камерой с объективом, помещенными внутри свинцового стакана-защиты. Регистрация свечения экрана под действием пучка осуществляется CMOS-камерой с объективом, помещенными внутри свинцового стакана-защиты.

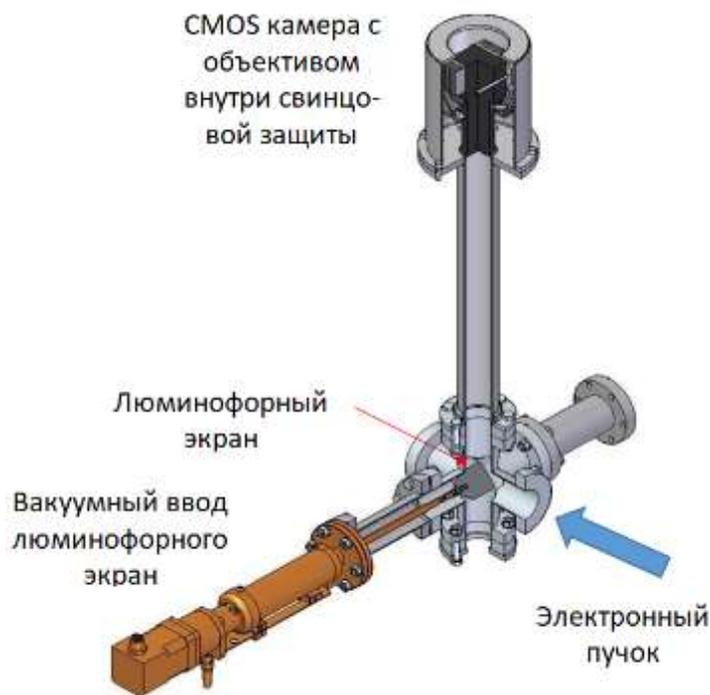


Рисунок 1.22 - Схема люминофорного экрана линейного ускорителя

Продольное распределение частиц в пучке линейного ускорителя измеряется с помощью черенковского датчика (рисунок 1.23) [24]. Действие черенковского датчика основано на испускании электронами черенковского света при движении в кварце либо аэрогеле из кварца. Выбор этих материалов связан прежде всего с их радиационной стойкостью. Коэффициент преломления кварца $n_k = 1.46$, коэффициент преломления аэрогеля $n_a = 1.05$. Вспышка

черенковского излучения регистрируется стрик-камерой PS-1/S20. Ее параметры приведены в табл. 1.15. Максимальная скорость развертки стрик-камеры равна 10 пс/мм. Если принять длительность импульса пучка равной 10 – 15 пс по основанию, то для достижения временного разрешения в несколько пикосекунд требуется сфокусировать на входе изображение излучающего объекта в размер не более 0.2 мм.

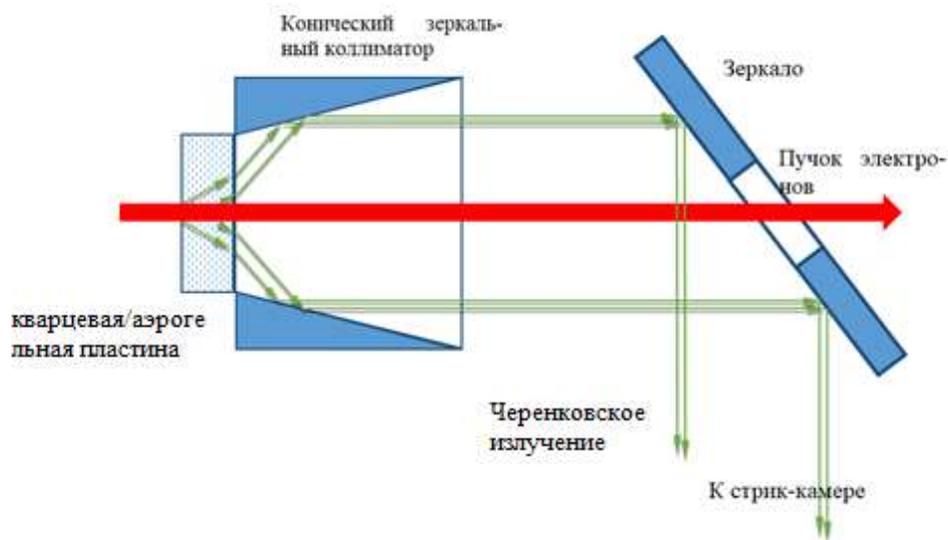


Рисунок 1.23 - Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка

Угол при вершине конуса зеркального коллиматора (см. рисунок 1.23) разный для энергии пучка $E = 0.7$ МэВ (примерная энергия после ВЧ пушки), $E = 3$ МэВ (энергия после предускорителя-группирователя) и 50 МэВ (энергия после первой регулярной ускоряющей структуры). Временное разрешение датчика зависит от вещества рабочего тела и поперечных размеров пучка на входе в радиатор. Соответствующие данные приведены в таблице 1.15.

Таблица 1.15 - Временное разрешение черенковского датчика

Размер пучка, мм	Коэффициент преломления	Разрешение, пс
1	1.46	3
3	1.46	9

Продолжение таблицы 1.15.

5	1.46	15
7	1.46	21
1	1.05	1
3	1.05	3
5	1.05	5
7	1.05	7

Регистрация черенковских фотонов осуществляется стрик-камерой (рисунок 1.24). Свет отводится на стрик-камеру с помощью вводимого зеркала, при этом возможность использовать другие приборы оптической диагностики сохраняются. Предполагается, что стрик-камера будет использоваться для специальных экспериментов с пучком, и размещаться в защищенном зале ускорителя на непродолжительное время.



Рисунок 1.24 - Внешний вид стрик-камеры PS-1/S20

Для настройки линейного ускорителя необходимо измерять энергию (в диапазоне от 0.7 МэВ до 200 МэВ с точностью около 1%) и энергетический разброс пучка (от ± 100 кэВ при $E = 0.7$ МэВ до ± 5 МэВ при полной энергии с помощью спектрометра [24], схематично показанного на рисунке 1.25. Пучок, отклоненный в поперечном магнитном поле, регистрируется с помощью люминофорного экрана и цифровой камеры.

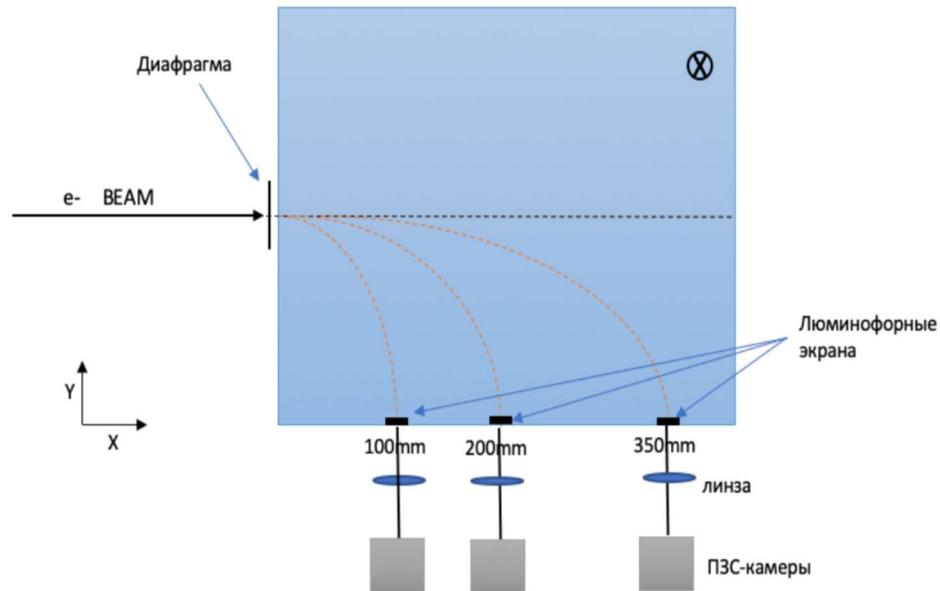


Рисунок 1.25 - Схема магнитного спектрометра для измерения энергии и энергетического разброса пучка

Для регистрации потерь электронного пучка используется распределенный датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне. Условие возникновения черенковского излучения накладывает ограничение на использование данного датчика при малых энергиях пучка. Минимальная энергия пучка, при которой распределенный датчик может регистрировать потери, составляет 5 МэВ.

Принцип работы датчика потерь основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами электромагнитного ливня, который образуется при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется с помощью фотодетектора. Сигнал с фотодетектора оцифровывается при помощи АЦП. Время прихода светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве

потерянных частиц. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволоконка. Схема датчика изображена на рисунке 1.26.

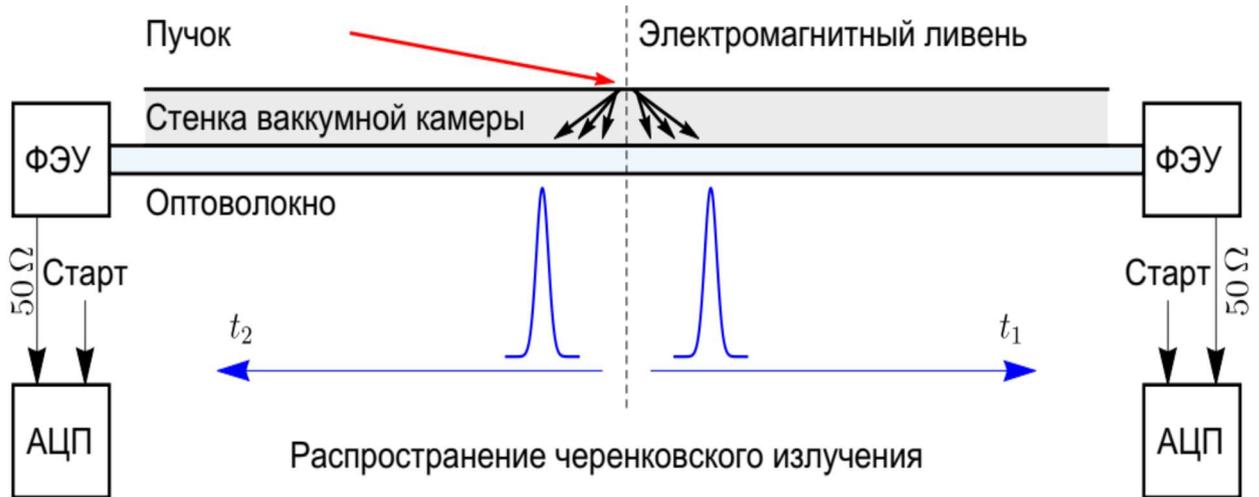


Рис 1.26 - Схема оптоволоконного датчика потерь пучка

В датчике используется кварцевое многомодовое оптоволоконно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Thorlabs» (FG550UEC) [26]. Диаметр сердцевины/оболочки – 550/600 мкм. Максимальный коэффициент затухания 0.01 дБ/м. Расчетное значение дисперсии составляет 0.19 нс/м.

Для достижения пространственного разрешения датчика не хуже 1 м оптимальная длина отрезка кварцевого оптоволоконка составляет 40 м. Радиационная стойкость кварца позволяет эксплуатировать датчик при дозах до 100 Гр без существенных потерь уровня сигнала.

В качестве фотодетектора используется ФЭУ со спектральным диапазоном чувствительности фотокатода в максимуме спектра черенковского излучения (300-900 нм), временем нарастания фронта 0.5 нс и длительностью импульса анодного тока (полуширина) – не менее 1.5 нс [27]. Его коэффициент усиления на уровне 10^6 позволяет регистрировать потери пучка на уровне 1% (0.1 нКл). Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) регистрации сигнала ФЭУ, разработанный в ИЯФ СО РАН, имеет полосу пропускания 200 МГц и частоту дискретизации 5 ГГц.

В конце линейного ускорителя предполагается использовать цилиндр Фарадея, который должен обеспечить измерение заряда пучка в диапазоне $0.3 \div 1$ нКл с энергией до 200 МэВ с точностью не хуже 5%.

1.10 Вакуумная система

С помощью отсекающих затворов-шиберов линейный ускоритель при необходимости может быть разделён на три вакуумных объема. Первый включает в себя ВЧ пушку, второй – систему группировки и предускорения, которая заканчивается предускорителем-группирователем, третий включает регулярные ускоряющие секции. В рабочем состоянии во всех объемах линейного ускорителя давление остаточного газа должно быть $\leq 10^{-9}$ Торр.

Первый вакуумный объем, включающий ВЧ пушку, отсекается вакуумным шибером, способным обеспечить автоматическое закрытие объема пушки в случае вакуумной аварии. Остальные секции линейного ускорителя отсекаются ручными вакуумными шиберами с тефлоновым уплотнением. Откачка линейного ускорителя осуществляется магниторазрядными насосами. Для форвакуумной откачки предусмотрены вакуумные порты с изолирующими затворами. Также линейный ускоритель оснащен собственным передвижным вакуумным откачным постом. Предусмотрен непрерывный мониторинг вакуума по току магниторазрядных насосов. Для измерения давления газа в объеме ВЧ пушки предусмотрен отдельный прецизионный датчик (вакуумная лампа).

1.11 Система охлаждения и термостабилизации

С одной стороны, высокочастотные ускоряющие структуры и устройства весьма чувствительны к изменению температуры, с другой – в них выделяется достаточно большая мощность, приводящая к нагреву. Для эффективной, надежной и устойчивой работы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» используется система охлаждения и термостабилизации (СТС) со следующими спецификациями:

- Для всех элементов линейного ускорителя температура входящей воды 33 ± 0.1 °С.
- Диапазон регулировки температуры входящей воды $31 \div 35$ °С.
- Диапазон изменения температуры воды в среднем нагревательными элементами 0.5 °С.

С точки зрения СТС возможны два режима работы: режим тренировки структуры для уменьшения вероятности ВЧ пробоев с частотой повторения 10 Гц и рабочий режим инъекции пучка с частотой 1 Гц.

Предполагается наличие двух контуров системы охлаждения: один для элементов, не требующих, другой – для элементов, требующих СТС с температурой, превышающей температуру окружающей среды ($\sim 31 \div 35^\circ\text{C}$). Первый контур использует деминерализованную воду с температурой $27 \pm 2^\circ\text{C}$ для охлаждения магнитных элементов. Второй контур, снабженный нагревателями для термостабилизации воды с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$, предназначен для охлаждения ВЧ элементов (рисунок 1.27). Избыточное тепло из этого контура сбрасывается через пластинчатый теплообменник в общую систему охлаждения.

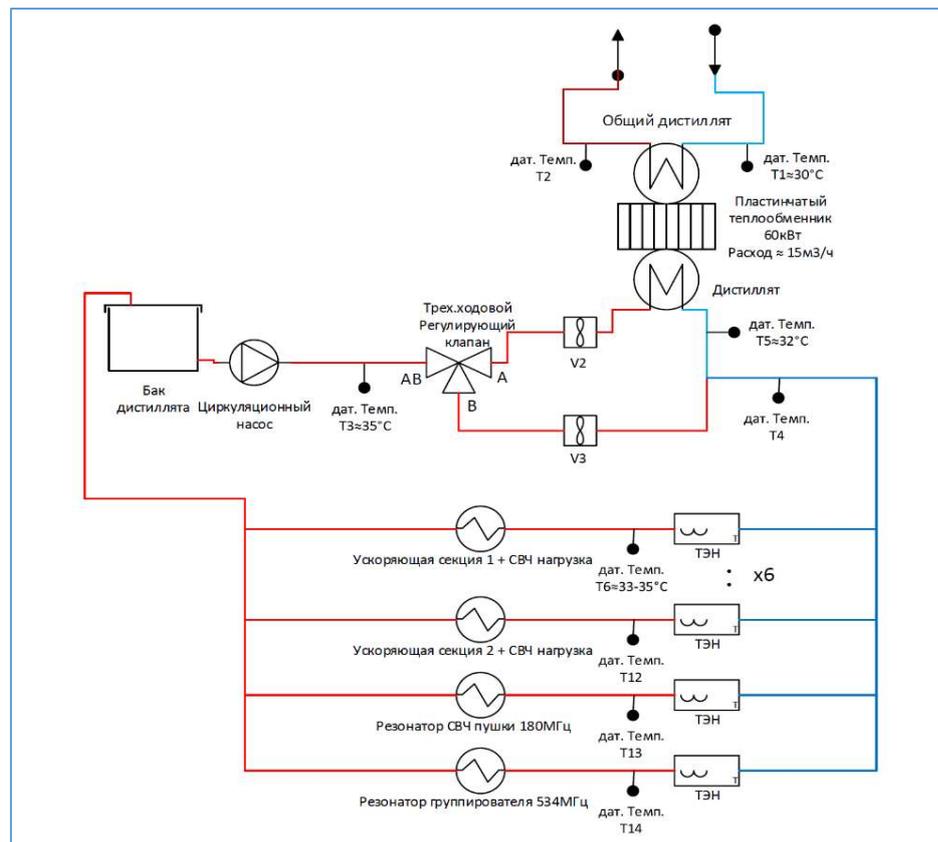


Рисунок 1.27 - Схема контура охлаждения линейного ускорителя с термостабилизацией

Нагревательный блок представляет из себя короб из нержавеющей стали с тремя электронагревателями мощностью по 4 кВт каждый. В коробе расположены перегородки так, чтобы поток воды проходил и разворачивался обратно вдоль электронагревателя. Питание

нагревателей осуществляется от тиристорного регулятора мощности ТРМ-3М [28], который управляется контроллером с обратной связью через датчик температуры на выходе из нагревателя.

1.12 Заключение к Главе 1

В качестве схемы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» решено использовать следующую конфигурацию: источник электронов, представляющий собой ВЧ пушку, канал группировки и предускорения пучка, пять регулярных ускоряющих структур на основе круглых трехметровых диафрагмированных волноводов. Источниками СВЧ мощности являются клистроны. Первый клистрон питает предускоритель-группирователь и первую регулярную ускоряющую структуру. Последующие два клистрона – оставшиеся 4 структуры.

Для управления током пучка было решено применить модулирующее напряжение, прикладываемое между катодом и сеткой катодного узла, расположенного в ВЧ пушке. Таким образом может выбираться режим работы ускорителя (односгустковый, многосгустковый), а также определяются начальные условия инжекции пучка.

Канал группировки должен состоять из дрейфового промежутка и резонатора, работающего на утроенной частоте ВЧ пушки для линеаризации продольных группирующих частицы сил. Для эффективности захвата пучка в режим ускорения необходим дополнительный предускоритель-группирователь, в котором пучок окончательно группируется и становится релятивистским. После этого он может инжектироваться в регулярные ускоряющие структуры. Для поддержания стабильной частоты резонансных СВЧ элементов необходима система термостабилизации.

Магнитная система в начале ускорителя, где энергия не является значительной, может быть выполнена на основе соленоидов. После первой регулярной ускоряющей структуры используются квадрупольные линзы. Предварительное формирование пучка и его ускорение до релятивистских энергий позволяет не использовать магнитные поля вдоль первой регулярной ускоряющей структуры. Для корректировки орбиты пучка необходимы корректирующие дипольные магниты.

Поскольку формирование основных параметров пучка происходит до начала второй регулярной ускоряющей структуры, система диагностики в наибольшем количестве

сосредоточена именно в этом промежутке. Она представлена различными оптическими датчиками для измерения как поперечного профиля пучка, так и продольного. Кроме этого применяются датчики положения пучка на основе полосковых линий и индукционные датчики тока пучка.

Глава 2. Моделирование и оптимизация пучка в линейном ускорителе

2.1 Захват в режим ускорения

Энергия заряженной частицы ε , находящейся на оси ускоряющей структуры z на основе диафрагмированного волновода с бегущим типом волны, меняется согласно

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = eE_0 \cos \varphi, \quad (2.1)$$

где E_0 – амплитуда основной гармоники, φ – фаза частицы относительно волны, e – заряд частицы. Если $v_p = c\beta_p$ (c – скорость света в вакууме) – фазовая скорость волны, то фазу частицы φ можно найти как

$$\varphi = \omega \left(\int_0^z \frac{dz}{v_p} - t \right).$$

Так как скорость частицы $dz/dt = v_e = c\beta$, после преобразований получим

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta} \right). \quad (2.2)$$

Произведя замену переменных

$$\xi = \frac{z}{\lambda}, \quad \gamma = \frac{\varepsilon}{m_0 c^2} \quad \text{и} \quad G = \frac{eE_0 \lambda}{m_0 c^2},$$

где λ – длина волны ускоряющей структуры, а m_0 – масса покоя электрона, преобразуем уравнения (2.1) и (2.2) к виду

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = G \cos \varphi, \quad \frac{d\varphi}{d\xi} = 2\pi \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta} \right).$$

При $\beta_p = 1$ уравнения движения для продольной фазовой плоскости приобретают окончательную каноническую форму

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = G \cos \varphi, \quad \frac{d\varphi}{d\xi} = 2\pi \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.3)$$

с гамильтонианом [29]:

$$H = -G \sin \varphi + 2\pi \int \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) d\gamma = -G \sin \varphi + 2\pi\gamma(1 - \beta). \quad (2.4)$$

Решение (2.3) задает кривые на фазовой плоскости (γ, φ) , а гамильтониан (2.4), не являясь явной функцией времени, сохраняется и определяется начальными условиями

$$H = H_i = -G \sin \varphi_i + 2\pi\gamma_i(1 - \beta_i), \quad (2.5)$$

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

Определим условия, когда частица захватывается волной и непрерывно увеличивает энергию [30]. Учитывая

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

и

$$\gamma(1 - \beta) = \frac{1}{\gamma(1+\beta)},$$

закключаем, что при $\gamma \rightarrow \infty$ $\gamma(1 - \beta) \rightarrow 0$, а из гамильтониана (2.4) находим асимптотическую фазу φ_∞ , которая соответствует непрерывному ускорению частицы

$$\sin \varphi_{\gamma \rightarrow \infty} \rightarrow \sin \varphi_\infty = -H/G. \quad (2.6)$$

Так как $|\sin \varphi_\infty| \leq 1$, достигнуть сколь угодно большой энергии могут только те частицы, у которых $H < G$. Частицы, для которых $H > G$, всегда имеют конечную энергию и, следовательно, осциллирующую фазовую траекторию.

Требование $H < G$ приводит к иррациональному неравенству

$$2\pi\gamma_i \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_i^2}} > 2\pi\gamma_i - G(1 + \sin \varphi_i), \quad (2.7)$$

при решении которого могут быть два случая. Первый реализуется, когда выражение в правой части (2.7) больше нуля. Тогда, возводя неравенство в квадрат, получаем

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

после некоторых преобразований получим

$$\begin{cases} \gamma_i > \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{G(1+\sin \varphi_i)} + \frac{G(1+\sin \varphi_i)}{2\pi} \right] \\ G < \frac{2\pi\gamma_i}{(1+\sin \varphi_i)} \end{cases} \quad (2.8)$$

Видно, что этот случай соответствует условно малым ускоряющим полям (малому темпу ускорения). В зависимости от параметра G при заданных фазах инжекции можно определить минимальную начальную энергию, необходимую, чтобы захватить частицу в режим стационарного ускорения. При этом G не произвольно, поскольку на него также действует ограничение, связанное с энергией и фазами инжекции. То есть, возникает множество параметров $[\gamma_i, G]$, которое удовлетворяет (2.8) и зависит от фаз инжекции.

Второй случай возникает, если в (2.7) в правой части неравенства выражение меньше нуля, тогда решением неравенства является вся область допустимых значений для правой части, то есть

$$\begin{cases} 2\pi\gamma_i - G(1 + \sin \varphi_i) < 0 \\ 1 - \frac{1}{\gamma_i^2} \geq 0 \end{cases},$$

или

$$\begin{cases} G > \frac{2\pi\gamma_i}{(1+\sin \varphi_i)} \\ \gamma_i \geq 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Этот случай соответствует условно большим ускоряющим полям, для которых существует множество значений амплитуд поля и начальных фаз, когда возможно ускорение частиц с любыми начальными энергиями. Само множество амплитуд поля зависит от начальных параметров инжектируемых частиц и не может быть любым.

Захват в режим стационарного ускорения означает, что через некоторый промежуток времени частица попадет в условия, когда ее энергия будет только увеличиваться. При этом критерии (2.8) и (2.9) не говорят ничего о том, как происходит захват в режим ускорения. Другими словами, мы не знаем, что будет с частицами в промежуток времени между инжекцией и стационарным ускорением. Одним из возможных и неблагоприятных сценариев является изменение направления движения частицы, что не противоречит захвату в режим стационарного ускорения. Она может совершить несколько продольных осцилляций и в итоге попасть в нужную фазу для последующего увеличения энергии. То есть, с точки зрения продольной динамики, критерии захвата будут выполнены, но в реальном ускорителе, скорее всего, такие частицы будут потеряны, особенно, при наличии внешнего магнитного поля.

Рассмотрим, как меняется направление движения частицы. Уравнение фазовой траектории можно получить из выражения для гамильтониана (2.4)

$$\gamma(\varphi) = \frac{(H+G \sin \varphi)^2 + 4\pi^2}{4\pi(H+G \sin \varphi)}. \quad (2.10)$$

Найдем условие, при котором частица останавливается в некоторой фазе φ_{st} , потеряв всю кинетическую энергию, что соответствует $\gamma(\varphi_{st}) = 1$ или

$$1 = \frac{(H+G \sin \varphi_{st})^2 + 4\pi^2}{4\pi(H+G \sin \varphi_{st})},$$

откуда

$$\sin \varphi_{st} = \frac{2\pi - H}{G}. \quad (2.11)$$

Из (2.11) следует, что фазы остановки φ_{st} не существуют тогда и только тогда, когда выполняется одно из неравенств совокупности

$$\frac{2\pi - H}{G} < -1 \quad \text{или} \quad \frac{2\pi - H}{G} > 1.$$

Подстановка начальных условий (2.6) дает

$$G < \frac{2\pi(1 - \gamma_i(1 - \beta_i))}{1 - \sin \varphi_i} \quad \text{или} \quad G < \frac{2\pi(1 - \gamma_i(1 - \beta_i))}{-1 - \sin \varphi_i}. \quad (2.12)$$

Заметим, что $2\pi(1 - \gamma_i(1 - \beta_i)) > 0$ при любых γ_i и β_i , следовательно, второе неравенство системы (2.12) описывает область отрицательных амплитуд полей, а потому может быть опущено. Таким образом, неравенство

$$G < \frac{2\pi(1 - \gamma_i(1 - \beta_i))}{1 - \sin \varphi_i}. \quad (2.13)$$

определяет область, в которой частица будет двигаться без остановки.

Можно заключить, что существует два сценария инжекции частиц в ускоряющую структуру с бегущей волной [30]. Первый задается системой (2.8). В этом случае частица попадает в режим ускорения, но ее начальная энергия должна быть выше определенного значения. Второй случай связан с условием (2.9), когда начальная энергия ускоряемой частицы может быть любой, но поля структуры должны быть выбраны с учетом этой энергии. Стоит заметить, что в обоих случаях начальная энергия частиц определяет ширину области захвата, то есть диапазон начальных допустимых фаз и амплитуд полей. Кроме этих двух случаев

существует критерий (2.13), который не противоречит захвату частиц в режим ускорения, но говорит о том, что перед этим частица может потерять полностью свою начальную энергию, после чего начнет ускоряться в обратном направлении. Если при этом выполняются условия захвата (2.8) и (2.9), то через какое-то время частица снова начнет терять свою энергию, поменяет направление движения второй раз и попадет в область стационарного ускорения.

Описанные случаи (2.8) и (2.9) с учетом (2.13) иллюстрируются рисунком 2.1 при энергии инжекции частиц $W_0 = 0.7$ МэВ, с учетом связи параметра G с амплитудой ускоряющего поля.

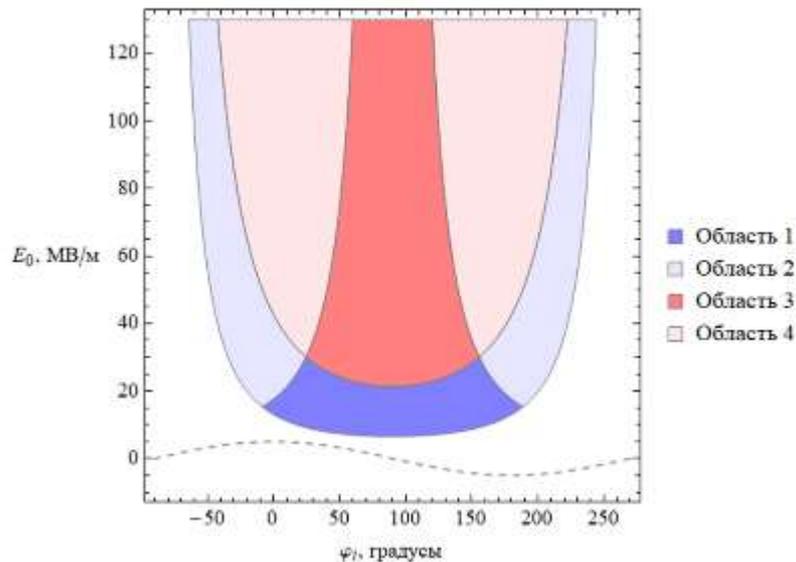


Рисунок 2.1 - Случаи захвата частицы в ускоряющую структуру с бегущей волной. 1 – область захвата в ускорение при энергии инжекции 0.7 МэВ, точек полной остановки нет; 2 – захват в ускорение при энергии инжекции 0.7 МэВ, точки полной остановки есть; 3 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, точек полной остановки нет, 4 – захват в ускорение при любой энергии инжекции, точки полной остановки есть

Видно, что при увеличении амплитуды электрического поля, область фаз захвата в режим ускорения без изменения направления продольного импульса, уменьшается. То есть большие амплитуды ускоряющих полей не всегда выгодны для ускорения частиц с нерелятивистскими начальными энергиями.

На рисунке 2.2 показаны фазовые траектории частиц для случая 1 рисунка 2.1. Чтение траекторий происходит справа налево, поскольку фазовая скорость волны выше скорости частиц. Амплитуда поля принята 20 МВ/м, а диапазон фаз от 50° до 150° . Для таких амплитуд начальная энергия частиц $W_0 = 0.7$ МэВ отвечает условиям (2.8). Из рисунка 2.2 видно, что в

режим ускорения захватываются даже частицы, инжектируемые в фазах с отрицательными полями. При этом остановки частиц не происходит, хотя некоторые из них значительно теряют свою энергию в начальный момент времени.

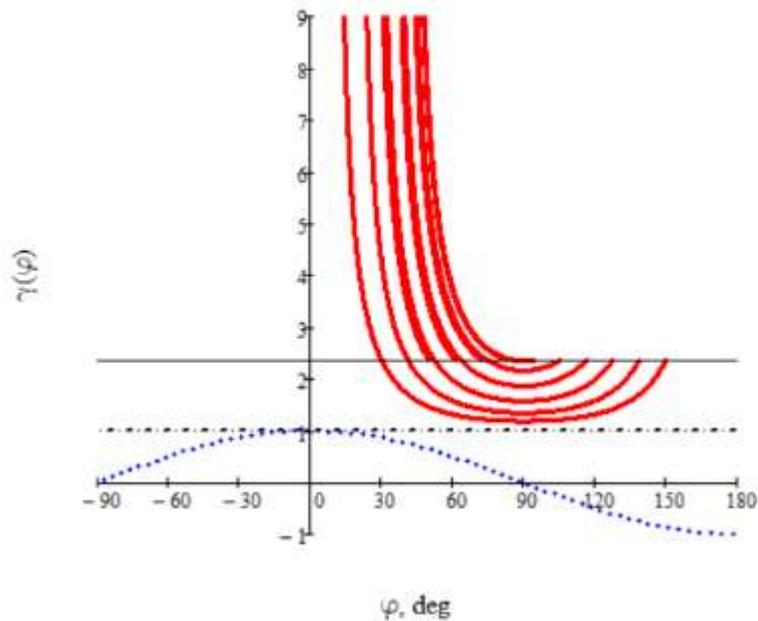


Рисунок 2.2 - Фазовые траектории частиц с начальной энергией 0.7 МэВ для ускоряющего поля 20 МВ/м и диапазона начальных фаз $\{50^{\circ}; 150^{\circ}\}$ (область 1 из рисунка 2.1). Фазовые траектории читаются справа налево

Область 2 на рисунке 2.1 соответствует частицам, меняющим направление импульса в процессе ускорения. Она разделяется на две части симметрично относительно фазы 90° . С точки зрения движения по фазовым траекториям эти две области повторяют друг друга из-за $\sin(\pi/2 \pm \varphi) = \cos\varphi$ в (2.1.5).

Частицы, инжектированные в фазах $\geq 90^{\circ}$, попадут на те же траектории, что и частицы, инжектированные при фазах $\leq 90^{\circ}$ при условии одинаковой амплитуды ускоряющего поля. Математически это одни и те же траектории. В итоге все частицы попадут в область ускорения, но те, которые инжектировались при фазах более 90° , успеют дважды поменять направление своего продольного импульса, а частицы, с начальными фазами менее 90° не успеют этого сделать.

На рисунке 2.3 изображены траектории частиц, инжектированных при амплитуде ускоряющего поля 40 МВ/м, при фазах $\{10^0; -30^0\}$ и $\{170^0; 270^0\}$. Начальная энергия для всех частиц 0.7 МэВ. Видно, что частицы справа от 90^0 попали в те же точки, что и частицы слева от 90^0 , но одни успели дважды потерять свою энергию и поменять направление продольного импульса, а другие начали ускоряться сразу.

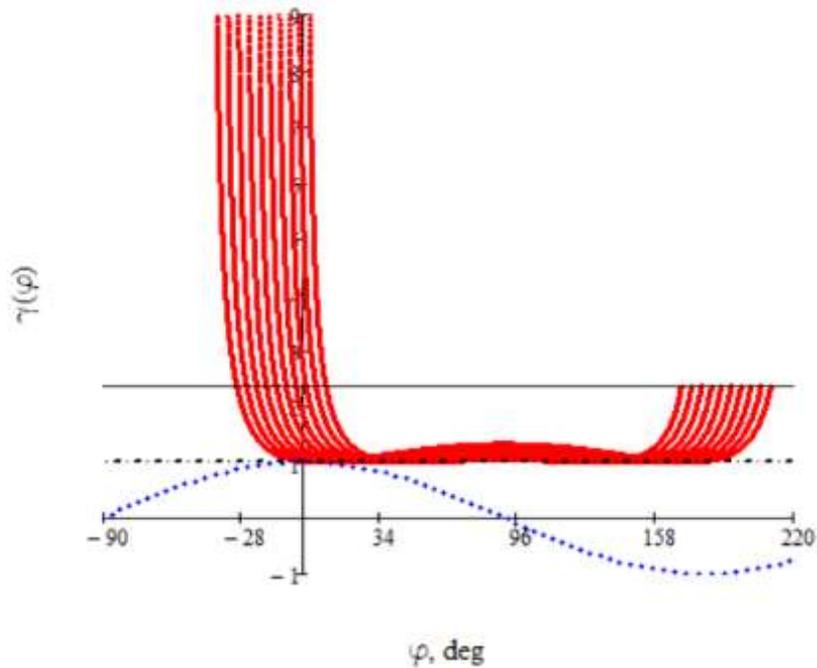


Рисунок 2.3 - Траектории частиц, инжектированных при амплитуде ускоряющего поля 40 МВ/м, при фазах $\{10^0; -30^0\}$ и $\{170^0; 210^0\}$. Начальная энергия для всех частиц 0.7 МэВ

И хотя в итоге все частицы оказываются захваченными в режим ускорения, уместно предположить, что те, которые начали движение с фазами $>90^0$ и дважды теряли энергию, скорее всего, будут потеряны, поскольку такое возмущение слишком велико для обеспечения фокусировки и устойчивого поперечного движения. Для частиц с начальными фазами $\leq 90^0$ это не так и вероятность уцелеть для них выше.

Область 3 рисунка 2.1 отвечает за захват в режим ускорения без изменения направления движения. Фазовые траектории для нее представлены на рисунке 2.4.

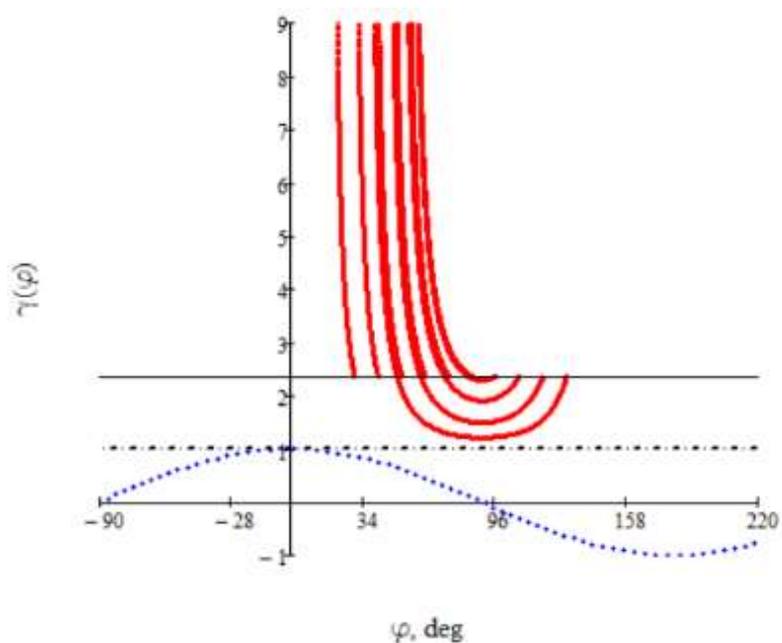


Рисунок 2.4 - Траектории частиц, инжектированных при амплитуде ускоряющего поля 40 МВ/м, при фазах $\{30^0; 130^0\}$. Начальная энергия для всех частиц 0.7 МэВ

Здесь изображены частицы, инжектированные при амплитуде ускоряющего поля 40 МВ/м с начальными фазами $\{30^0; 130^0\}$. Видно, что те частицы, которые имеют начальные фазы более 90^0 , в начальный момент времени, теряют свою энергию, но, даже потеряв ее практически до нуля, они не меняют направления своего движения.

Область 4 рисунка 2.1 аналогична области 2. Все те выводы, которые были сформулированы для области 2, справедливы и для области 4. Частицы слева и справа от 90^0 попадают под критерий изменения направления продольного импульса, но частицы с начальными фазами менее 90^0 не успевают этого сделать, а частицы с начальными фазами более 90^0 успевают поменять направление своего движения. Как и выше, все частицы оказываются в режиме ускорения, но первые частицы вероятнее уцелеют, а вторые погибнут. Фазовые траектории показаны на рисунке 2.5 для напряженности ускоряющего поля 40 МВ/м и начальных фаз $\{10^0; 20^0\}$ и $\{160^0; 170^0\}$.

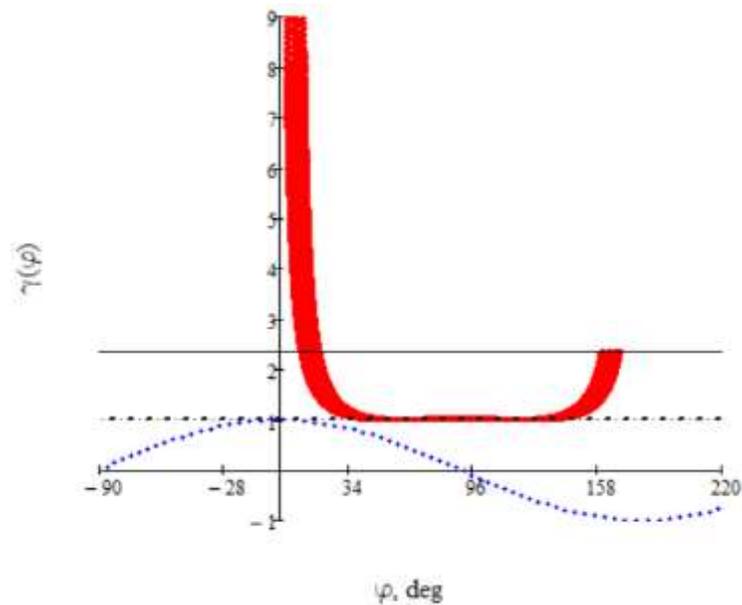


Рисунок 2.5 - Траектории частиц, инжектированных при амплитуде ускоряющего поля 40 МВ/м, при фазах $\{10^0; 20^0\}$ и $\{160^0; 170^0\}$. Начальная энергия для всех частиц 0.7 МэВ

Рисунок 2.6 демонстрирует области захвата частиц с релятивистской начальной энергией $W_0 = 3$ МэВ.

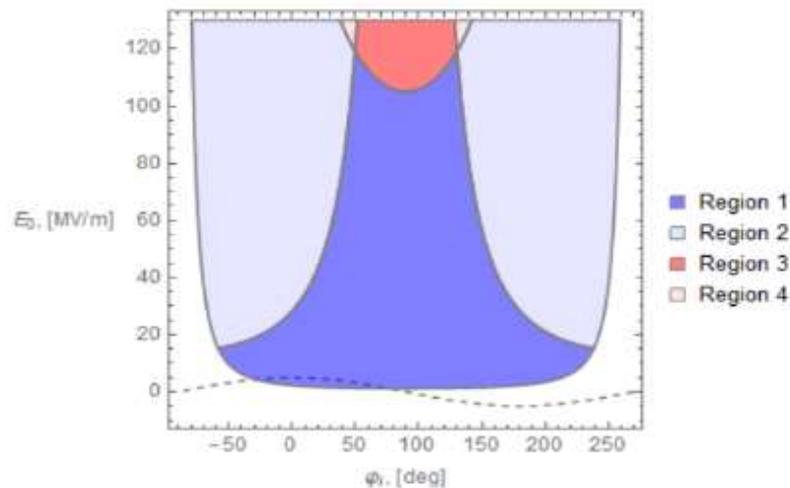


Рисунок 2.6 - Области захвата частицы в режим ускорения. 1 – захват в ускорение при энергии инжекции 3 МэВ, нет точек полной остановки, область 2 – захват в ускорение при энергии инжекции 3 МэВ, существуют точки полной остановки, область 3 – захват в ускорение при любой энергии инжекции выше 3 МэВ, нет точек полной остановки, область 4 – захват в ускорение при любой энергии инжекции выше 3 МэВ, существуют точки полной остановки

Видно, что в этом случае начинает доминировать область 2 условия (2.8). При этом по-прежнему остаются начальные фазы, при которых частицы могут поменять направление своего движения, но в итоге оказаться в режиме стационарного ускорения. Стоит также заметить, что здесь область ускорения без изменения направления движения значительно расширяется при малых ускоряющих полях, по сравнению со случаем, показанным на рисунке 2.1. При увеличении амплитуды поля, эта область сужается и начинает доминировать режим с изменением направления импульса движения.

Рисунки 2.2 – 2.5 показывают, что ускорение частиц может происходить не в оптимальной фазе с точки зрения набора энергии. Для максимального темпа ускорения фазовые траектории должны асимптотически стремиться к нулевой фазе, тогда частица будет в максимуме электрического поля. Из формулы (2.6) следует, что при этом $H = 0$, а фаза инжекции определяется согласно

$$0 = -G \sin \varphi_i + 2\pi\gamma_i(1 - \beta_i). \quad (2.14)$$

При заданной фазе инжекции φ_m максимального ускорения частица достигнет при начальном гамма-факторе (см. рисунок 2.7)

$$\gamma_m = \frac{G \sin \varphi_m}{4\pi} + \frac{\pi}{G \sin \varphi_m}. \quad (2.15)$$

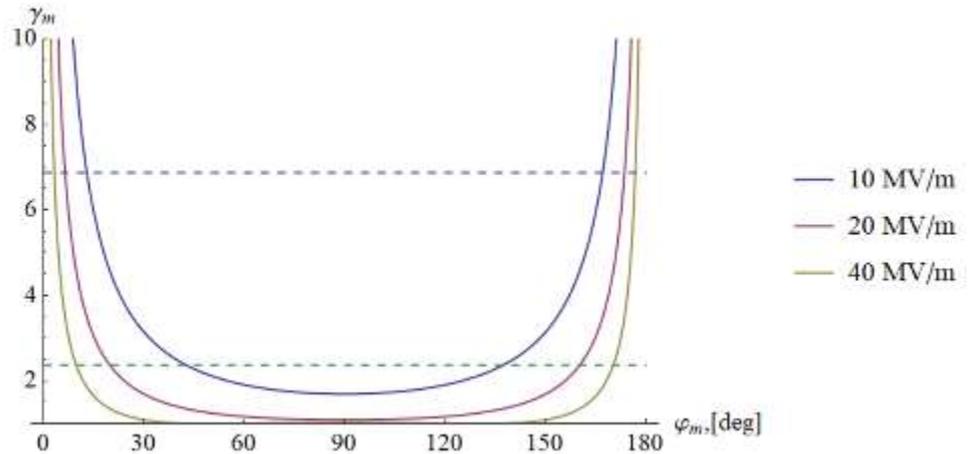


Рисунок 2.7 - Зависимость начальной энергии инжекции от фазы инжекции для максимального ускорения частицы

Из рисунка 2.7 следует, что для заданного гамма-фактора существуют две начальные фазы, которые удовлетворяют ускорению в максимальном поле. При этом нужно помнить, что

существуют критерии (2.8), (2.9) и (2.13), которые могут приводить к ограничениям на начальные фазы. Например, для амплитуды 20 МВ/м получается, что для начальной энергии $W_0 = 0.7$ МэВ ($\gamma_i = 2.4$) необходимы начальные фазы инжекции 20° и 160° . Формально, обе фазы приводят к тому, что частица при инжекции изменит направление своего продольного импульса согласно диаграмме рисунка 2.1, но, как было сказано выше, при фазе 20° частица этого сделать не успеет и будет захвачена в режим ускорения.

Из рисунков 2.2 – 2.5 также следует, что по мере приближения фазовых траекторий к режиму со стационарным ускорением, происходит продольная группировка частиц. Рассмотрим, как меняется фазовая длительность короткого сгустка при инжекции около фазы 90° . При начальной фазовой длительности $\Delta\varphi$ частицы на «краях» инжектируемых фаз $\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$ и $\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$ при захвате в ускорение будут стремиться к одной асимптотической фазе, так как их гамильтонианы совпадают, что следует из выражений (2.5) и (2.6). Поэтому фазовая длительность ускоренного пучка $\Delta\varphi_f$ будет определяться разницей асимптотических фаз двух частиц – инжектированной в фазе $\frac{\pi}{2}$ и инжектированной в фазе $\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$ либо в $\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$.

В соответствии с выражением (2.6) найдем синус асимптотической фазы для частицы, инжектированной в $\pi/2$:

$$\sin \varphi_\infty |_{\varphi_i=\pi/2} = \sin \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G} = 1 - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G}. \quad (2.16)$$

Аналогично для частицы, инжектированной в $\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$:

$$\sin \varphi_\infty |_{\varphi_i=\frac{\pi}{2}-\frac{\Delta\varphi}{2}} = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G} = \cos \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G}. \quad (2.17)$$

Для сгруппированного пучка $\frac{\Delta\varphi}{2} \ll 1$ и (2.17) можно разложить в ряд

$$\sin \varphi_\infty |_{\varphi_i=\frac{\pi}{2}-\frac{\Delta\varphi}{2}} \approx 1 - \frac{(\Delta\varphi)^2}{8} - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G}. \quad (2.18)$$

Перейдем теперь от синусов асимптотических фаз к значениям самих фаз. Заметим, что $\varphi_\infty < \varphi_i$ для всех инжектируемых и захваченных в ускорение частиц, так как при движении в поле бегущей волны с $v_p = c$ фаза частицы всегда уменьшается. Тогда по значению синуса фаза находится однозначно. В предположении малой фазовой длительности инжектируемого пучка для (2.18) можно записать

$$\varphi_{\infty} \Big|_{\varphi_i = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}} \approx \arcsin \left(1 - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G} \right) - \frac{\frac{(\Delta\varphi)^2}{8}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G} \right)^2}}. \quad (2.19)$$

Таким образом, с учетом разности фаз, найденных с помощью (2.16) и (2.19), фазовая длительность ускоренного пучка будет составлять

$$\Delta\varphi_f = \frac{\frac{(\Delta\varphi)^2}{8}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{2\pi\gamma_i(1-\beta_i)}{G} \right)^2}}. \quad (2.20)$$

Заметим, что группировка пучка, инжектированного с малой энергией в ускоряющую структуру на основе диафрагмированного волновода, рассмотрена в [31]. Однако там обсуждается режим, когда все частицы лежат по одну сторону от фазы $\pi/2$. В этом случае отсутствует дополнительный фактор группировки, который имеет место в случае инжекции пучка симметрично относительно фазы $\pi/2$. Также там рассмотрен частный случай амплитуды поля, при котором центральная частица пучка асимптотически приходит в нулевую фазу волны, в то время как выражение (2.20) позволяет оценить длительности ускоренного пучка в поле произвольной амплитуды.

Помимо начальной длительности сгустка, конечная фазовая длительность $\Delta\varphi_f$ зависит от энергии инжекции и амплитуды поля. Зависимость $\Delta\varphi_f$ от амплитуды поля при начальной длительности $\Delta\varphi = 30^\circ$ для разных энергий инжекции показана на рисунке 2.8.

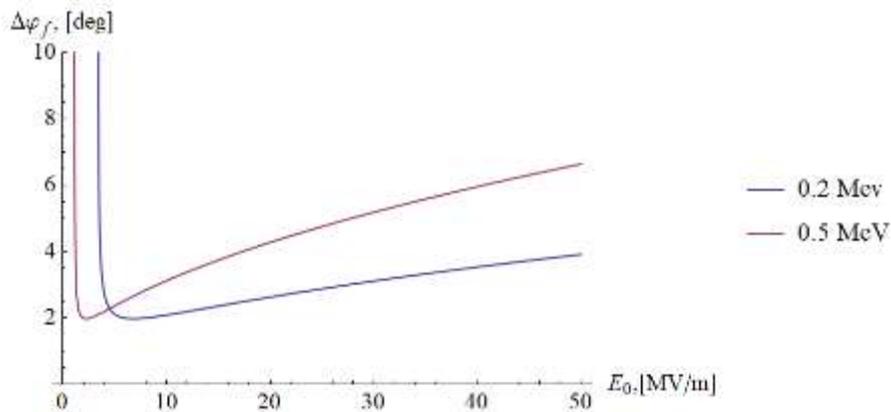


Рисунок 2.8 - Зависимость фазовой длительности ускоренного пучка от амплитуды поля при начальной длительности $\Delta\varphi = 30^\circ$

Как следует из рисунка 2.8, существует амплитуда поля, при которой достигается минимальная длительность ускоренного пучка

$$\Delta\varphi_f = \frac{(\Delta\varphi)^2}{8}, \quad (2.21)$$

соответствующая условию

$$G = 2\pi\gamma_i(1 - \beta_i). \quad (2.22)$$

Используя определение G , выражение (2.22) позволяет получить зависимость амплитуды ускоряющего поля от начальной энергии инжекции (рисунок 2.9), которая показывает, что для достижения минимального продольного размера ускоренного пучка амплитуда поля должна по мере роста начальной энергии значительно уменьшаться.

Проведенный анализ показывает, что для регулярного ускорения с высоким темпом в линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ» целесообразно иметь пучок на входе в регулярную структуру с энергией в несколько МэВ. Будем считать оптимальным значение около 3 МэВ. Такую энергию не сложно приобрести на короткой дистанции при относительно малой входной мощности ускоряющего СВЧ поля. В этом случае, согласно рисунку 2.6, область захвата в режим ускорения значительно расширяется по сравнению с низкими энергиями (рисунок 2.1). При этом использовать большие амплитуды ускоряющего поля не выглядит целесообразным, поскольку это приводит к уменьшению диапазона возможных фаз инжекции, что следует из рисунка 2.6, а также к ограничению на группировку пучка согласно рисунку 2.8. Оптимальной амплитудой ускоряющего поля выглядит значение в районе 20 МВ/м. С одной стороны, это значение не критично с точки зрения пробойной прочности, с другой – оно позволяет иметь достаточно широкий диапазон фаз инжекции пучка.

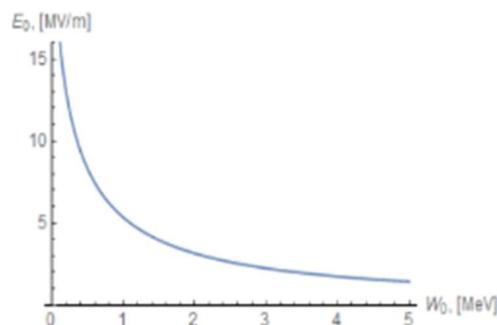


Рисунок 2.9 - Зависимость амплитуды электрического поля от энергии инжекции для достижения минимального размера ускоренного пучка при инжекции в районе фазы 90^0

Согласно требованию на энергетический разброс ускоренного пучка $\leq 1\%$, заключаем, что фазовая длительность пучка должна быть около 5.7^0 (даются среднеквадратичные значения длительности, если не указано другое).

На рисунке 2.10 показан график зависимости продольного размера сгруппированного пучка от размера инжектируемого пучка при разных энергиях инжекции и амплитуды ускоряющего поля согласно (2.20). Из кривой 1 следует, что для достижения размера 5.7^0 в структуре с амплитудой поля 20 МВ/м и начальной энергией 3 МэВ, инжектируемый пучок в регулярную ускоряющую структуру с рабочей частотой 2856 МГц должен иметь длительность в районе 10^0 (9.7 пс или 3 мм).

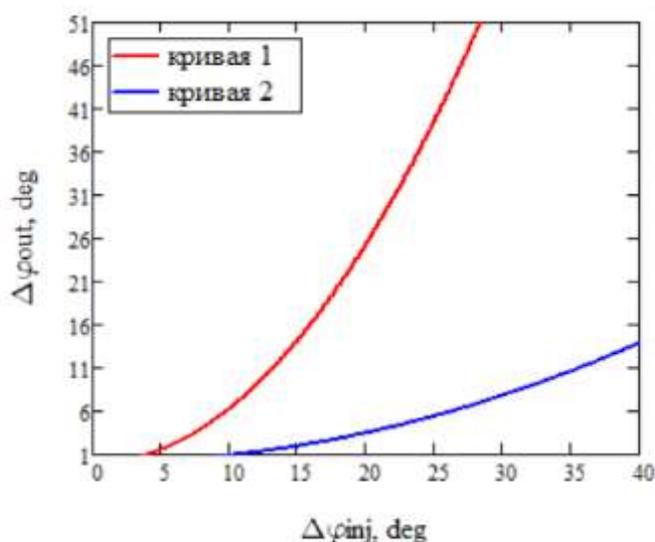


Рисунок 2.10 – Зависимость продольного размера сгруппированного пучка от размера инжектируемого пучка: 1 – начальная энергия 3 МэВ, амплитуда поля 20 МВ/м; 2 - начальная энергия 0.7 МэВ, амплитуда поля 10 МВ/м

Поскольку источник электронов (ВЧ-пушка с выходной энергией около 0.7 МэВ) такие параметры не обеспечивает, используется дополнительная система группировки и предускорения. Для такой структуры с амплитудой ускоряющего поля 10 МВ/м согласно рисунку 2.1 имеется достаточный диапазон начальных фаз для захвата пучка в режим ускорения (более 100^0), а из кривой 2 рисунка 2.10 следует, что при выбранной амплитуде поля и начальной энергии пучка для получения размера ускоренного пучка $\approx 10^0$, входной пучок может иметь длительность 34^0 (33 пс). Энергия пучка после пушки позволяет (~ 0.7 МэВ), с одной стороны,

эффективно группировать пучок, с другой – она уже достаточна, чтобы использовать в качестве предускорителя структуру на бегущей волне с постоянной фазовой скоростью. В связи с этим при размещении между пушкой и предускорителем системы группировки, уменьшающей длину пучка на порядок, начальный пучок может иметь размер более 300 пс, что выглядит осуществимым при использовании в качестве источника электронов ВЧ пушки с частотой в 1/16 от частоты регулярных ускоряющих структур и предускорителя-группирователя (2856 МГц) с сеточным управлением тока пучка (см. Главу 1 раздел 1.3).

Таким образом, для захвата пучка в режим ускорения можно использовать первую регулярную ускоряющую структуру с амплитудой ускоряющего поля около 20 МВ/м. Перед ней размещается преускоритель-группирователь, выполненный на основе ускоряющей структуры на бегущей волне с постоянной фазовой скоростью аналогично регулярной структуре. Амплитуда поля в предускорителе должна быть ≈ 10 МВ/м. Между источником электронов и предускорителем-группирователем расположена система группировки с пространством дрейфа, на выходе которой пучок должен иметь фазовую протяженность в районе 34^0 . Выбранные амплитуды полей не критические и не приводят к перенапряжениям, что облегчает процесс тренировки и выхода на рабочий режим.

2.2 Источник электронов и канал группировки

Как уже упоминалось в разделе 1.3, источником электронов служит высокочастотная электронная пушка, которая работает на 1/16 частоты регулярных ускоряющих структур 178.5 МГц. Электроны эмитируются диспенсерным катодом с сеточным управлением, являющимся аналогом катодно-сеточного узла СВЧ-триода ГС-34 [19], показанным на рисунке 1.7.

Схема управления током пучка следующая. Сетка катода заземлена; на катод подается постоянное положительное напряжение смещения в несколько десятков вольт, которое полностью запирает катод и не позволяет электронам эмитироваться под действием переменного ускоряющего напряжения в резонаторе пушки. Катод отпирается отрицательным импульсом от модулятора напряжением до -150 В и длительностью на полувысоте ≈ 1 нс. Отпирающим импульсом можно управлять независимо от ускоряющего переменного поля, выставляя индивидуальную задержку (фазу). Модулятор обеспечивает последовательность импульсов с частотой от 0 до 178.5 МГц. Амплитуда отпирающего напряжения модулятора и постоянное напряжение смещения обеспечивают ток эмиссии, а частота и время запуска

отпирающего напряжения – фазу инжекции по отношению к ускоряющему полю ВЧ-пушки. Подобная система создавалась ранее для Новосибирского лазера на свободных электронах [32].

Особенностью катодно-сеточного узла ГС-34 является паркетная сетка, расположенная на расстоянии 80-100 мкм от поверхности катода. Вид сетки и характерные размеры приведены на рисунке 2.11 слева. Такая конструкция трудна для моделирования динамики частиц, поскольку не является аксиально-симметричной. Поэтому была разработана модель резонатора с катодно-сеточным узлом, которая приведена на рисунке 2.11 справа, при этом сетка осталась паркетной. Для изучения полей в зазоре катод-сетка, а также полей в резонаторе ВЧ-пушки, использовался программный пакет CST-Studio [33]. Целью расчета было получение карты 3D полей в резонаторе, а также полей, проникающих за сетку на катод. Электродинамические параметры, полученные при моделировании ВЧ пушки, приведены в таблице 1.3.

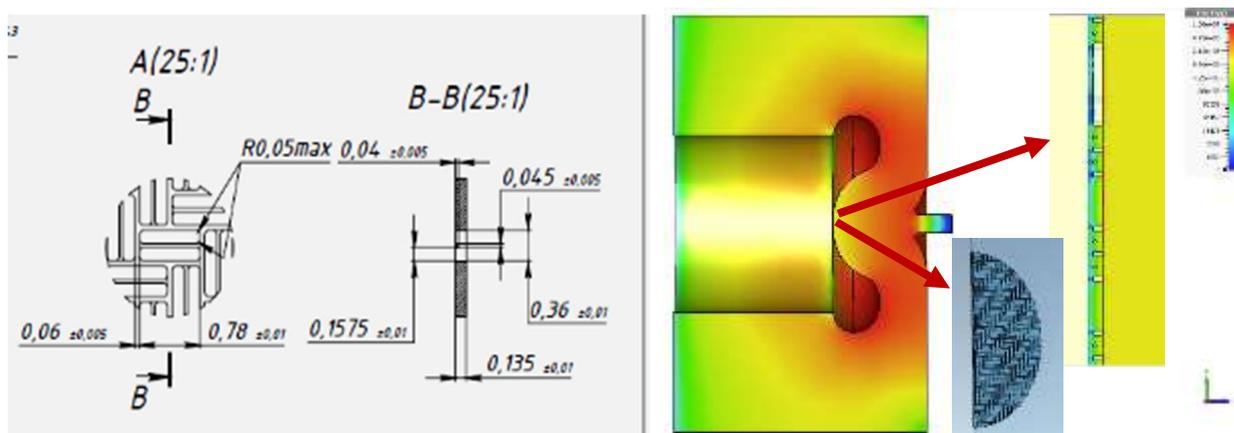


Рисунок 2.11 - Слева – вид и размеры паркетной сетки катодного узла ГС-34. Справа – модель резонатора ВЧ пушки с катодно-сеточным узлом для расчета в CST-Studio

Моделирование динамики частиц во всем линейном ускорителе методом particle-in-cell в CST-Studio длительно и ресурсоемко. Поэтому мы использовали код ASTRA [34], который хорошо себя зарекомендовал во многих проектах. Одним из его преимуществ является возможность моделирования с учетом эмиссии катода. Для этих целей 3D поля, полученные в ВЧ пушке с учетом катодно-сеточного узла, были экспортированы в код ASTRA. Недостатком кода ASTRA является невозможность использования образа реальной паркетной сетки, а только колец или поперечных перемычек. Для понимания, насколько достаточно такого представления, были проделаны дополнительные исследования по эквивалентности сетки в коде ASTRA с

реальной паркетной сеткой. Критериями эквивалентности были: прозрачность, проникающее поле за катод, выходные поперечные импульсы. В итоге была выбрана кольцевая сетка с поперечными перемычками, показанная на рисунке 2.12. Эта сетка наиболее отвечает всем необходимым требованиям и может быть использована в коде ASTRA.

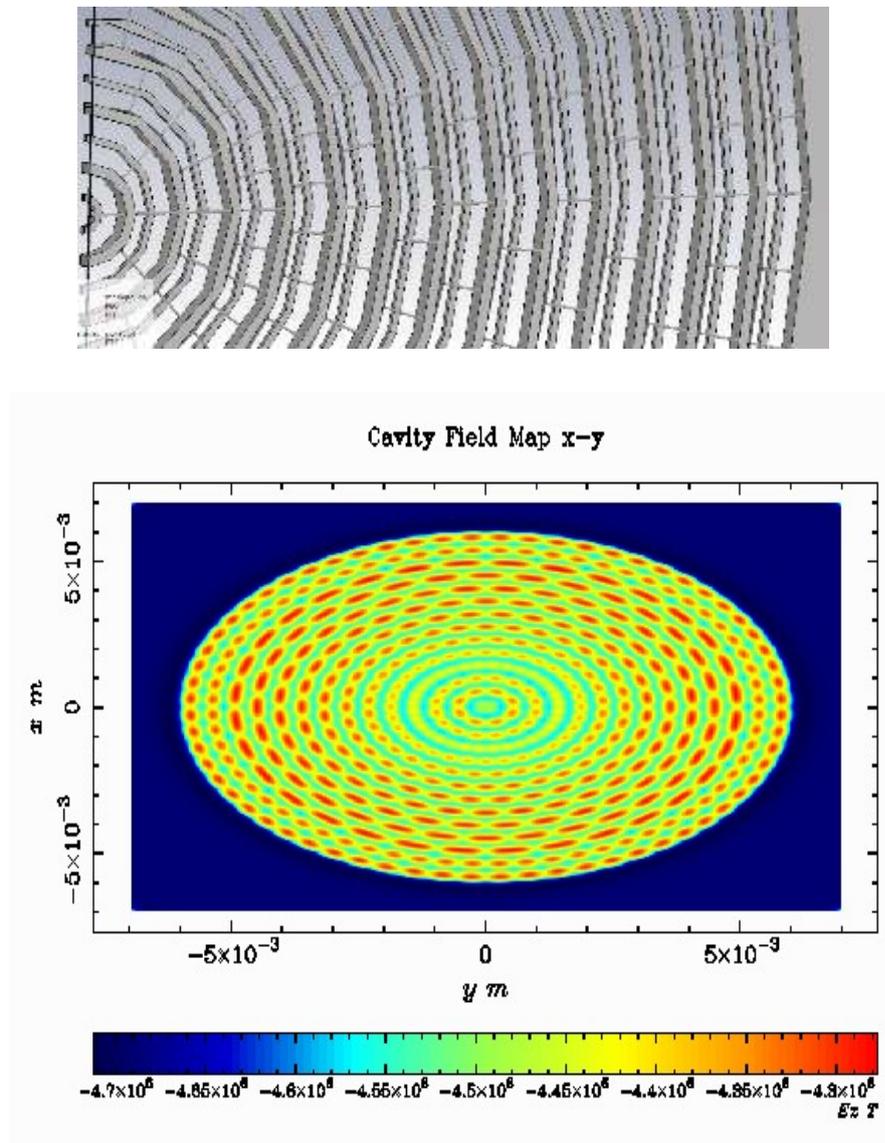


Рисунок 2.12 - Эквивалентная прикатодная сетка для расчета динамики частиц в коде ASTRA: сверху – 3D модель; снизу – карта электрического поля в коде ASTRA

В итоге расчеты динамики пучка в ВЧ-пушке с частотой 178.5 МГц были проведены кодом ASTRA. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.13 [20].

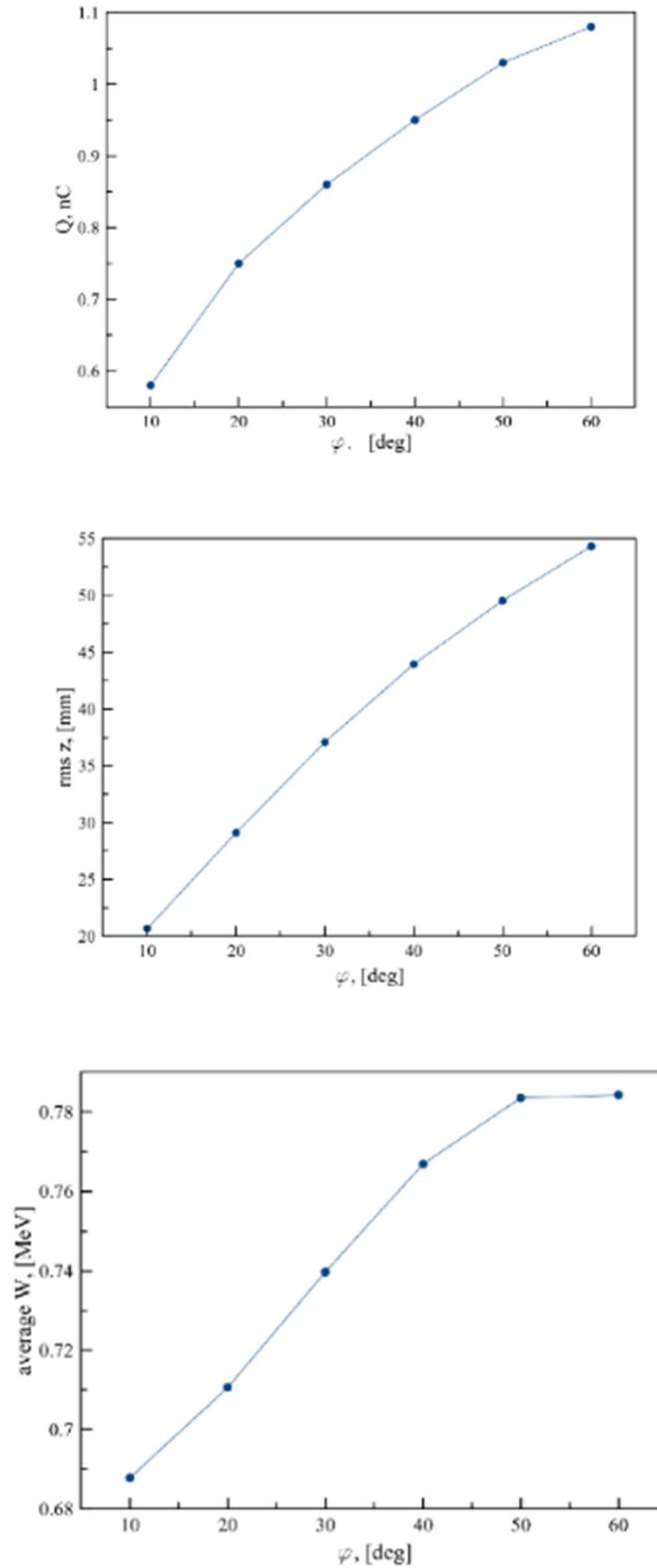


Рисунок 2.13 - Расчетные параметры пучка на выходе ВЧ-пушки при фиксированной амплитуде напряженности поля 13 МВ/м в зависимости от фазы, сверху-вниз: извлекаемый заряд, среднеквадратичная длина пучка, средняя энергия

Из графиков видно, что средняя энергия пучка из пушки получается около $0.7 \div 0.8$ МэВ. Извлекаемый заряд близок к 1 нКл при фазах инжекции $40 \div 50^\circ$ и напряженности поля 13 МВ/м. При увеличении фазы инжекции возрастает не только заряд извлекаемого пучка, но и его продольный размер, что сказывается на степени группировки пучка и результирующем энергетическом разбросе. Можно поднять заряд при фиксированной фазе, увеличив амплитуду ускоряющего поля. С учетом коэффициента перенапряженности 1.8 увеличение амплитуды поля до 15 МВ/м не выглядит проблематичным с точки зрения ВЧ пробоев. Для заряда 0.3 нКл, характерного для основного режима инжектора, никаких ограничений при моделировании не обнаружено.

На рисунке 2.14 показаны примеры поперечных фазовых портретов сгустков с зарядами 1 нКл и 0.3 нКл соответственно на выходе ВЧ пушки, полученные с помощью кода ASTRA. Выходной нормализованный эмиттанс составил 23 мм мрад и 17 мм мрад для 1 нКл и 0.3 нКл соответственно.

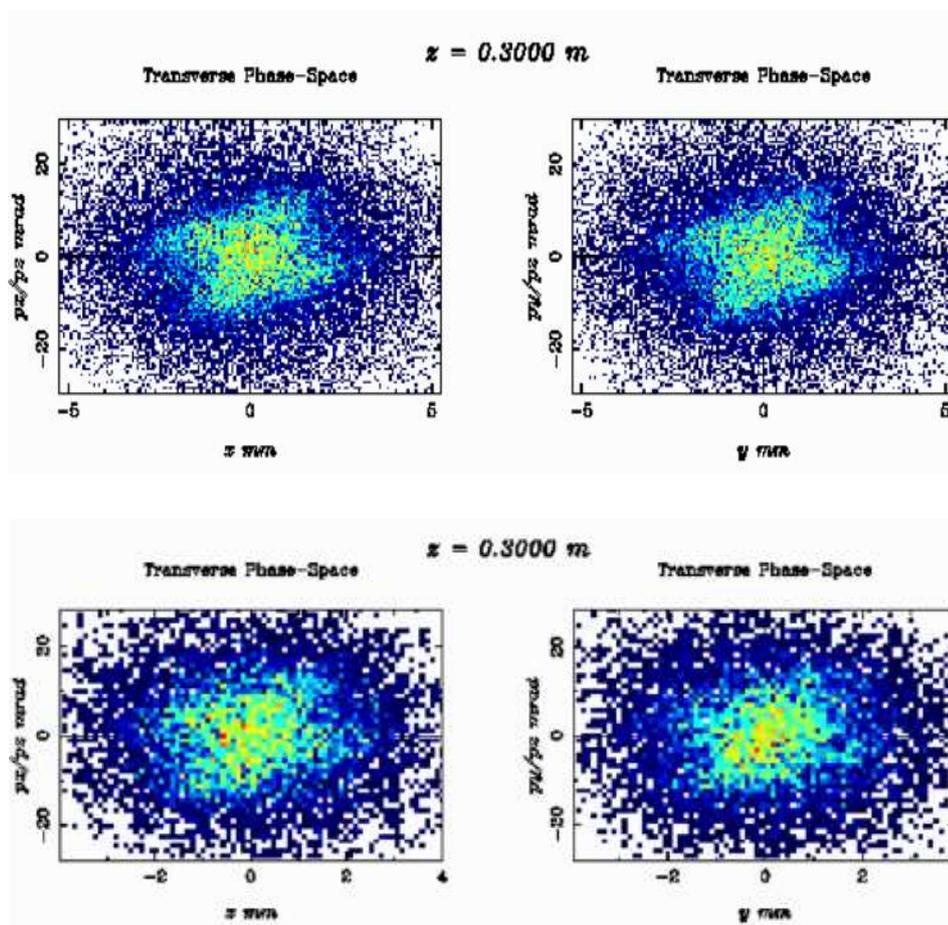


Рисунок 2.14 - Поперечные фазовые профили сгустка с зарядом 1 нКл (слева) и 0.3 нКл (справа). Нормализованный выходной эмиттанс в 23 мм мрад и 17 мм мрад соответственно

Из рисунка 2.13 следует, что после пушки характерная длина пучка составляет около 40 мм, что, с учетом энергии 0.7 МэВ, соответствует 147 пс. С точки зрения регулярной ускоряющей структуры с частотой 2856 МГц такая длительность равна фазовой протяженности 151° . Из раздела 2.1 следует, что перед предускорителем-группирователем пучок должен иметь фазовую протяженность в районе 34° . Таким образом, после ВЧ пушки пучок необходимо сгруппировать в продольном направлении минимум в 5 раз. С учетом того, что приводится среднеквадратичное значение длины пучка после пушки, коэффициент группировки необходим >5 . Степень группировки в 10 раз выглядит оправданной и достижимой.

Фаза инжекции пучка в ВЧ-пушке (около $40^\circ - 50^\circ$) обеспечивает продольную группировку уже в самой пушке. Далее необходим промежуток дрейфа длиной около 2.5 м, чтобы скоростная модуляция частиц перешла в модуляцию плотности. Для линейаризации продольных группирующих сил используется промежуточный резонатор третьей гармоники. Фокусировка пучка осуществляется соленоидами. Поскольку участок предускорения и группировки очень ответственный и важный для достижения параметров линейного ускорителя, здесь расположены устройства диагностики пучка как по поперечным, так и по продольной координатам. Схематичный вид источника электронов и системы группировки представлен на рисунке 1.8. Вид и расчетные параметры группирователя третьей гармоники показаны на рисунке 1.9.

2.3 Ускоряющие структуры

Круглый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом, выбранный для ускоряющей структуры (УС), ранее изготавливался в ИЯФ СО РАН и используется в линейном ускорителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 [21, 35]. Отличие ускоряющей структуры инжектора ЦКП «СКИФ» состоит в рабочей частоте 2856 МГц, в то время как в инжекционном комплексе ВЭПП-5 – 2855.5 МГц. Несмотря на небольшое отличие, для изготовления структуры разница в 0.5 МГц существенна из-за высокой добротности изделия.

На рисунке 2.15 приведена 3D модель ускоряющей структуры. Параметры ее приведены в таблице 2.1.

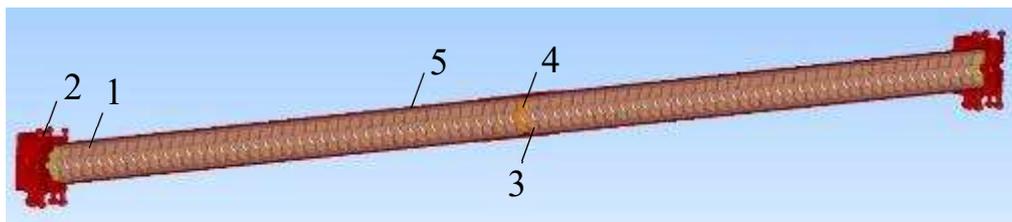


Рисунок 2.15 - Ускоряющая структура типа диафрагмированный волновод: 1 – регулярная ускоряющая ячейка, 2 – трансформатор типа волны, 3–переходная (соединительная) ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения

Таблица 2.1 - Параметры регулярной УС

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний (сдвиг фазы поля на ячейку)	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.3 \cdot 10^4$
Период	34.98 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.75 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Длина	2.93 м
Фазовая скорость	1с
Групповая скорость	0.021с
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания по полю	0.108 м^{-1}
Время заполнения структуры	0.456 мкс

Мощность, которая распространяется вдоль структуры, и электрическое поле можно получить с помощью выражений [36]

$$P(z) = P_0 e^{-2\alpha z}, \quad (2.23)$$

$$E(z) = E_0 e^{-\alpha z}. \quad (2.24)$$

Энергия, которую наберет частица

$$W(z) = \int_0^z E(z) dz = \frac{E_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha z}). \quad (2.25)$$

В выражениях (2.23 – 2.25) используются следующие обозначения: 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. На рисунке 2.16 представлено расчетное распределение напряженности электрического поля (2.24) вдоль ускоряющей структуры при входной ВЧ-мощности 25 МВт и 40 МВт.

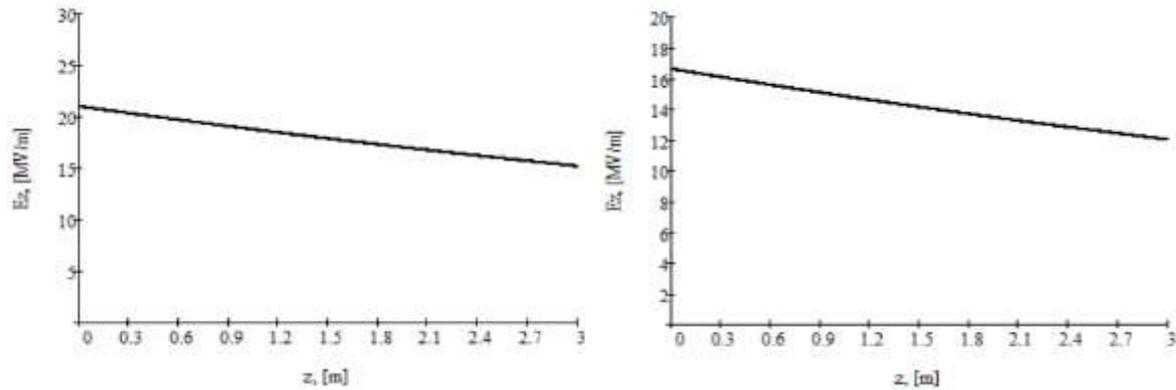


Рисунок 2.16 - Распределения электрического поля вдоль ускоряющей структуры для входной мощности 40 МВт (слева) и 25 МВт

Согласно (2.25) набираемая энергия будет равна 42 МэВ и 53 МэВ соответственно при входной мощности 25 МВт и 40 МВт. Если использовать в качестве источника ВЧ мощности 3 клистрона по 50 МВт каждый и 5 ускоряющих структур, одна из которых работает при 40 МВт входной мощности, а четыре при 25 МВт, то суммарная энергия пучка будет 221 МэВ. В этом случае каждый из двух клистронов делит мощность между двумя ускоряющими структура. Первый клистрон питает первую регулярную ускоряющую структуру мощностью 40 МВт, а 10 МВт ответвляются в предускоритель-группирователь. Согласно рисунку 2.6 полученные амплитуды полей в ускоряющих структурах обеспечивают захват пучка в режим ускорения в достаточно большом диапазоне фаз. При этом данные амплитуды полей являются комфортными с точки зрения СВЧ-пробоев, что должно облегчить режим тренировки.

В качестве предускорителя-группирователя, как упоминалось выше, можно использовать структуру на основе диафрагмированного волновода с определенной амплитудой ускоряющего поля. На рисунке 2.17 слева показана такая структура длиной 350 мм, которая представляет собой уменьшенную копию регулярной ускоряющей структуры. Распределение

поля показано на рисунке 2.17 справа. При входной мощности 10 МВт амплитуда поля ≈ 10 МВ/м, что и требуется для захвата пучка и его группировки согласно параграфу 2.1.

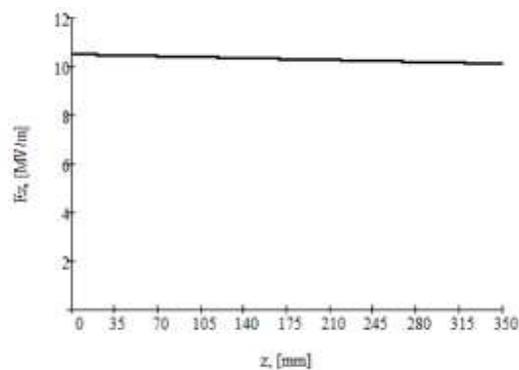
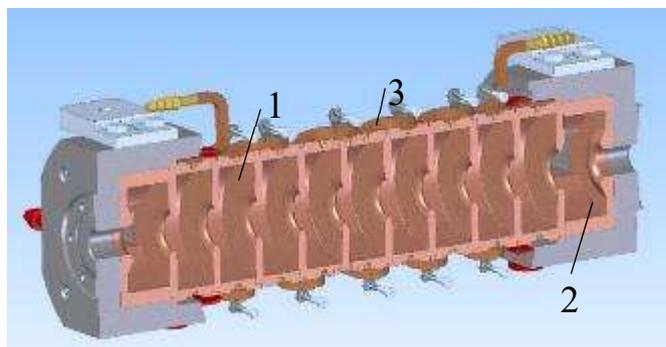


Рисунок 2.17 - Структура предускорителя-группирователя (слева); распределение электрического поля вдоль структуры при входной мощности 10 МВт (справа)

2.4 Моделирование динамики частиц в линейном ускорителе

Для моделирования динамики частиц разработана более подробная схема линейного ускорителя [20]. Его 3D модель изображена на рисунке 1.5, а описание отдельных систем приводится в Главе 1. На рисунке 1.8 показан канал группировки и предускорения, а на рисунке 1.11 - часть с регулярными ускоряющими структурами. Поперечная динамика пучка обеспечивается соленоидами в канале группировки и предускорения и квадрупольными линзами при регулярном ускорении.

Моделирование динамики пучка в линейном ускорителе проводилось с помощью программы ASTRA [34]. В качестве начальных данных принимались параметры пучка на выходе ВЧ пушки, показанные на рисунке 2.14. При моделировании с учетом реальной апертуры потери частиц отсутствовали. Поперечный размер пучка в линейном ускорителе показан на рисунке 2.18. Распределение частиц в продольном фазовом пространстве показано на рисунке 2.19, а параметры приведены в таблице 2.2 [20].

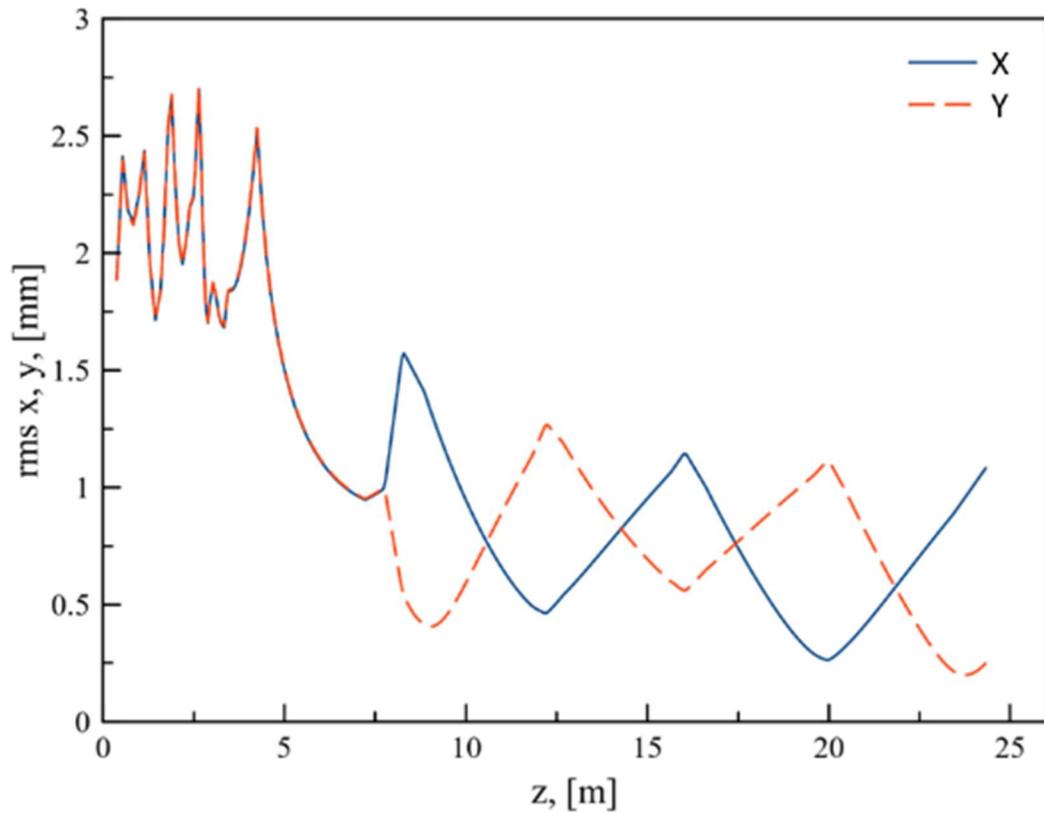


Рисунок 2.18 - Среднеквадратичные поперечные размеры пучка

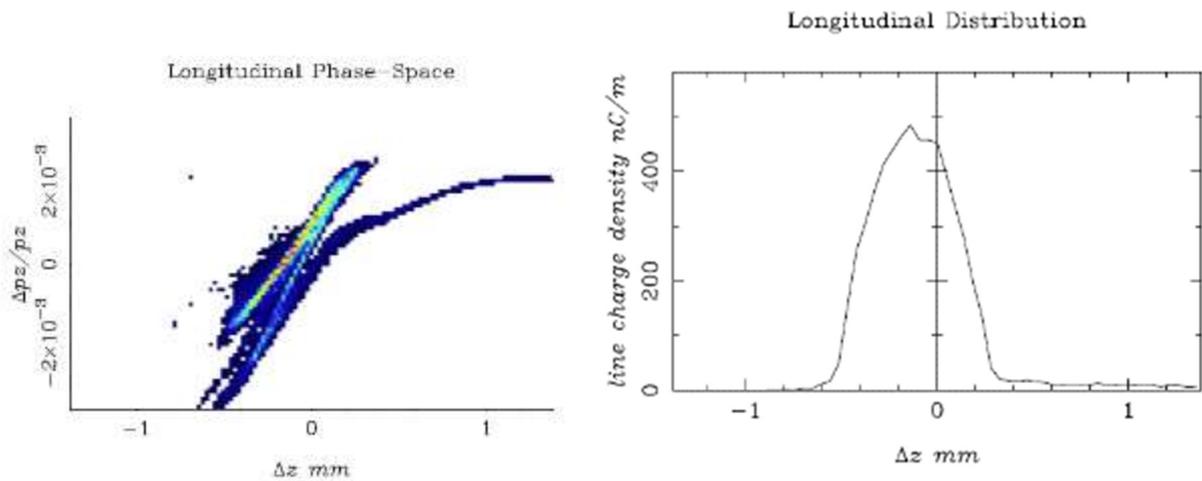


Рисунок 2.19 - Продольный профиль пучка в конце ускорителя. Слева – продольная фазовая плоскость, справа – продольное распределение плотности заряда

Таблица 2.2 - Параметры пучка в конце линейного ускорителя

Параметры	Значение
Энергия	200 МэВ
Энергетический разброс в одиночном сгустке (RMS)	0.3 %
Горизонтальный эмиттанс	50 нм
Заряд пучка в одиночном сгустке	0.3 нКл
Энергетический разброс в последовательности 55 сгустков	2.5%

Как видно из рисунка 2.18, среднеквадратичный поперечный размер пучка не превышает 3 мм и составляет менее 1.5 мм в регулярной части ускорения; среднеквадратичная длина пучка после группировки составляет около 0.6 мм [20].

ASTRA не позволяет учесть нагрузку ускоряющего поля током пучка, поэтому оценим этот эффект аналитически. Для стационарного случая энергию, которую приобретает пучок в структуре на основе диафрагмированного волновода с учетом тока пучка, можно записать в виде [37]

$$U = U_0 \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right), \quad (2.26)$$

где энергия без учета нагрузки током

$$U_0 = \sqrt{2P_0 R_{sh} L} \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\sqrt{\alpha L}}, \quad (2.27)$$

критический ток

$$I_c = \sqrt{\frac{2P_0 \alpha L}{R_{sh} L}} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha L - 1 + e^{-\alpha L}}, \quad (2.28)$$

Здесь приняты следующие обозначения: I_0 – ток пучка, α – коэффициент затухания по полю, P_0 – мощность генератора, L – длина структуры, R_{sh} [Ом/м] – эффективное погонное шунтовое сопротивление. Критический ток – ток, при котором происходит нулевой прирост энергии пучка, что следует из (2.26). В этом случае ускоряющее поле, определяемое мощностью генератора, полностью компенсируется полем излучения пучка. При токе выше критического значения, сам пучок становится источником излучения и теряет свою энергию при пролете через структуру.

Рассмотрим стационарный случай, когда процессы развиваются за времена, больше чем время заполнения ускоряющей структуры. Согласно таблице 2.1 для выбранной ускоряющей

структуры время заполнения составляет 0.456 мкс. С учетом этого, а также других параметров таблицы 2.1 на рисунке 2.20 показаны зависимости критического тока от входной мощности структуры, а также отношения максимального отклонения энергии, вызванного нагрузкой током пучка ускоряющего поля, к энергии электронов без учета тока пучка линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Ток пучка для последовательности сгустков электронов с зарядом 0.3 нКл в каждом, частотой следования 178.5 МГц и полной длительностью 308 нс составит $I_0 = 54$ мА. Видно, что при увеличении входной мощности энергетический разброс асимптотично уменьшается, в то время как критический ток увеличивается. Для ускоряющей структуры линейного ускорителя ЦКП «СКИФ» его значение составит $I_c = 2$ А при входной СВЧ мощности 25 МВт. При этой же мощности генератора абсолютное значение энергетического разброса, вызванного током пучка, будет равно 2.9%, что соответствует среднеквадратичному значению 0.9%.

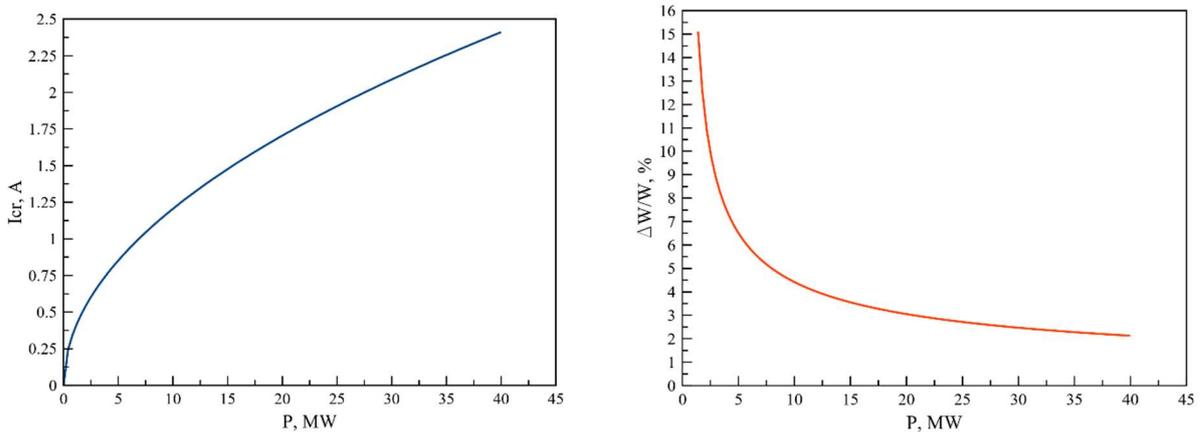


Рисунок 2.20 - Слева - зависимость критического тока, который может пролететь через ускоряющую структуру без потери энергии на излучение от входной СВЧ мощности. Справа – отношение максимального отклонения энергии, вызванного нагрузкой током пучка ускоряющего поля, к энергии электронов без учета тока пучка линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» от входной СВЧ мощности

Проделанный выше анализ не учитывает переходного процесса, связанного с самим излучением тока пучка. Более точное выражение уже в зависимости от длительности пучка имеет вид [38]:

$$\Delta U_b(\tau) = -R_{sh} L \cdot I_0 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\tau_{0A}}{T_f} \right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{0A}} \right) \right] + \frac{\tau}{T_f} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{0A}} \right) \right\}. \quad (2.29)$$

Здесь $\tau_{0A} = 2Q_{0A}/\omega_0$ – постоянная времени, Q_{0A} – собственная добротность структуры, T_f – время заполнения структуры, τ – длительность пучка. Средний ток линейного ускорителя $I_0 = 54$ мА. Тогда, согласно (2.4.4), можно построить график зависимости энергии пучка от его длительности, который для входной мощности 25 МВт показан на рисунке 2.21. Согласно уточненному графику рисунка 2.21 разброс между максимальной и минимальной энергиями составит 2.5%.

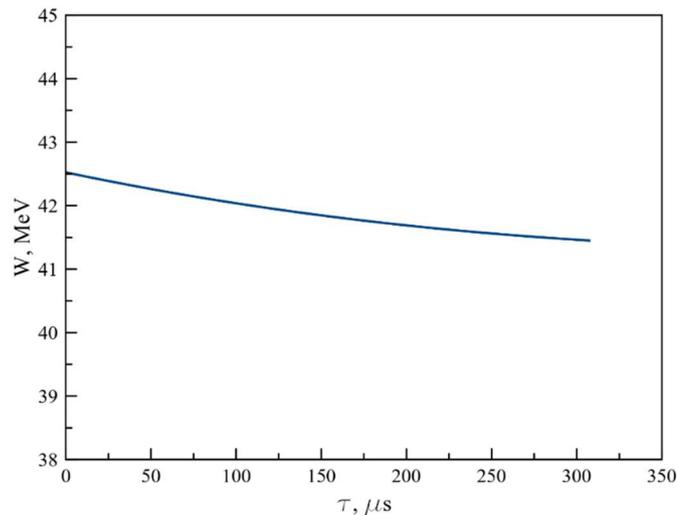


Рисунок 2.21 - Зависимость энергии в пучке от его длительности для входной СВЧ мощности 25 МВт

При рассмотрении стационарного случая, соответствующего рисунку 2.20, энергетический разброс получился немного больше, чем для случая, соответствующего рисунку 2.21. Это связано с тем, что в стационарном случае не рассматриваются процессы, связанные с установлением колебаний в структуре вследствие распространения волны. Стоит отметить, что в данном случае речь идет именно о разбросе между максимальной и минимальной энергиями, в то время, как согласно техническому заданию, линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ» должен обеспечить среднеквадратичный (rms) разброс $\leq 1\%$, что укладывается в полученный результат. Тем не менее, видно, что энергетический разброс, вызванный наличием заданного значения тока, достаточно близок к максимально допустимому значению.

Как уже упоминалось, ускоритель разделен на три части: ВЧ пушку, систему группировки и регулярные ускоряющие секции. Пучок формируется в системе группировки, где

он сжимается и ускоряется до энергии 3 МэВ. Из-за достаточно большой энергии в регулярном ускорителе ошибки выставки элементов уже практически не влияют на пучок. Система группировки перед первой ускоряющей структурой является более важной частью линейного ускорителя с точки зрения формирования свойств пучка. В связи с этим было промоделировано прохождение пучка через элементы группирующей системы с распределенными смещениями, когда элементы отклонялись от оси случайным образом, следуя нормальному распределению со стандартным отклонением 1 мм.

На рисунке 2.22 приведены некоторые огибающие пучка при наличии ошибок в выставке элементов [20]. Ошибки приводят к рассогласованию поперечного движения и потерям пучка, а также увеличению поперечного эмиттанса.

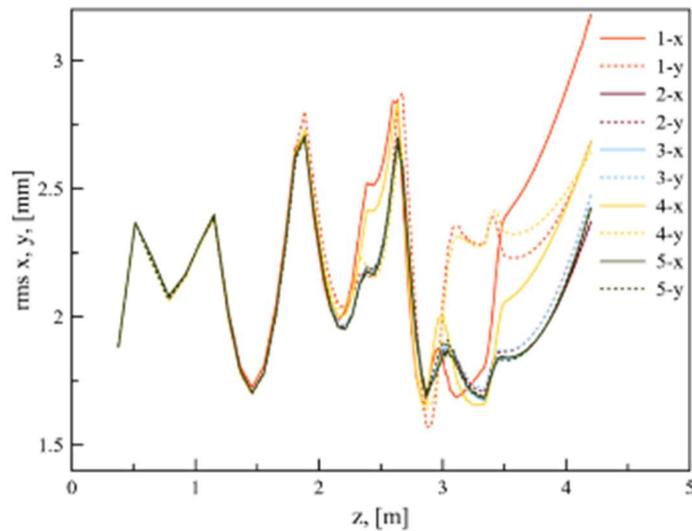


Рисунок 2.22 - Огибающая пучка при ошибках выставки элементов системы группировки: сплошные линии показывают среднеквадратичное отклонение по горизонтали, пунктирные – по вертикали

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.

На рисунке 2.23 показаны гистограммы распределения изменений горизонтального и вертикального эмиттансов, а на рисунке 2.24 – гистограммы смещения пучка от оси.

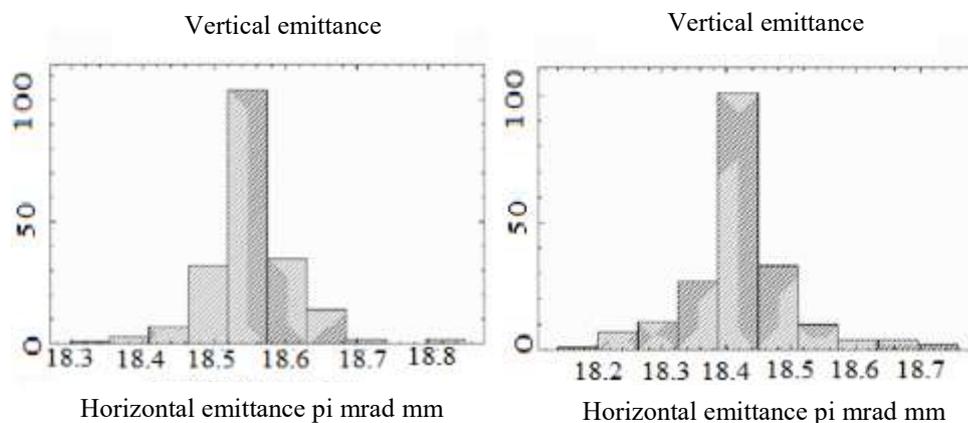


Рисунок 2.23 - Распределение величины эмиттанса в конце предускорителя-группирователя при наличии случайных ошибок в выставке элементов, подчиняющихся нормальному распределению с дисперсией 1 мм

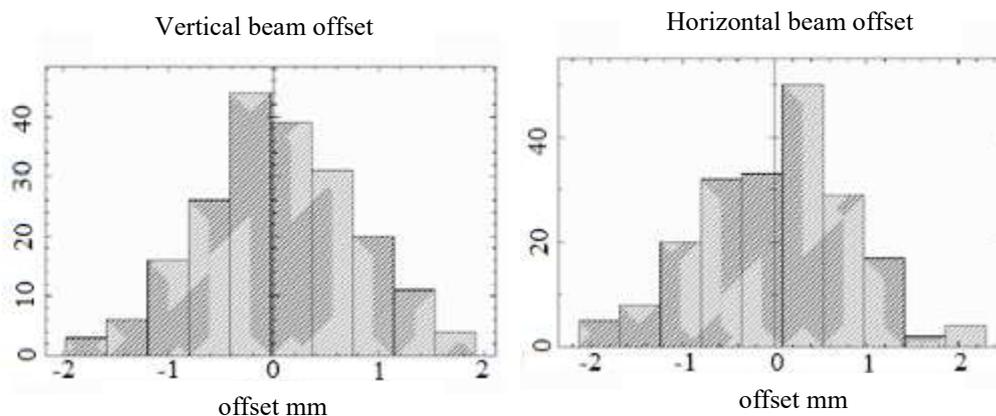


Рисунок 2.24 - Распределение смещения пучка от оси в конце предускорителя-группирователя при наличии случайных ошибок в выставке элементов, подчиняющихся нормальному распределению с дисперсией 1 мм

Для определения требований на стабильность фаз элементов систем группировки, предускорения и первой регулярной ускоряющей структуры было рассчитано изменение энергетического разброса пучка в зависимости от отклонения фазы. Результаты приведены на рисунке 2.25.

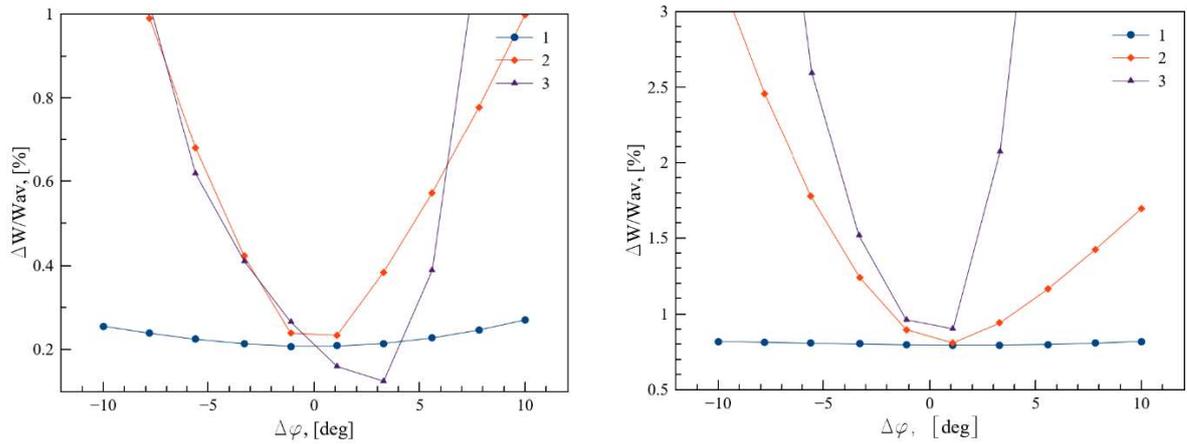


Рисунок 2.25 - Изменение энергетического разброса пучка в зависимости от фазовых отклонений для заряда 0.3 нКл (слева) и 1 нКл (справа). Обозначения графиков: 1 – первая регулярная ускоряющая структура, 2 – предускоритель-группирователь, 3 – резонатор третьей гармоники

Графики показывают, что для заряда 0.3 нКл требование на точность фазировки в первой регулярной ускоряющей структуре невысока и может достигать $\approx 20^\circ$; для предускорителя-группирователя и резонатора третьей гармоники допустима точность $\approx 10^\circ$. Для заряда 1 нКл требования на фазовую стабильность жестче: $\leq 10^\circ$ для первой регулярной структуры и $\approx 4\div 5^\circ$ для предускорителя-группирователя и резонатора третьей гармоники. Допустимый временной разброс (jitter) приведен в таблице 2.3. Абсолютная фаза резонатора третьей гармоники будет стабилизироваться генератором и термостатированием, а для структур с частотой 2856 МГц – волноводными механическими фазовращателями и так же термостатированием.

Таблица 2.3. Допуски на временную и фазовую стабильность

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	19	9.7
Минимальная величина фазовой стабильности	4.5°	

2.5 Магнитная система ускорителя

Результаты моделирования динамики частиц позволили определить места расположения и параметры магнитных элементов. Для фокусировки пучка в системе группировки и предускорения используются соленоиды, а в регулярных ускоряющих секциях – квадрупольные линзы [39]. Схема магнитной системы обсуждается в разделе 1.8 Главы 1.

На рисунке 2.26 представлена схема линейного ускорителя до второй регулярной ускоряющей структуры с обозначением магнитных элементов.

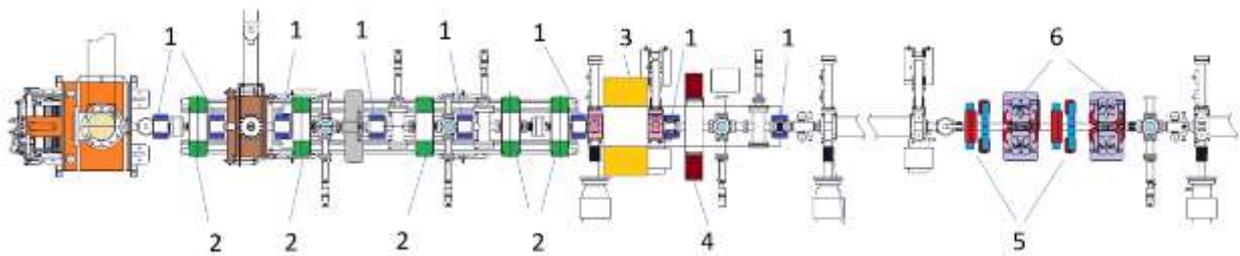


Рисунок 2.26 - Размещение магнитных элементов на начальном отрезке инжектора ЦКП «СКИФ»: 1 – рамочный корректор, 2 – соленоид секции группировки, 3 – соленоид предускорителя, 4 – согласующий соленоид, 5 – M-образный корректор, 6 – квадрупольная линза

В промежутке между ВЧ пушкой и предускорителем-группирователем расположены пять однотипных соленоидов. Поскольку в процессе группировки внутри предускорителя-группирователя пучок испытывает дефокусирующее действие СВЧ поля, эта структура помещена в сильный бронированный соленоид, состоящий из двух катушек с двумя отдельными источниками питания. Для согласования пучка после системы группировки и предускорения с первой регулярной ускоряющей структурой используется согласующий соленоид. После первой ускоряющей структуры применяются квадрупольные линзы. Причем, перед второй ускоряющей структурой стоят два квадруполя, а после – по одному между ускоряющими структурами.

В промежутке между ВЧ пушкой и первой регулярной ускоряющей структурой пучок имеет сравнительно небольшую энергию (от 0.7 до 3 МэВ). Как было указано в параграфе 2.4, именно в этом канале пучок особенно чувствителен к ошибкам выставки элементов и магнитному полю Земли. Для компенсации ошибок используются рамочные двухкоординатные

корректоры (см. рисунок 2.27). Ярмо корректора представляет собой прямоугольную раму. На каждой стороне рамы намотаны катушки с переменным шагом, что улучшает качество поля (относительная однородность в зазоре изменяется от $\sim 1.2 \cdot 10^{-2}$ до $\sim 4 \cdot 10^{-3}$).

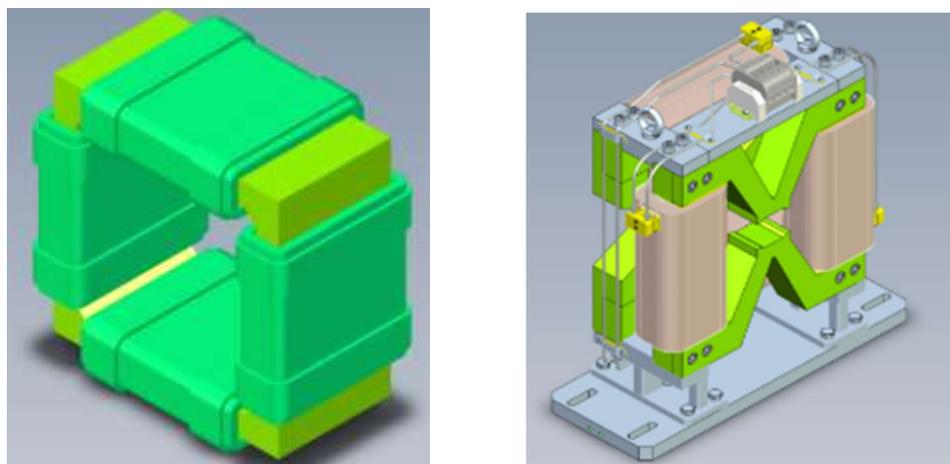


Рисунок 2.27 - Слева направо: «рамочный» корректор, «М-образный» корректор

После первой регулярной ускоряющей структуры установлены корректоры с М-образным ярмом (рисунок 2.27) с интегралом магнитного поля >4 Тл·мм. Такая конструкция позволяет, имея небольшой зазор между полюсами, обеспечить достаточное качество поля. Для коррекции по обеим координатам два таких электромагнита устанавливаются друг за другом с поворотом на 90° . В таблице 2.4 приведены расчетные параметры корректоров. Моделирование всех магнитных элементов проводилось в среде OPERA 3D [40].

Таблица 2.4 - Параметры дипольных корректоров орбиты

Тип корректора	Рамка	М
Ток максимальный (А)	3	3.75
Максимальная индукция поля в центре корректора (Тл)	$20.4 \cdot 10^{-4}$	$495 \cdot 10^{-4}$
Максимальный интеграл магнитного поля (Тл·мм)	0.29	4.69
Однородность интеграла поля в области $R=10$ мм $\Delta \int B / \int B$	$< 5 \cdot 10^{-3}$	

Ярмо соленоидов канала группировки выполнено из стали 10. Оно состоит из двух торцевых пластин, выполненных в форме шестиугольника и шести пластин, соединяющих торцевые края для замыкания магнитного яра. Выбранная в виде многогранника форма брони

линзы существенно упрощает изготовление, при этом не нарушая симметрии поля по всей апертуре вакуумной камеры. Внутри ярма располагается соленоидальная катушка. На рисунке 2.28 представлено изображение соленоида, а в таблице 2.5 приведены его параметры.

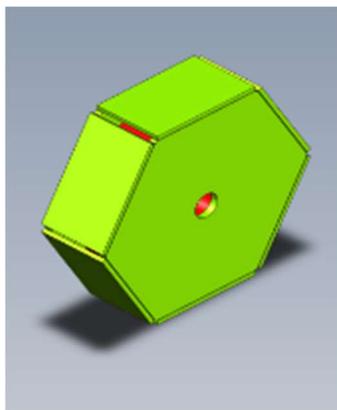


Рисунок 2.28 - Модель соленоида секции группировки

Таблица 2.5 - Параметры соленоидов секции группировки

Апертура (мм)	38
Габаритные размеры линзы (мм)	342×342×100
Максимальный ток (А)	6
Магнитное поле в центре линзы при токе 6 А (Тл)	$839 \cdot 10^{-4}$

Магнитное поле в соленоидальных линзах при токе 6 А равно $864 \cdot 10^{-4} \pm 6 \cdot 10^{-4}$ Тл. На рисунке 2.29 представлен расчетный график распределения магнитного поля на оси линзы.

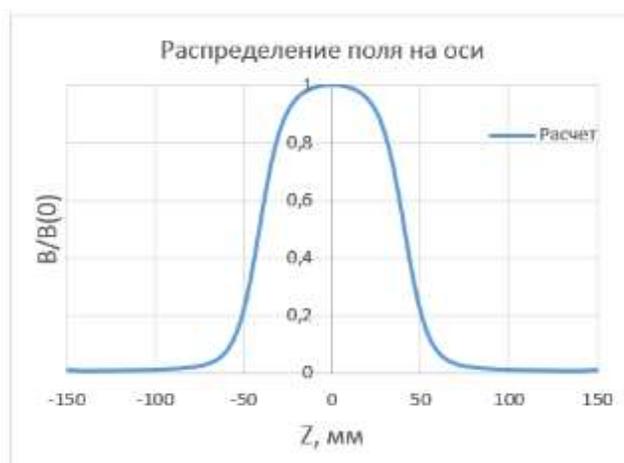


Рисунок 2.29 - Расчетное распределения поля вдоль оси соленоида секции группировки

Другим типом фокусирующего элемента является соленоид, состоящий из двух независимых обмоток, внутрь которого помещен предускоритель-группирователь. Такое решение позволяет варьировать распределение магнитного поля вдоль оси соленоида и обеспечивать более гибкую настройку параметров пучка. На рисунке 2.30 изображена модель соленоида предускорителя с подставкой, а в таблице 2.6 его параметры.

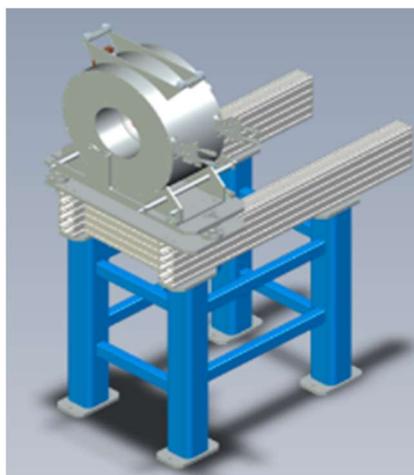


Рисунок 2.30 - Модель соленоида предускорителя

Вывод кабелей питания из бронированного сердечника соленоида нарушает симметрию поля и приводит к появлению дипольной составляющей. Добавление симметричных отверстий существенно уменьшило этот эффект (рисунок 2.31).

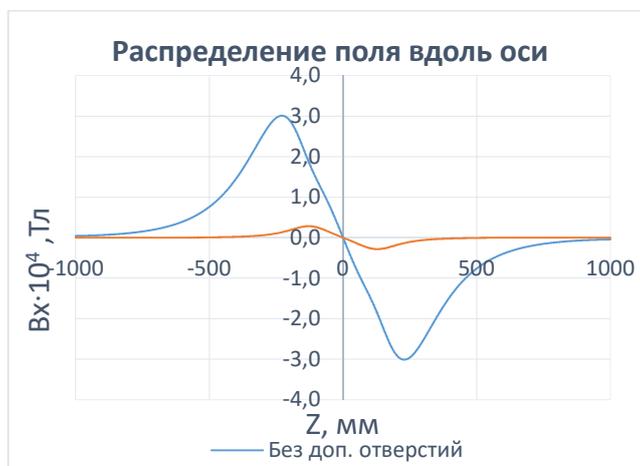


Рисунок 2.31 - Дипольное поле на оси соленоида предускорителя-группирователя до добавления симметричных отверстий и после

Таблица 2.6 - Параметры соленоида предускорителя-группирователя

Апертура (мм)	225
Габаритные размеры линзы (мм)	555×555×260
Ток максимальный (А)	200
Магнитное поле в центре линзы при включении двух соленоидов (Тл)	0.23
Эффективная длина линзы (мм)	330

Согласующий соленоид (рисунок 2.32) имеет поле в центре около 0.1 Тл при эффективной длине 90 мм. Ярмо линзы состоит из двух торцевых пластин и четырех арок круглой формы, собранных поверх соленоидальной катушки. Параметры соленоида приведены в таблице 2.7.

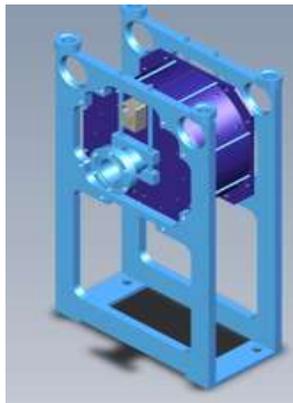


Рисунок 2.32 - Модель согласующего соленоида

Таблица 2.7 - Параметры согласующего соленоида

Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	190×190×100
Ток максимальный (А)	3
Максимальное магнитное поле в центре линзы (Тл)	0.1
Эффективная длина линзы (мм)	92

В таблице 2.8 представлены расчётные параметры квадрупольных линз. Ярмо линз должно быть изготовлено из стали 10. Для уменьшения интегральных высших гармоник, разрешенных симметрией, была проведена работа по подбору формы шиммов на полюсе линзы.

Также для подавления 6-й гармоники была выбрана фаска на торцах полюса размером 4×3.95 мм. На рисунке 2.33 показана трехмерная модель линзы и готовая линза.

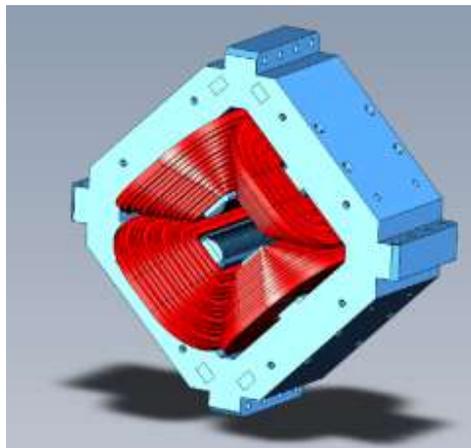


Рисунок 2.33 - Модель и изготовленная квадрупольная линза

Таблица 2.8 - Расчетные параметры квадрупольных линз

Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	310×310×200
Ток максимальный (А)	6
Интеграл градиент в центре линзы при токе 6 А (Тл)	0.62
Нормированная на основную шестая нормальная интегральная гармоника (V_6/V_2) на радиусе 15 мм	$<5.0 \cdot 10^{-4}$
Нормированная на основную десятая нормальная интегральная гармоника (V_{10}/V_2) на радиусе 15 мм	$<5.0 \cdot 10^{-4}$

2.6 Заключение к Главе 2

В Главе 2 были получены условия для оптимального захвата пучка в режим ускорения. Определены необходимые начальные параметры пучка, такие как длительность, энергия и пр. Показано, что выбранные в Главе 1 элементы ускорителя, такие как ВЧ пушка, резонатор канала группировки, предускоритель-группирователь и др., должны обеспечить захват пучка в режим ускорения с эффективностью 100%. Выбранные значения напряженностей электрических полей

в регулярных ускоряющих структурах в районе 20 МВ/м являются оптимальными с точки зрения предотвращения СВЧ пробоев, позволяя при этом достичь необходимой энергии 200 МэВ, используя 5 регулярных ускоряющих структур. Получение такой амплитуды ускоряющего поля должны обеспечить 3 клистрона с импульсной СВЧ мощностью 50 МВт каждый.

Моделирование динамики пучка ВЧ пушки с катодно-сеточным узлом и управлением током пучка с помощью модулирующего напряжения показало достижение необходимых параметров пучка: его заряда, длительности, энергетического разброса, эмиттанса. Определены основные электродинамические характеристики резонатора ВЧ пушки. Средняя энергия, которая достигается пучком в ВЧ пушке, составила около 0.7 МэВ. Такой энергии достаточно для использования последующей клистронной группировки пучка, что позволяет сократить его длительность в 10 раз, обеспечив тем самым захват пучка предускорителем-группирователем.

Расчет канала группировки позволил определить характеристики резонатора, работающего на утроенной частоте ВЧ пушки и способствующего линейаризации группирующих сил пучка. Кроме этого рассчитана магнитная система и определены параметры магнитных элементов. Проведен расчет влияния на пучок ошибок выставки элементов ускорителя, наиболее влияющих на параметры пучка. Исследована нагрузка током пучка электрического поля регулярных ускоряющих структур. Было показано, что нагрузка током пучка вызывает максимальный энергетический разброс в 2.5%, что с точки зрения rms разброса, составляет менее 1%.

В результате разработаны и получены модели всех элементов линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», пригодные для конструирования.

Глава 3. Требования на изготовление ускоряющих структур

3.1 Ошибки в ускоряющих ячейках, влияющие на рабочий вид колебания в структуре

Регулярное ускорение в линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ» происходит в структурах на основе круглого диафрагмированного волновода. Вид структуры и ее параметры приведены на рисунке 2.15 и в таблице 2.1 соответственно. Структура состоит из ускоряющих ячеек, которые вместе образуют периодическую систему. Ускоряющая ячейка показана на рисунке 3.1. Подобная структура давно и хорошо известна [21, 35, 38]. Среди основных выражений, которыми можно описать ускоряющую структуру на основе диафрагмированного волновода, являются дисперсионное выражение (3.1), выражение для нормированной на скорость света с фазовой скорости β_p (3.2) и выражение для нормированной на скорость света с групповой скорости β_{gr} (3.3):

$$\omega = \frac{\omega_{10}}{\sqrt{1+k_c \cos\theta}}, \quad (3.1)$$

$$\beta_p = \frac{\omega_{10}d}{\theta c} \frac{1}{\sqrt{1+k_c \cos\theta}}, \quad (3.2)$$

$$\beta_{gr} = k\omega_{10}d \frac{\sin\theta}{2c(1+k_c \cos\theta)^{3/2}}. \quad (3.3)$$

Здесь используются следующие обозначения: 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, который определяется по полосе структуры следующим образом

$$k_c = \frac{\omega(\theta=\pi) - \omega(\theta=0)}{\omega(\theta=\pi/2)}, \quad (3.4)$$

$\omega(\theta = \pi)$ – 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 $\pi/2$. Фазовый набег по определению равен

$$\theta = \beta d = \frac{2\pi d}{\Lambda}, \quad (3.5)$$

где Λ – длина волны в диафрагмированном волноводе.



Рисунок 3.1 - Ускоряющая ячейка диафрагмированного волновода

Конечная ускоряющая структура на основе диафрагмированного волновода имеет полосу пропускания, рассчитываемую согласно (3.1). Каждая частота ω этой полосы соответствует определенному фазовому сдвигу θ (виду колебания) на ускоряющую ячейку. От фазового сдвига θ зависят фазовая и групповая скорости волны согласно (3.2 - 3.3). При рабочем виде колебания θ_0 фазовая скорость должна быть равна скорости ускоряемых частиц. Для релятивистского пучка электронов такая скорость практически равна скорости света. Ускоряющие структуры, используемые в линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ», имеют рабочий вид колебания $\theta_0 = 2\pi/3$ (120°). С учетом периода $d = 34.98$ мм, именно при таком фазовом сдвиге достигается фазовая скорость, равная скорости света (см. таблицу 2.1). Рабочая частота $f_0 = 2856$ МГц должна соответствовать набегу фазы $\theta_0 = 2\pi/3$ согласно (3.1), то есть можно записать $f_0 = c/\lambda$, где c – скорость света в вакууме, а λ – длина волны возбуждаемой генератором. Кроме этого, от вида колебания зависит групповая скорость волны, что определяет время заполнения структуры

$$T_f = \frac{L}{c\beta_{gr}}, \quad (3.6)$$

где L – длина структуры.

Видно, что вид колебания является принципиальным для эффективной работы ускоряющей структуры. На получение рабочего вида колебания влияют множество факторов. Во-первых, если полоса структуры (3.1) выбрана неправильно, то частота 2856 МГц может не соответствовать виду колебания $\theta_0 = 2\pi/3$. Во-вторых, при изменении температуры структуры полоса меняется вследствие геометрического изменения размеров ячеек. В-третьих, на вид колебания влияют собственная частота ячеек ω_{10} , которая зависит от геометрии, и от периода d .

Рассмотрим набег фазы в структуре (3.5). Вариация набега фазы будет равна

$$\Delta\theta = \Delta\left(\frac{2\pi d}{\Lambda}\right) = \theta\left(\frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right). \quad (3.7)$$

Используя определение групповой скорости [41] $v_{gr} = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$, с учетом того, что на рабочей частоте $\omega_0 = 2\pi c/\lambda = k \cdot c$, а $\beta = 2\pi/\Lambda$, запишем:

$$\frac{v_{gr}}{c} = \beta_{gr} = \frac{1}{c} \frac{\partial\omega_0}{\partial\beta} = \frac{\partial\left(\frac{1}{\lambda}\right)}{\partial\left(\frac{1}{\Lambda}\right)} = \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\Lambda}.$$

С учетом выражения для нормированной фазовой скорости $\beta_p = \frac{v_p}{c} = \frac{\omega_0 k}{\beta\omega_0} = \frac{\Lambda}{\lambda}$ получаем

$$\beta_{gr} = \beta_p^2 \frac{\Delta\lambda}{\Delta\Lambda} \quad (3.8)$$

или [42]

$$\Delta\Lambda = \frac{\beta_p^2}{\beta_{gr}} \Delta\lambda. \quad (3.9)$$

Здесь учитывалось, что $\lambda = 2\pi/k$, где k – волновое число волны, возбуждаемой генератором, λ и $\Delta\lambda$ – длина волны в свободном пространстве и ее отклонение соответственно. Фазовая скорость такой волны равна скорости света c . Разделив (3.9) на Λ , учитывая, что $\Lambda = \beta_p\lambda$, получим:

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (3.10)$$

Длина волны в свободном пространстве по определению $\lambda = \frac{c}{f_0}$ (f_0 – частота волны генератора).

С учетом этого получаем, что

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial f_0} \Delta f = -\lambda \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Кроме этого заметим, что длина волны λ на моде колебания E_{01} пропорциональна радиусу волновода $\lambda \propto R$. Таким образом, (3.10) можно переписать

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta R}{R} = -\frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (3.11)$$

Окончательно (3.7) примет вид

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta d}{d} - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (3.12)$$

С учетом данных таблицы 2.1 можно записать [43]:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta d} = \frac{\theta_0}{d} = 3.4^0/\text{мм}. \quad (3.13)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta R} = -\theta_0 \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{1}{R} = -136^0/\text{мм}. \quad (3.14)$$

Если изменение частоты вызвано изменением температуры ΔT , тогда

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T$$

или из (3.12) получаем

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \theta_0 \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\partial f}{\partial T} \frac{1}{f_0}. \quad (3.15)$$

С учетом многократных наблюдений в качестве эмпирического выражения для коэффициента теплового расширения медных цилиндрических резонаторов S-диапазона можно принять $\frac{\partial f}{\partial T} \approx 50 \text{ кГц}/\text{C}^0$, тогда

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = 0.1^0/\text{C}^0. \quad (3.16)$$

Выражения (3.13 - 3.16) дают значения ошибки фазового сдвига. Если одна ячейка имеет ошибку изготовления, то это не обязательно приведет к существенным нарушениям в процессе ускорения пучка. Однако, если много ячеек имеют ошибки изготовления, то они могут складываться. Например, если все ускоряющие ячейки имеют отклонение периода 1 мм, то для структуры нашего линейного ускорителя (85 ячеек), суммарная ошибка будет $3.4^0 \cdot 85 = 289^0$, что является неприемлемым.

Однако, в реальности ошибки элементов периодической структуры распределены статистически и могут как накапливаться, так и компенсировать друг друга. Отдельно стоит упомянуть, что выражение (3.16) не следует воспринимать, как требование на термостатирование всей структуры. Оно, скорее, должно учитываться в процессе изготовления ячеек: если не калибровать станок при изготовлении новой ячейки, то при изменении температуры в процессе производства, ее частота будет отличаться от проектной. Выражения (3.13 - 3.16) нужны для понимания критериев отбора ячеек, которые рассмотрены ниже.

3.2 Влияние точности частоты генератора на набор энергии

Энергия частицы W с зарядом e будет изменяться согласно выражению

$$\frac{dW}{dz} = eE_z(z) \cos \varphi(z), \quad (3.17)$$

где $\varphi(z)$ - фаза заряженной частицы относительно волны [30]:

$$\frac{d\varphi}{dz} = \tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta_e} \right). \quad (3.18)$$

Здесь $E_z(z) = \sqrt{2\alpha(z)R_{sh}P_0}$ - распределение амплитуды ускоряющего поля вдоль оси ускоряющей ячейки z (2.24) [36]. Фаза частицы относительно волны зависит от параметра $\tilde{\beta}$ – эффективного волнового числа – при относительной скорости частицы β_e . Эффективное волновое число определяется длиной волны λ_0 рабочего вида колебания, относительной фазовой скоростью волны β_p , параметром затухания ускоряющего поля вдоль структуры α (для структуры с постоянным импедансом $\alpha = \text{const}$), R_{sh} - погонное шунтовое сопротивление, P_0 – мощность генератора. Интегрируя выражение (3.17), можно получить величину энергии, которую набирает частица в ускоряющей структуре длиной L :

$$W = e \int_0^L E_z(z) \cos \varphi(z) dz. \quad (3.19)$$

Вообще говоря, скорость частицы может варьироваться вдоль z . Тем не менее, для электронов справедливо приближенное равенство $\beta_e \approx 1$ уже при энергии порядка нескольких МэВ. С учетом этого эффективное волновое число становится равным

$$\tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{\beta_p} - 1 \right) \quad (3.20)$$

Если фазовая скорость волны равна скорости света, скольжения частицы относительно фазы волны не происходит. В таком случае при инжекции в максимуме поля волны частица набирает максимальную энергию. Для пучка ненулевой длительности это соответствует максимальной средней энергии, когда центр пучка инжектируется в максимуме поля волны. Если же фазовая скорость волны не равна скорости света, то частицы «скользят» по фазе волны, что приводит к уменьшению его средней энергии в процессе ускорения.

Согласно (3.5) относительная фазовая скорость равна $\beta_p = \omega / (c \cdot \beta)$, где $\beta = 2\pi / \Lambda$ – волновое число в общем виде. При рабочем виде колебания $\Lambda = \lambda_0$, что и обеспечивает

равенство фазовой скорости и скорости света. С учетом этого можем записать β_p при изменении рабочей частоты и длины волны [44]:

$$\Delta\beta_p = \frac{\Delta\omega}{c\beta} - \frac{\omega \Delta\beta}{c \beta^2} = \frac{\omega \Delta\omega}{c\beta \omega} \left(1 - \frac{\omega \Delta\beta}{\beta \Delta\omega}\right) = \beta_p \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}}\right). \quad (3.21)$$

Тогда эффективное волновое число (3.20) может быть выражено как

$$\tilde{\beta} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}}\right), \quad (3.22)$$

а при условиях $\beta_{gr} \ll 1$ и $\beta_p \approx 1$ окончательно получаем

$$\tilde{\beta} \approx -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega} \frac{1}{\beta_{gr}}. \quad (3.23)$$

Таким образом, из (3.17) можно вычислить энергию, набираемую частицей при отклонении рабочей частоты от ее проектного значения. Такая ситуация может возникнуть, например, при вариации частоты задающего генератора.

В структуре с постоянным градиентом набираемая энергия (3.19) принимает вид

$$W_{CG} = eE_0 L_{str} \frac{\sin\left(\frac{\tilde{\beta} L_{str}}{2}\right)}{\frac{\tilde{\beta} L_{str}}{2}} \cos\left(\frac{\tilde{\beta} L_{str}}{2} + \varphi_0\right), \quad (3.24)$$

а в отсутствие отстройки частоты максимальная набираемая энергия равна $W_{CG0} = eE_0 L_{str}$.

В структуре с постоянным импедансом амплитуда поля определяется выражением (2.24) [36].

$$E_z(z) = E_0 e^{-\alpha z}, \quad (3.25)$$

где E_0 - амплитуда поля в начале структуры, α - постоянная затухания поля. Тогда набираемая частицей энергия (3.19) выражается как

$$W_{CZ} = \frac{e E_0}{\alpha^2 + \tilde{\beta}^2} \left[e^{-\alpha L} (\tilde{\beta} \sin(\tilde{\beta} L + \varphi_0) - \alpha \cos(\tilde{\beta} L + \varphi_0)) + (\alpha \cos \varphi_0 - \tilde{\beta} \sin \varphi_0) \right], \quad (3.26)$$

а в случае отсутствия отстройки частоты максимальная набираемая энергия равна $W_{CZ0} = eE_0(1 - e^{-\alpha L_{str}})/\alpha$, что отображено в выражении (2.25).

На рисунке 3.2 приведена зависимость средней энергии, набираемой частицей с фазой инжекции $\varphi_0 = 0$, в обоих типах структуры - с постоянными импедансом и градиентом. Энергия

приводится нормированная на максимальное значение для случае отсутствия расстройки частоты и при начальной фазе инжекции $\varphi_0 = 0^\circ$.

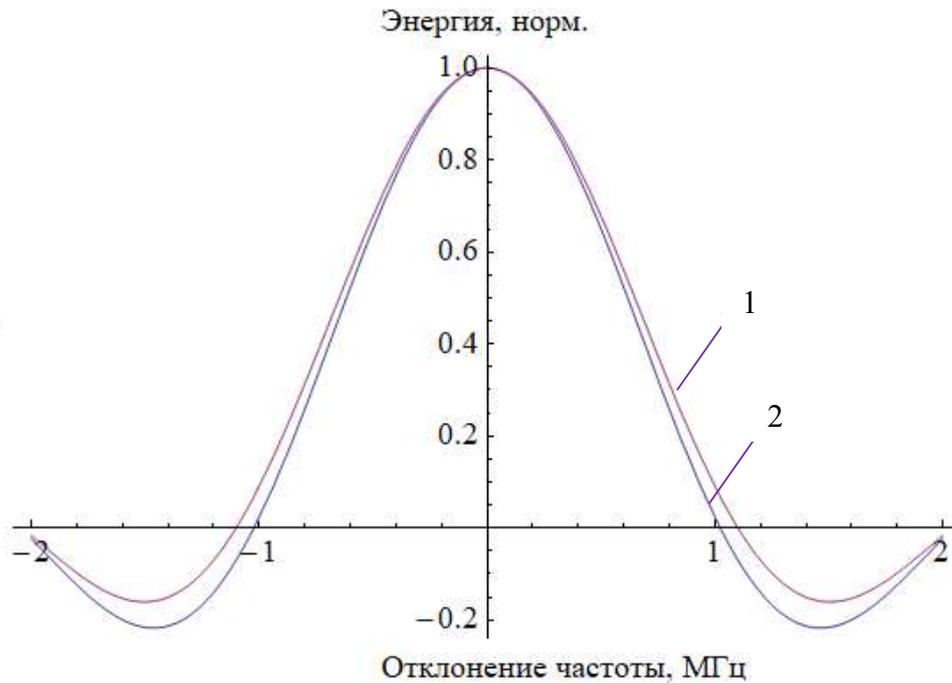


Рисунок 3.2 - Зависимость средней нормированной энергии при $\varphi_0 = 0$: 1 - в структуре с постоянным градиентом, 2 - в структуре с постоянным импедансом

Из рисунка 3.2 видно, что в обоих типах структуры отстройка частоты вносит примерно равный вклад в среднюю энергию. Так, при отклонении частоты в 0.5 МГц в структуре с постоянным градиентом средняя энергия составляет около 65% от максимального значения, а в структуре с постоянным импедансом - 68% от максимального значения.

Рассмотрим также влияние отстройки частоты при других значениях начальной фазы инжекции. На рисунке 3.3 приведена зависимость средней энергии, набираемой частицей с фазой инжекции $\varphi_0 = 20^\circ$.

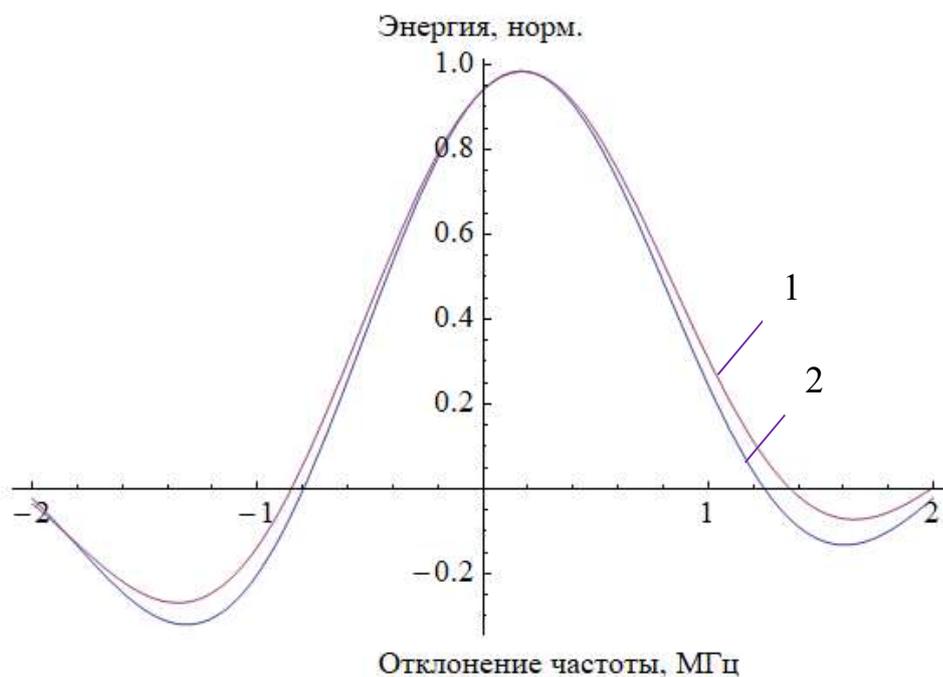


Рисунок 3.3 - Зависимость средней нормированной энергии при $\varphi_0 = 20^\circ$: 1 - в структуре с постоянным градиентом, 2 - в структуре с постоянным импедансом

Из рисунка 3.3 видно, что при отклонении фазы инжекции от нулевой средняя энергия всегда будет меньше, чем при $\varphi_0 = 0^\circ$, при этом она максимальна при наличии некоторой расстройки частоты. Для $\varphi_0 = 20^\circ$ это происходит при отклонении частоты в 0.2 МГц, а «недобор» энергии составляет около 1.5%. При $\varphi_0 = 40^\circ$ максимальная энергия набирается частицей при отклонении частоты 0.35 МГц, а «недобор» энергии составляет около 6%. Таким образом, эффект от смещения частоты генератора можно частично компенсировать выбором начальной фазы инжекции, но итоговая энергия все равно будет меньше.

3.3 Влияние ошибок набега фазы на набор энергии

Круглый диафрагмированный волновод, состоящий из периодических ускоряющих ячеек, обладает набором пространственных гармоник поля и описывается дисперсионной кривой. Для временной моды колебания имеется зависимость фазового набега волны на период от частоты, а волновое число распадается на набор чисел, каждое из которых соответствует

сдвигу фазы на период. Другими словами, зная период и волновое число n -ой пространственной гармоники β_n можно ввести понятие фазового набега вида колебания:

$$\theta_n = \beta_n d. \quad (3.27)$$

Тот вид колебания, с которым взаимодействует пучок, называется основным или рабочим видом колебания, который обозначим $\theta_0 = 2\pi d / \lambda_0$, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве (генератора), совпадающая с длиной волны диафрагмированного волновода $\lambda_0 = \Lambda$, что и обеспечивает равенство фазовой скорости волны и скорости света на рабочем виде колебания. Приведенные объяснения уже рассматривались ранее в разделах 3.1-3.2.

Рассмотрим теперь влияние погрешности набега фазы рабочей моды колебания на энергию пучка [45]. Относительную фазовую и групповую скорости в ускоряющей структуре на основе диафрагмированного волновода можно записать в виде, приведенном в (3.2) и (3.3); индексом «0» обозначены величины, соответствующие рабочему виду колебания

$$\beta_{p0} = \frac{\omega_{01} d}{\theta_0 c} \frac{1}{\sqrt{1+k\cos\theta_0}}. \quad (3.28)$$

$$\beta_{gr} = k\omega_{01} d \frac{\sin\theta_0}{2c(1+k\cos\theta_0)^{3/2}}. \quad (3.29)$$

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

$$\beta_p = \frac{\omega_0 d}{\theta_0 + \Delta\theta} \frac{1}{c\sqrt{1+k\cos(\theta_0 + \Delta\theta)}}, \quad (3.30)$$

и, приближенно,

$$\frac{1}{\beta_p} \approx \frac{\theta_0 + \Delta\theta}{\omega_0 d} c \sqrt{1+k\cos\theta_0} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{k\sin\theta_0}{1+k\cos\theta_0} \Delta\theta \right]. \quad (3.31)$$

Пренебрегая вторым порядком малости получим

$$\frac{1}{\beta_p} \approx \theta_0 \frac{\sqrt{1+k\cos\theta_0}}{\omega_0 d} c \left[1 - \frac{1}{2} \frac{k\sin\theta_0}{1+k\cos\theta_0} \Delta\theta + \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \right]. \quad (3.32)$$

С учетом (3.29) можно записать (β_{p0} – нормированная фазовая скорость при основном виде колебания θ_0)

$$\frac{1}{\beta_p} \approx \frac{1}{\beta_{p0}} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{k\sin\theta_0}{1+k\cos\theta_0} \Delta\theta + \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \right]. \quad (3.33)$$

Из (3.28 - 3.29) заметим, что

$$\frac{\beta_{gr0}}{\beta_{p0}} = \frac{\theta_0 k \sin \theta_0}{2(1+k \cos \theta_0)},$$

или

$$\frac{k \sin \theta_0}{2(1+k \cos \theta_0)} = \frac{\beta_{gr}}{\theta_0 \beta_p}. \quad (3.34)$$

Подставляя (3.33) в (3.30), запишем

$$\frac{1}{\beta_p} \approx \frac{1}{\beta_{p0}} \left[1 - \frac{\beta_{gr}}{\beta_{p0}} \frac{\Delta \theta}{\theta_0} + \frac{\Delta \theta}{\theta_0} \right]. \quad (3.35)$$

Используя (3.35) в (3.20) с учетом $\beta_e \approx 1$, получаем

$$\tilde{\beta} \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(\frac{1}{\beta_{p0}} - \frac{\beta_{gr}}{\beta_{p0}^2} \frac{\Delta \theta}{\theta_0} + \frac{\Delta \theta}{\theta_0 \beta_{p0}} - 1 \right). \quad (3.36)$$

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 [45]

$$\tilde{\beta} \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} (1 - \beta_{gr}) \frac{\Delta \theta}{\theta_0} = (1 - \beta_{gr}) \frac{\Delta \theta}{d}. \quad (3.37)$$

Заметим, что набег фазы $\Delta \theta$ может варьироваться от ячейки к ячейке, то есть, строго говоря, значение интеграла в (3.19) свое для каждой ячейки. Рассмотрим этот эффект подробнее.

Будем считать, что ускоряющая структура состоит из N периодов. Длина каждого периода d . Рабочий вид колебания θ_0 , но на каждом периоде существует фазовая ошибка $\Delta \theta_i$, где i – номер периода ячейки ($\Delta \theta_i \ll \theta_0$). С учетом выражения (3.37) в этом случае для каждого периода будет существовать свое эффективное волновое число $\tilde{\beta}_i \neq 0$. Пусть фазовая ошибка сохраняется на длине периода и изменяется скачком через период. Тогда на каждом периоде фазовая скорость волны будет постоянной.

При таких условиях рассмотрим набор энергии (3.17) на первом периоде, когда $z \in [0, d]$ (d – период структуры). Из (3.18) получим набег фазы на данном промежутке:

$$\varphi_1(z) = \int_0^z \tilde{\beta}_1 dz = \tilde{\beta}_1 z + \varphi_0, \quad z \in [0, d], \quad (3.38)$$

и энергию

$$W_1 = \int_0^d e E_1 \cos(\varphi) dz = e E_1 d \frac{\sin(\tilde{\beta}_1 d / 2)}{\tilde{\beta}_1 d / 2} \cos\left(\frac{\tilde{\beta}_1 d}{2} + \varphi_0\right), \quad z \in [0, d]. \quad (3.39)$$

Здесь φ_0 – фаза влета частицы при $z = 0$. Для следующего периода $z \in [d, 2d]$ также найдем набег фазы на данном промежутке

$$\varphi_2(z) = \int_d^z \tilde{\beta}_2 dz = \tilde{\beta}_2(z - d) + \varphi_{02}, \quad z \in [d, 2d]. \quad (3.40)$$

Здесь φ_{02} – фаза, определяемая начальными условиями при $z = d$, которую можно определить из (3.38):

$$\varphi_{02} = \tilde{\beta}_1 d + \varphi_0.$$

Подставляя данное условие в $\varphi_2(z)$, получим

$$\varphi_2(z) = \tilde{\beta}_2(z - d) + \tilde{\beta}_1 d + \varphi_0, \quad z \in [d, 2d]. \quad (3.41)$$

Энергию на этом промежутке определим из (3.19):

$$W_2 = \int_d^{2d} eE_2 \cos(\varphi_2(z)) dz = eE_2 d \frac{\sin(\tilde{\beta}_2 d/2)}{\tilde{\beta}_2 d/2} \cos\left(\frac{\tilde{\beta}_2 d}{2} + \tilde{\beta}_1 d + \varphi_0\right), \quad z \in [d, 2d]. \quad (3.42)$$

Из выражений (3.38-3.42) можно вывести общую закономерность и записать выражение набора энергии для i -го периода как

$$W_i = ed \frac{\sin(\tilde{\beta}_i d/2)}{\tilde{\beta}_i d/2} \cos\left(d \sum_1^i \tilde{\beta}_k - \frac{\tilde{\beta}_i d}{2} + \varphi_0\right). \quad (3.43)$$

Суммарная энергия, набираемая пучком частицей за N периодов, будет иметь вид

$$W_t = \sum_1^N eE_i d \frac{\sin(\tilde{\beta}_i d/2)}{\tilde{\beta}_i d/2} \cos\left(\sum_1^i \tilde{\beta}_k d - \frac{\tilde{\beta}_i d}{2} + \varphi_0\right). \quad (3.44)$$

Воспользуемся выражением (3.37) для нахождения энергии частицы, пролетевшей N периодов согласно (3.44):

$$W_t = ed \sum_{i=1}^N E_i \frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2)}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2} \cos\left([1 - \beta_{gr}] \left[\sum_{k=1}^i \Delta\theta_k - \frac{\Delta\theta_i}{2}\right] + \varphi_0\right). \quad (3.45)$$

Стоит заметить, что в (3.45) имеется начальная фаза φ_0 влета частицы в первую ускоряющую ячейку (период), которая для каждой частицы сгустка будет индивидуальной. В итоге, даже при отсутствии фазовых ошибок в (3.45) косинус не будет равен единице, а значит пучок будет обладать энергетическим разбросом, связанным с продольным размером сгустка. Если же есть фазовые ошибки, то это приведет, с одной стороны, к уменьшению набираемой энергии, с другой – к энергетическому разбросу за счет набег фазы под косинусом в (3.45).

Выражение (3.45) дано в общем виде для периодических ускоряющих структур, то есть его можно использовать как для ускоряющей структуры с постоянным импедансом ($E_i \neq const$), так и для структуры с постоянным градиентом ($E_i = E = const$). В структуре с постоянным импедансом ускоряющее поле спадает, но, с точки зрения набора энергии, можно определить значение постоянной амплитуды, интегрально равное амплитуде спадающего поля. В этом случае структуры с постоянным импедансом и градиентом становятся идентичными. Влияния остальных членов на энергию пучка в (3.45) являются одинаковыми для обеих видов структур. Другими словами, для упрощения можно было бы анализировать (3.45), полагая $E_i = const$. Однако на самом деле из-за фазовых ошибок все-таки будет происходить некоторая флуктуация амплитуд ускоряющего поля в ячейках, которая может дополнительно сказаться на энергии пучка, но не скажется на энергетическом разбросе. Тем не менее, для наглядности анализа и понимания ключевых процессов все-таки можно положить $E_i = const$. В этом случае стоит понимать, что абсолютное значение энергии может несколько отличаться от полученного результата. Однако выводы, касающиеся понимания влияния распределения фазовых ошибок на пучок, будут справедливы и при наличии флуктуаций амплитуды ускоряющего поля.

Рассмотрим выражение (3.45), нормированное на максимальную энергию $W_m = eENd$:

$$\delta W_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2)}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2} \cos\left((1-\beta_{gr}) \left[\sum_{k=1}^i \Delta\theta_k - \frac{\Delta\theta_i}{2} \right] + \varphi_0\right). \quad (3.46)$$

Для $\beta_{gr} \ll 1$ и малых ошибок $\Delta\theta_i$ имеет место приближенное равенство

$$\frac{\sin((1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2)}{(1-\beta_{gr})\Delta\theta_i/2} \approx 1.$$

Поскольку данный член в (3.46) учитывается для каждого конкретного периода, то выражение можно значительно упростить:

$$\delta W_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos\left((1-\beta_{gr}) \left[\sum_{k=1}^i \Delta\theta_k - \frac{\Delta\theta_i}{2} \right] + \varphi_0\right). \quad (3.47)$$

Для иллюстрации рассмотрим набор энергии в ускоряющей структуре линейного ускорителя ЦКП «СКИФ» (см. таблицу 2.1) 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 $\sigma_\varphi = 1.7^\circ$ ($6\sigma_\varphi = 10^\circ$), как это показано на рисунке 3.4.

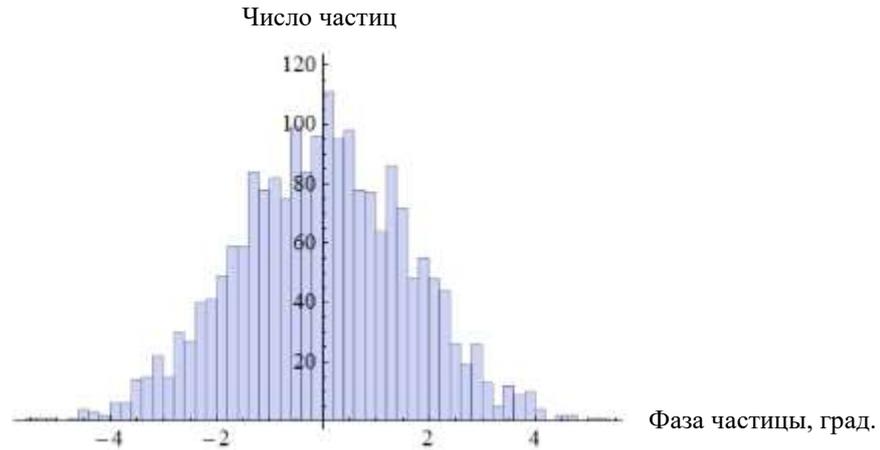


Рисунок 3.4 - Нормальное распределение частиц, инжектируемого в ускоряющую структуру с $\sigma_\varphi = 1.7^\circ$

Худшим случаем является постоянная ошибка в каждой ячейке, которая суммируется с одинаковым знаком, что приводит к скольжению частиц относительно волны. На рисунке 3.5 представлено распределение частиц на выходе одной структуры, когда ошибка является постоянной $\Delta\theta = 1^\circ$. Видно, что выходной пучок значительно сдвинут по фазе ускоряющего поля. Его средняя энергия уменьшилась по сравнению с идеальным случаем на 32%, а энергетический разброс увеличился на 2.3%.

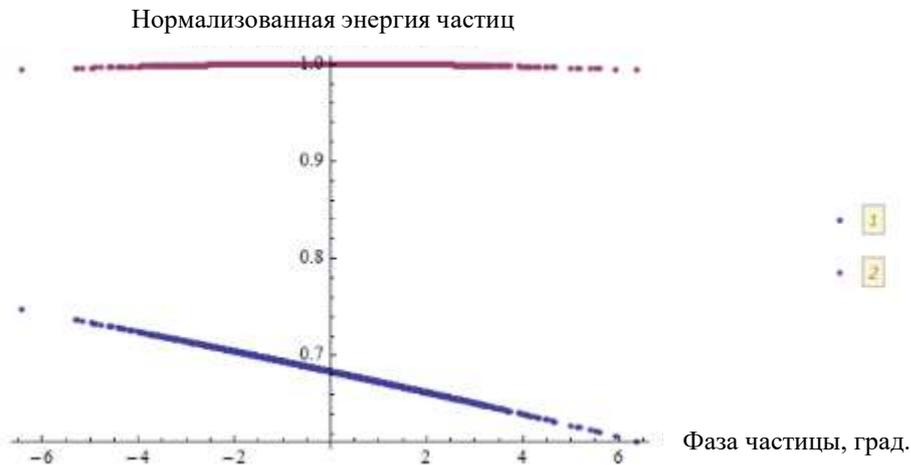


Рисунок 3.5 - Энергия частиц с нормальным распределением по фазе ($\sigma_\varphi = 1.7^\circ$) на выходе структуры из 85 ячеек: 1 – при постоянной фазовой ошибке $\Delta\theta = 1^\circ$; 2 – без ошибок

Если частица оптимально инжектируется в максимум ускоряющего поля ($\varphi_0 = 0^\circ$), но есть постоянная ошибка фазы $\Delta\theta = const$, то частица при пролете через структуру будет

скользить по фазе и может оказаться в замедляющем поле, потеряв набранную энергию. Другими словами, пролетев N периодов частица приобретет набег фазы 180° . Обратим внимание, что в (3.46) входит $\Delta\theta_i/2$ и, если мы рассматриваем ячейку $i = N$, то при пролете ее фазовая ошибка уже войдет в сумму $\sum_{k=1}^{i=N} \Delta\theta_k$. Таким образом, для нулевого прироста энергии набег фазы через N ячеек должен быть равен

$$(1 - \beta_{gr})N\Delta\theta = \pi, \text{ или } \Delta\theta = \frac{\pi}{(1 - \beta_{gr})N}. \quad (3.48)$$

Для структуры с приведенными выше параметрами фазовая ошибка, при которой набор энергии будет нулевым при пролете 85 ячеек, соответствует $\Delta\theta = 2.163^\circ$.

Случай с систематической фазовой ошибкой в структуре маловероятен: такие структуры отбраковываются на стадии измерений. Чаще всего фазовые ошибки в ускоряющих структурах распределены случайным образом и находятся в определенном диапазоне.

С учетом выражений (3.13-3.15) можно заключить, что ошибка на ускоряющую ячейку $\Delta\theta = 2.163^\circ$ может быть при (3.13) изменении периода $\Delta d = 0.6$ мм, (3.14) изменении радиуса $\Delta R = -16$ мкм.

Рассмотрим вероятность уменьшения средней энергии и увеличения энергетического разброса в пучке при наличии случайных ошибок в ускоряющих структурах. Для этих целей, воспользовавшись (3.46), рассчитаем энергетические параметры пучка с рисунка 3.4 в конце большого числа ускоряющих структур, каждая из которых имеет случайный набор ошибок в некотором диапазоне. В результате мы получим плотность относительного распределения средней энергии пучка, а также его относительный среднеквадратичный энергетический разброс, как показано на рисунках 3.6 и 3.7 соответственно.

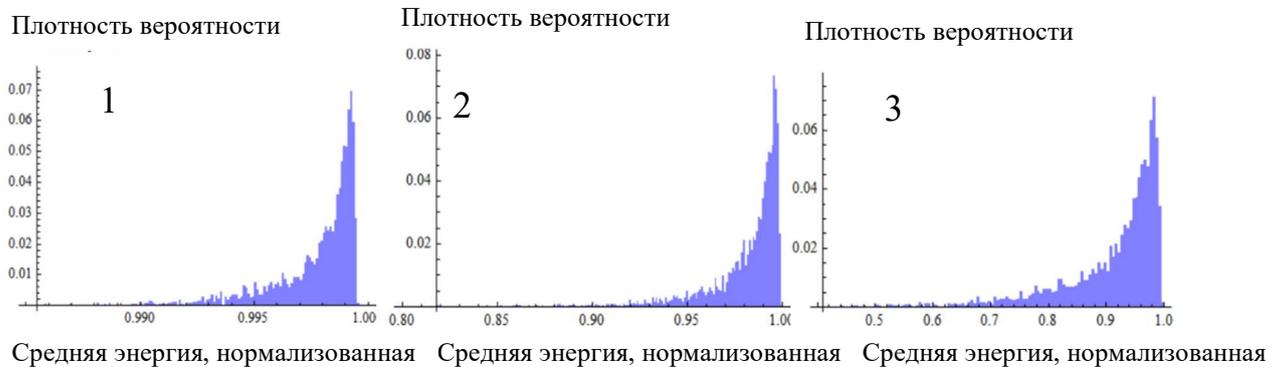


Рисунок 3.6 - Плотность относительного распределения средней энергии частиц с $\sigma_\varphi = 1.7^\circ$ при пролете через структуры со случайным набором фазовых ошибок (слева направо): 1 - $\Delta\theta \in [-1^\circ, 1^\circ]$, 2 - $\Delta\theta \in [-5^\circ, 5^\circ]$, 3 - $\Delta\theta \in [-9^\circ, 9^\circ]$

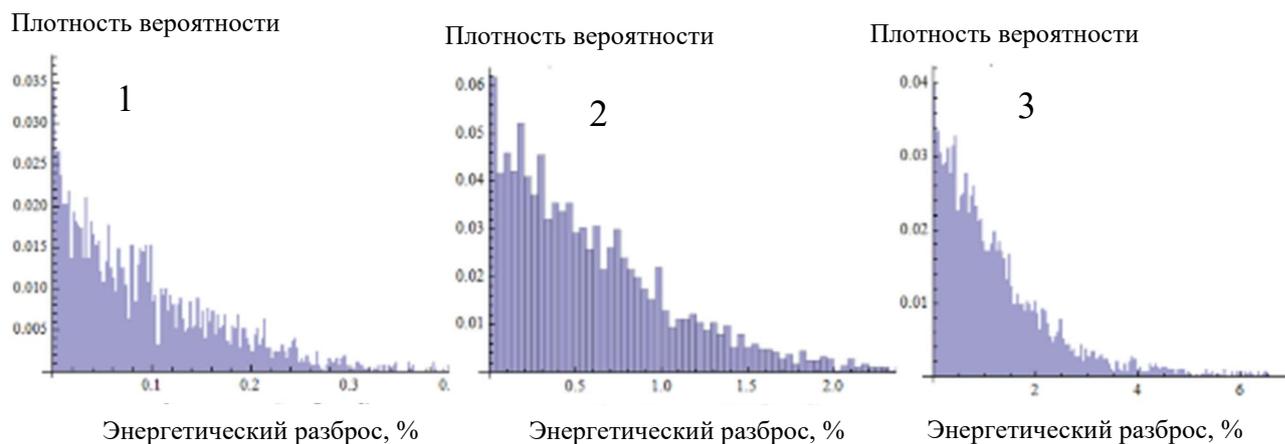


Рисунок 3.7 - Плотность распределения энергетического разброса в пучке с $\sigma_\varphi = 1.7^\circ$ при пролете через структуры со случайным набором фазовых ошибок в диапазонах: 1- $\Delta\theta \in [-1^\circ, 1^\circ]$, 2- $\Delta\theta \in [-5^\circ, 5^\circ]$, 3 - $\Delta\theta \in [-9^\circ, 9^\circ]$. Разброс в отсутствии фазовых ошибок вычтен из полученных данных

Из рисунка 3.6 видно, что спектр возможных средних энергий расширяется при увеличении диапазона фазовых ошибок. Если для фазовой ошибки $\Delta\theta \in [-1^\circ, 1^\circ]$ наибольшая вероятность конечной средней энергии близка к максимальной (соответствующей идеальному случаю), то для больших ошибок спектр значительно увеличивается. Так, для первого случая практически вся ширина спектра не превосходит 1% от максимально возможной средней энергии. При диапазоне $\pm 9^\circ$ ширина спектра на полувысоте составляет 8% от максимальной средней энергии. Обобщенные результаты для пучка с нормальным распределением при $\sigma_\varphi = 1.7^\circ$ приведены в таблице 3.1.

Рисунок 3.7 показывает увеличение энергетического разброса с ростом диапазона возможных фазовых ошибок. Без них из-за длительности пучка среднеквадратичный разброс составляет $\delta W_0 = 0.07\%$. Для диапазона фазовых ошибок $\pm 9^\circ$ увеличение энергетического разброса становится более 1%.

Таблица 3.1 - Вероятные энергетические параметры пучка с $\sigma_\varphi = 1.7^0$ при пролете через ускоряющие структуры при различных диапазонах случайных фазовых ошибок

$\Delta\theta, ^\circ$	Наиболее вероятная средняя энергия, %	Ширина спектра энергий на полувысоте, %	Среднеквадратичный энергетический разброса с вычетом разброса в пучке без ошибок, %
0	99.96	-	0
± 1	99.92	99.8	0.1
± 5	99.6	98.5	0.6
± 9	98.2	92.0	1.7

Для короткого сгустка фазовые ошибки менее опасны с точки зрения уменьшения средней энергии и увеличения энергетического разброса (см.(3.47)).

Расчет выполнялся для большого набора ускоряющих структур и ячеек. В линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ» число структур и ячеек не является статистически большим и нельзя надеяться на компенсацию ошибок за счет их случайного распределения. Важным является то, что для выбранных структур постоянная ошибка $\Delta\theta = 2.163^0$ приводит к нулевому приросту энергии. Тем не менее, несмотря на относительно небольшое количество ускоряющих структур в линейном ускорителе инжектора ЦКП «СКИФ», нельзя заранее заложить такие точности изготовления, которые в сумме дадут нулевую фазовую ошибку. Например, для суммарной ошибки в 1^0 согласно (3.13) точность периода должна быть $\Delta d = 3.4 \mu\text{м}$, что невозможно выполнить. Однако, если ускоряющие ячейки расставлять так, чтобы ячейки с разными частотами компенсировали друг друга (в среднем давали рабочую частоту) то ошибки, все-таки, можно компенсировать. Таким образом, для практического отбора ячеек можно ориентироваться на фазовую ошибку $\Delta\theta < \pm 1^0$. При этом окончательный отбор ячеек должен осуществляться, исходя из величины девиации частоты. В этом случае для $\Delta\theta < \pm 1^0$ согласно (3.15) $\Delta f < 0.5 \text{ МГц}$, что легко контролируется при измерениях.

Из-за большой теплопроводности меди изменение температуры ускоряющей структуры будет приблизительно однородно по длине и ошибки отдельных ячеек будут складываться.

Тогда согласно (3.16) для получения суммарной ошибки менее $\pm 1^{\circ}$ для структуры инжектора ЦКП «СКИФ» (85 ячеек) необходимо выдерживать изменение температуры в пределах

$$\Delta T = \frac{1}{85 \cdot 0.1} \approx 0.1^{\circ}C.$$

3.4 Заключение к Главе 3

Проведены различные аналитические оценки на точность параметров ускоряющих структур и режима их эксплуатации. Было показано, что при условии оптимальной фазы инжекции, то есть в максимуме амплитуды ускоряющего поля, смещение рабочей частоты на 0.5 МГц приводит к уменьшению средней энергии на 32-35% в зависимости от типа периодической структуры на основе круглого диафрагмированного волновода. При неоптимальной фазе инжекции расстройка частоты, напротив, приводит к набору большей энергии, однако ее среднее значение все равно уменьшается.

Наличие ошибок набега фазы в ускоряющих ячейках ускоряющих структур может существенно влиять на параметры пучка на выходе линейного ускорителя: возрастает вероятность снижения средней энергии пучка на несколько процентов и растет энергетический разброс в пучке. Как правило, такие ошибки имеют механическую природу и возникают в процессе производства ускоряющих структур. В результате они приводят к отклонению частоты ускоряющих ячеек от заданного значения. Прделанные расчеты позволили изучить влияние коррелированных и некоррелированных ошибок изготовления в ускоряющих ячейках на параметры пучка. С учетом этого были выбраны критерии отбора ячеек, главными из которых являются отклонение по частоте менее ± 0.5 МГц и некоррелированное распределение ошибок.

Глава 4. Изготовление элементов ускорителя

4.1 Изготовление ВЧ пушки и резонатора канала группировки

Резонатор ВЧ пушки [46] коаксиального типа (см. рисунок 4.1) диаметром 500 мм со встроенным сменным катодно-сеточным узлом 6, который крепится с помощью вакуумного фланца стандарта CF-40. Управление током катода осуществляется с помощью модулятора 15, расположенного внутри цилиндрической полости пушки 14. Изменение частоты резонатора достигается путем деформации стенки 1 и может регулироваться с помощью сильфона 12 и винтов 9 и 10. Для корректировки частоты используются пьезоактуаторы 8. Мощность вводится петлей связи, которая крепится через фланец к отверстию 2. Патрубок 7 служит для вакуумной откачки. Ускоряющее напряжение сосредоточено в промежутке между катодом 6 и бобышкой 5, расположенной на стенке резонатора 4. Вид изготовленной пушки показан на рисунке 4.2, а в таблице 4.1 приведены ее характеристики. В качестве источников ВЧ мощности используются полупроводниковые усилители, разработанные компанией «Триада ТВ» [47].

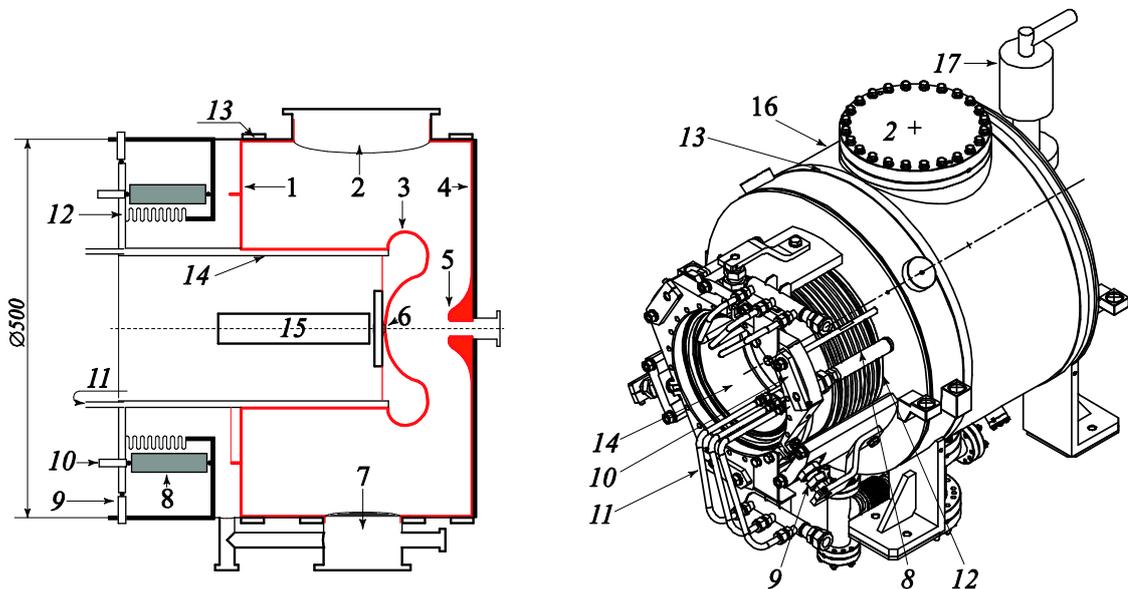


Рисунок 4.1 - Блок-схема (слева) и чертеж ВЧ пушки (справа). 1- задняя стенка, 2 – ввод ВЧ мощности, 3- электрод, 4 – передняя стенка, 5 – бобышка, 6 – катод, 7 – порт вакуумной откачки, 8 – пьезоактуатор, 9 – винт регулировки наклона вставки, 10 – винт ручной регулировки резонансной частоты, 11 – трубки водяного охлаждения вставки, 12 – сильфон, 13 – каналы водяного охлаждения корпуса, 14 – вставка, 15 – модулятор катодно-сеточного узла, 16 – обечайка, 17 – вакуумный затвор



Рисунок 4.2 - Внешний вид ВЧ пушки линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»

Таблица 4.1 - Характеристики ВЧ пушки

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 поверхности, МВ/м	19.6
ВЧ напряжение измерительных петель, В	20
Коэффициент связи ввода ВЧ мощности	1
Длительность ВЧ импульса, мкс	100
Диапазон перестройки частоты, мкм\кГц	100\100

Катодно-сеточный узел, показанный на рисунке 4.3, изготовлен на предприятии АО «НПП «Торий» [48]. Он имеет паркетную сетку, расположенную на расстоянии 100 мкм от катода. Диспенсерный катод диаметром 10 мм изготавливается по образцу катодного узла СВЧ триода ГС-34 [19] и с учетом опыта его эксплуатации.

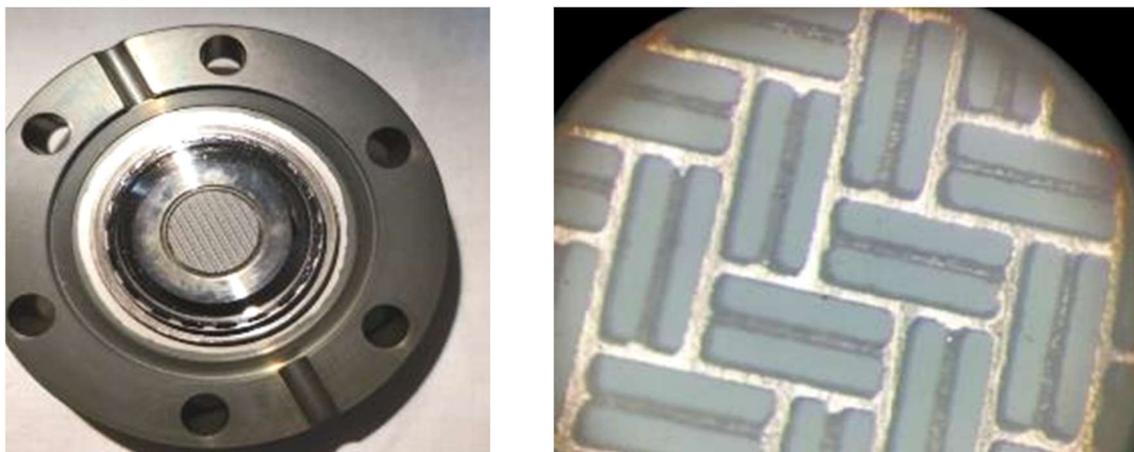


Рисунок 4.3 - Катодно-сеточный узел: слева – катод с фланцем, справа – сетка

На рисунке 4.4 показана зависимость токов анода и катода катодно-сеточного узла при испытаниях на стенде до установки в ВЧ пушку. Анод располагался на расстоянии 1.5 мм от сетки, напряжение на аноде 1000 В, при длительности импульса 1 мкс. Из графиков видно, что прозрачность сетки около 50%, что приемлемо для работы ВЧ пушки линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».

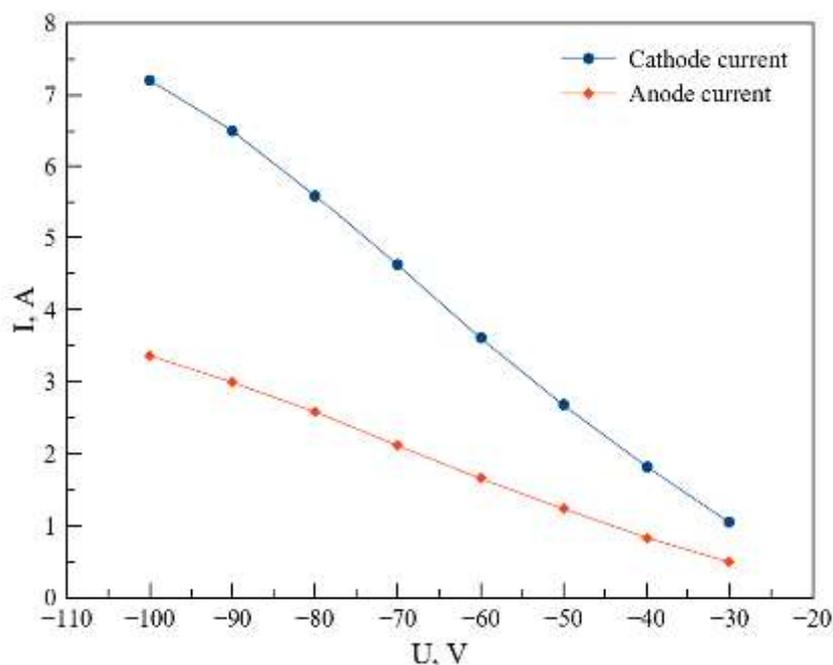


Рисунок 4.4 - Зависимость тока катода и анода от напряжения смещения

Модулятор управления током эмиссии катодно-сеточного узла работает в импульсном режиме в диапазоне частот 0 – 178.5 МГц. Последовательность импульсов регулируется специальными «шаблонами» согласно требованиям экспериментаторов от одного импульса до их последовательности с частотой ≤ 178.5 МГц. Длительность отпирающего импульса на

полувысоте около 1 нс. Отпирающее напряжение модулятора регулируется до -100 В. Для запираения пучка на катод подается положительное постоянное напряжение ≥ 20 В. Управление зарядом пучка осуществляется подбором запирающего и отпирающего напряжений. При этом напряжение модулятора способно смещаться по времени относительно ускоряющего напряжения ВЧ пушки, что позволяет регулировать не только заряд сгустка, но и его длительность. При отпирании катода в группирующей фазе ускоряющего напряжения длительность сгустка при вылете из пушки уменьшается. Влияние фазы инжекции пучка на его параметры обсуждалось в Главе 2. На рисунке 4.5 приведена последовательность отпирающих импульсов модулятора; плата модулятора показана на рисунке 4.6.

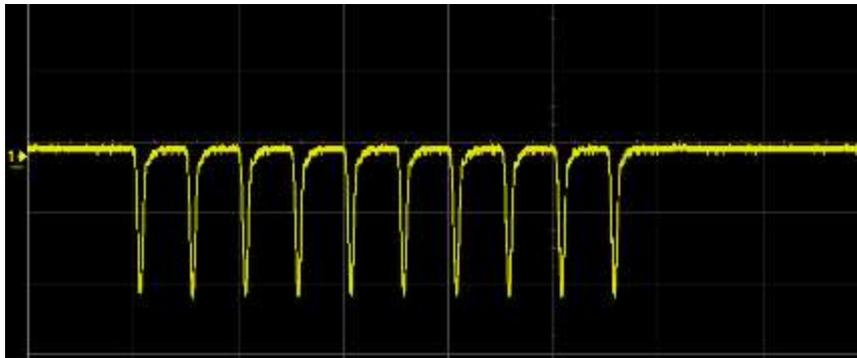


Рисунок 4.5 - Десять импульсов отпирающего напряжения модулятора с частотой 178.5 МГц, амплитудой -100 В и длительностью на полуширине 1 нс



Рисунок 4.6 - Плата управляющего модулятора катодно-сеточного узла

Резонатор группировки работает на тройной частоте ВЧ пушки – 535.5 МГц [46]. Резонатор линейризует продольную силу группировки, возникающую в ВЧ пушке при инъекции в группирующей фазе. Резонатор группировки выполнен в медном корпусе и имеет сосредоточенную емкость (область концентрации электрического поля, см. рисунок 1.9), как показано на рисунке 4.7. Так же, как и для ВЧ пушки, имеется возможность грубой настройки частоты резонатора и точной настройки во время работы с помощью пьезоактуаторов. Ввод мощности осуществляется петлей связи через коаксиальный фидер, а порт откачки расположен напротив ввода мощности. Таблица 4.2 приводит измеренные параметры резонатора группировки.



Рисунок 4.7 - Резонатор канала группировки на 535.5 МГц

Таблица 4.2 - Характеристики группирующего резонатора

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 E на оси, МВ/м	2.42
Максимальное ВЧ поле на поверхности, МВ/м	4.4
ВЧ напряжение измерительных петель, В	20
Коэффициент связи ввода ВЧ мощности	1
Длительность ВЧ импульса, мкс	100
Диапазон перестройки частоты, мкм/кГц	100/160

4.2 Магнитная система ускорителя

Магнитная система описана в разделах 1.8 и 2.5. В таблице 4.3 суммированы параметры изготовленных магнитов, а на рисунках 4.8-4.10 показан их внешний вид [39].

Таблица 4.3 - Виды магнитов, их количество и рабочие значения полей

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

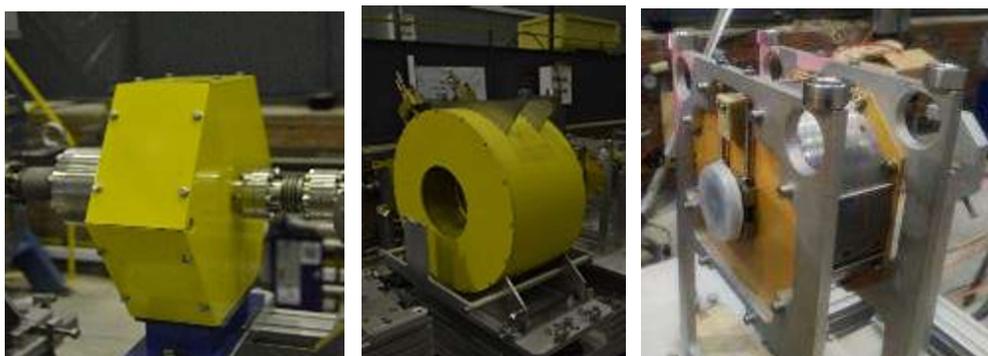


Рисунок 4.8 - Слева направо: соленоиды канала группировки, предускорителя-группирователя (ПГ) (две катушки в одном железном корпусе) и согласующий соленоид

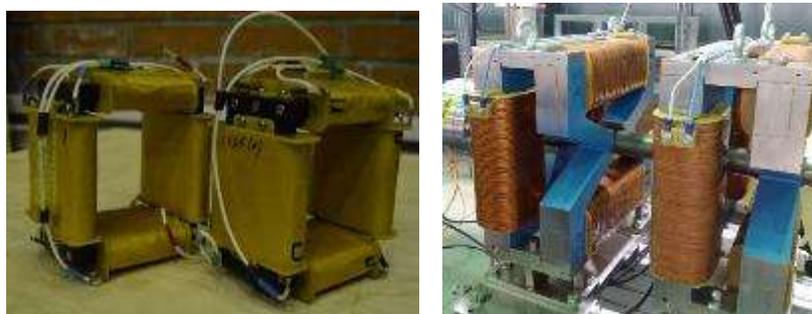


Рисунок 4.9 - Корректоры секции группировки (слева) и регулярной части линака (справа)

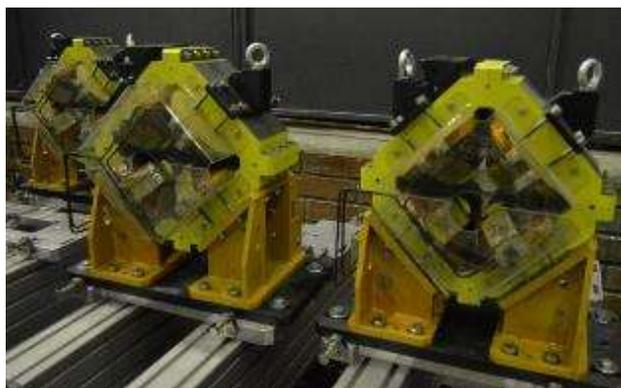


Рисунок 4.10 - Квадрупольные линзы

Измеренное и расчетное распределения магнитного поля соленоида канала группировки изображено на рисунке 4.11 [39].

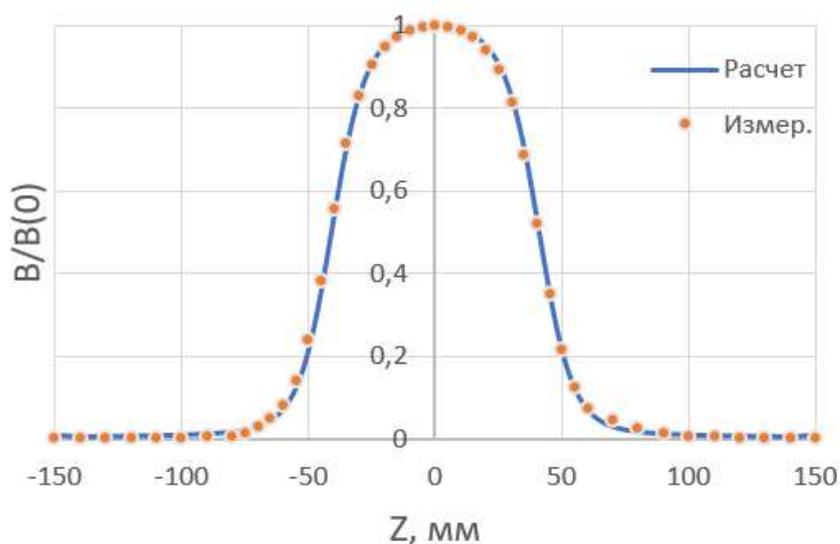


Рисунок 4.11 - Распределение магнитного поля соленоида канала группировки

4.3 Изготовление ускоряющих структур

Регулярные ускоряющие структуры линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» выполнены на основе диафрагмированного волновода, работающего в режиме бегущей волны с постоянным импедансом [49]. Структура (рисунок 4.12) состоит из двух половин, которые объединяются сваркой через соединительную диафрагму. Каждая полуструктура состоит из ускоряющих ячеек, одной переходной ячейки и трансформатора типа волны (ТТВ). Первая

полуструктура содержит 41 ускоряющую ячейку, вторая – 40. Для охлаждения и поддержания рабочей температуры (термостабилизации) предусмотрена рубашка охлаждения.

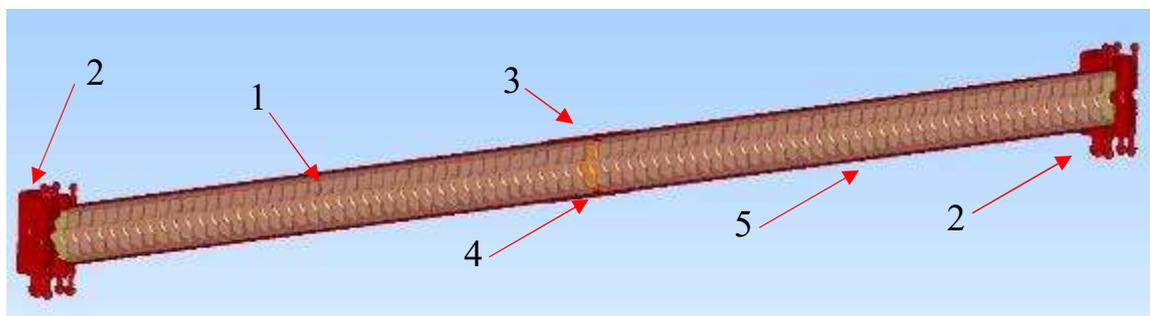


Рисунок 4.12 - Ускоряющая структура – диафрагмированный волновод: 1 – резонатор (регулярная ускоряющая ячейка), 2 – трансформатор типа волны, 3 – переходная ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения

Регулярная ускоряющая ячейка изготавливается из бескислородной меди в виде полого цилиндра с торцевой диафрагмой с отверстием связи. Геометрия ячейки и ее основные размеры приводятся на рисунке 4.13.

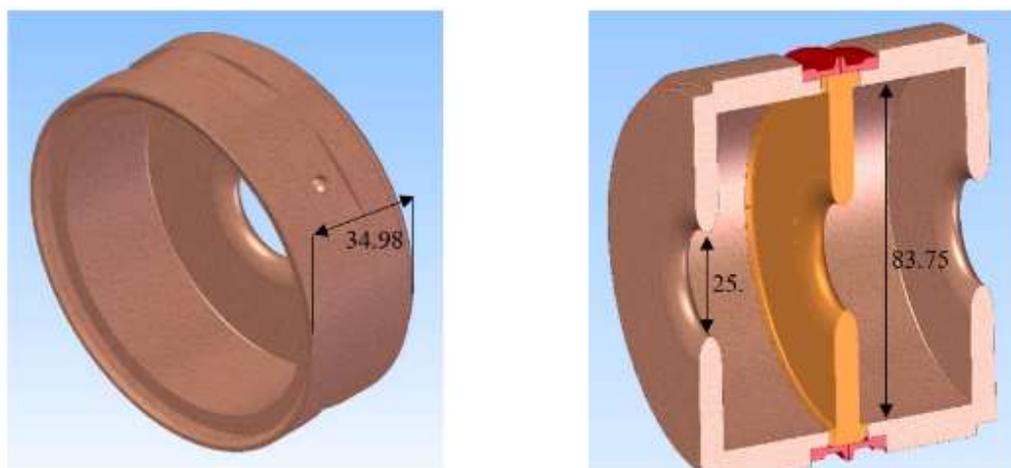


Рисунок 4.13 - Ускоряющие ячейки: слева - регулярная; справа – переходная

В четырех местах ячейки по внешнему периметру предусмотрены углубления для деформации внешней стенки и настройки частоты после изготовления. Профиль отверстия диафрагмы имеет форму эллипса с соотношением осей 2:1.

Переходная ускоряющая ячейка, показанная на рисунке 4.13 справа, идентична регулярной за исключением припаянного внешнего кольца из нержавеющей стали. Между двумя такими ячейками зажимается переходная диафрагма связи, после чего вся конструкция сваривается по внешнему периметру с помощью нержавеющей колец. Размеры подбираются так, чтобы после усадки сварочного шва между диафрагмой и переходными ячейками достигался максимально плотный электрический контакт.

Трансформатор типа волны (ТТВ) обеспечивает вакуумно-плотное соединение волноводов и вакуумных камер, используется в качестве согласующего откачного узла и элемента ввода и вывода СВЧ мощности через прямоугольный волновод. Волновод крепится через вакуумный волноводный фланец типа SLAC (WR-284), ввод и вывод СВЧ мощности осуществляется через индуктивную диафрагму связи (рисунок 4.14). Диаметр внутреннего резонатора ТТВ подбирается опытным путем. Трансформатор выполнен из нержавеющей стали с впаянной медной ячейкой. С торца ТТВ крепится вакуумная камера для пролета пучка. Регулярные ускоряющие ячейки паяются с ТТВ, обеспечивая вакуумное и электрическое соединения.

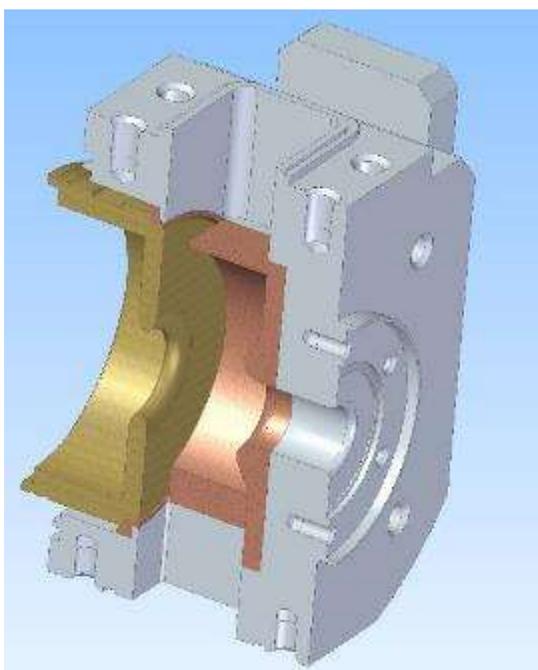


Рисунок 4.14 - 3D модель трансформатора типа волны

Предускоритель-группирователь (ПГ) линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», представляющий собой укороченную регулярную ускоряющую структуру, состоит из 9 регулярных ячеек и двух трансформаторов типа волны, как показано на рисунке 4.15. Все элементы идентичны элементам регулярной ускоряющей структуры, за исключением рубашки охлаждения, которая заменена на медную шину, намотанную поверх структуры.

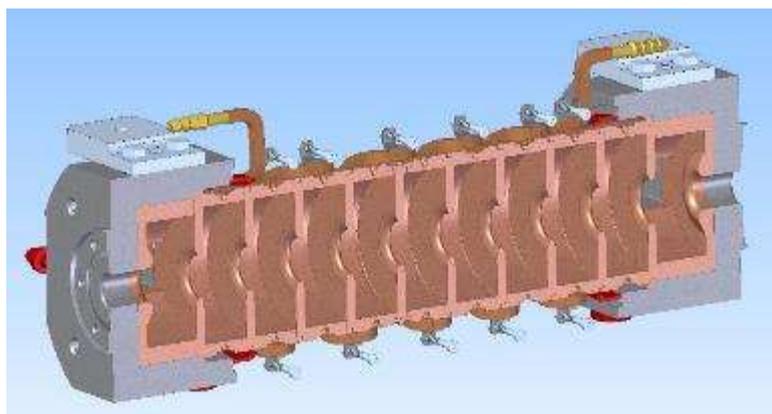


Рисунок 4.15 - Структура преускорителя-группирователя (ПГ)

На рисунке 4.16 показаны ускоряющие структуры регулярная и ПГ. После изготовления каждая из пяти регулярных ускоряющих структур была обмеряна для определения отраженной характеристики, вида колебания и рабочей частоты. Отраженная полоса измерялась с помощью векторного анализатора S-параметров, а рабочая частота и мода колебания с помощью анализатора S-параметров и малого возмущающего тела [50], протягиваемого внутри структуры, как это показано на рисунок 4.17 [49].



Рисунок 4.16 - Ускоряющие структуры регулярная (слева) и ПГ

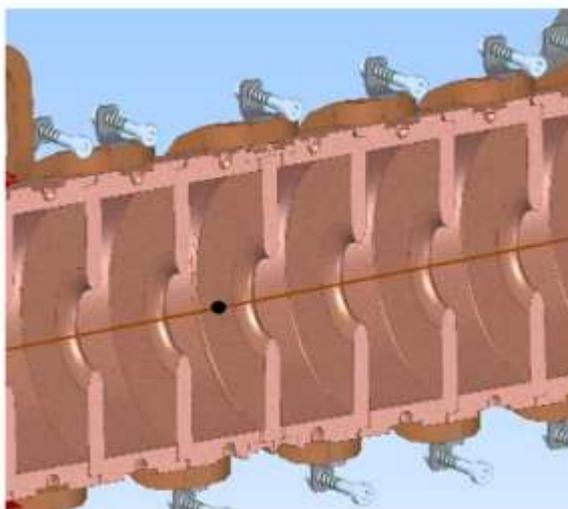


Рисунок 4.17. Измерение характеристик структуры с помощью перемещаемого вдоль нее малого возмущающего тела

Измерения позволили получить фазовые диаграммы структур (см. рисунок 4.18) и их параметры, представленные в таблице 4.4 [49].

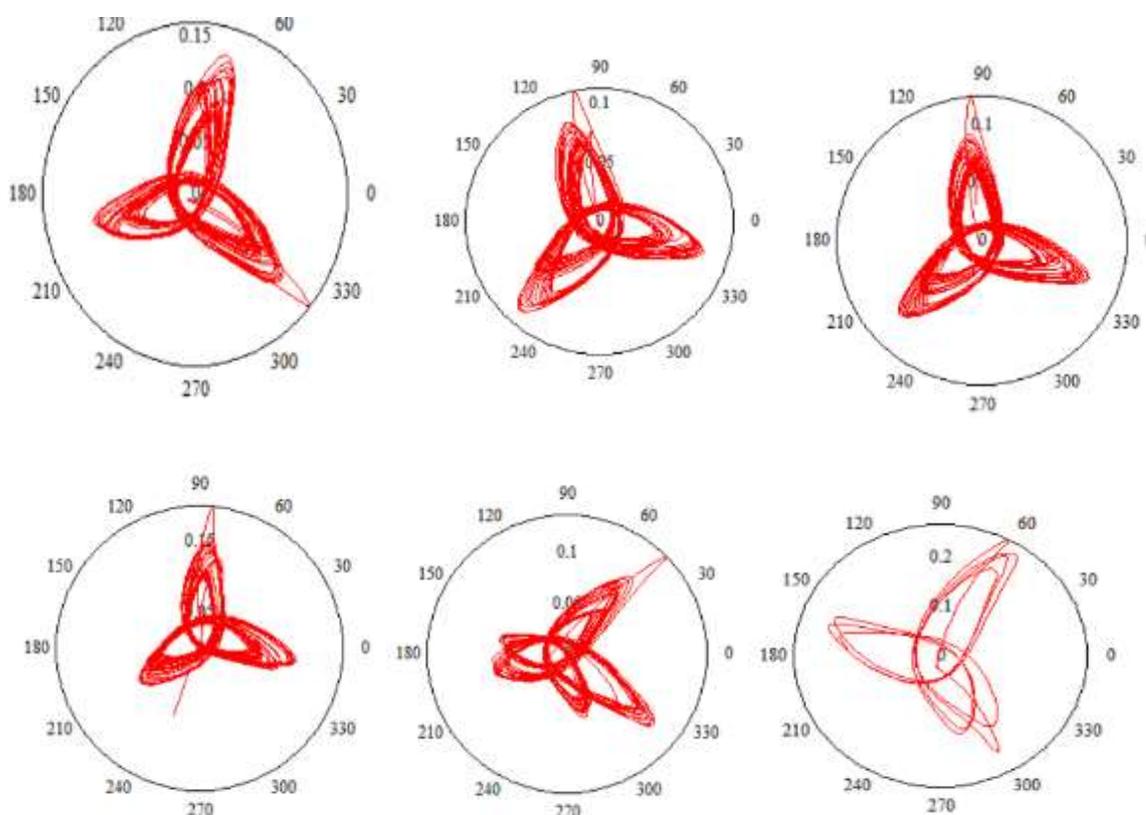


Рисунок 4.18 - Фазовые диаграммы ускоряющих структур. Верхний ряд слева-направо: регулярные структуры 1, 2 и 3. Нижний – структуры 4, 5 и предускоритель-группирователь

Таблица 4.4 - Измеренные параметры ускоряющих структур

Структура	Рабочая частота при вакууме и рабочей температуре, МГц	Рабочая температура, °С	Суммарная ошибка фазы на структуру по модулю менее	RMS фазовое отклонение	Отражение по мощности
1	2856	36	0.8 ⁰	±1.2 ⁰	3%
2	2856	27	2.5 ⁰	±1.7 ⁰	2.5%
3	2856	31	0.9 ⁰	±1.5 ⁰	3%
4	2856	30	1.9 ⁰	±2.4 ⁰	2.4%
5	2856	36	1.7 ⁰	±4 ⁰	5%
ПГ	2856	31	2 ⁰	±3 ⁰	3%

Видно, что наибольшие ошибки имеет ускоряющая структура 5. Это связано с тем, что две ее половины не удалось сделать идентичными, и между ними имеется сдвиг частоты. Тем не менее, поскольку суммарная ошибка не является критически большой, эта структура может быть использована в ускорителе.

Отметим, что предускоритель-группирователь линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» из-за малого числа ячеек имеет большую суммарную фазовую ошибку 2⁰ и скомпенсировать ошибки изготовления не получается. Однако, поскольку предускоритель-группирователь не должен обеспечивать максимальный темп ускорения, было решено, что такой уровень погрешностей удовлетворителен и дополнительной настройки не требуется.

4.4 Другие элементы линейного ускорителя

Вспомогательные системы линейного ускорителя – диагностика, вакуумная система, термостабилизация и синхронизация – описаны в разделах 1.9, 1.10 и 1.11. Все элементы этих

систем изготовлены и прошли испытание на стенде ЛИНАК-20. На рисунке 4.19 слева показаны некоторые элементы системы диагностики [24]. Нагревательный элемент системы термостабилизации показан на рисунке 4.19 справа.

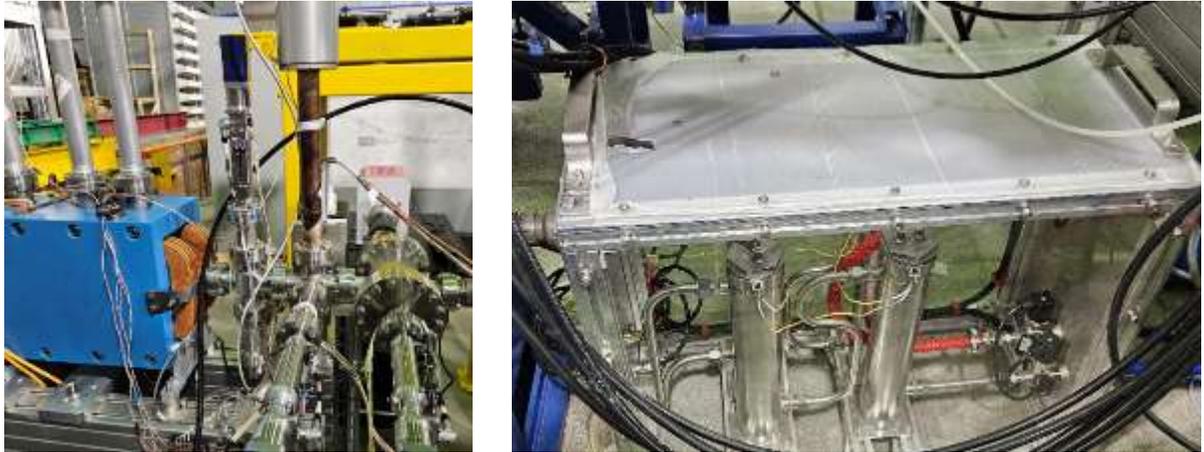


Рисунок 4.19 - Спектрометр, люминофорный датчик и датчика черенковского излучения (слева). Один из восьми термоэлектрических нагревателей (справа)

Для передачи СВЧ мощности в резонаторы и ускоряющие структуры линейного ускорителя используются фидерные трассы. В ВЧ пушку и резонатор третьей гармоники канала группировки мощность поступает через коаксиальные фидеры с воздушным заполнением. От клистронов в ускоряющие структуры мощность поступает через волноводы с внутренним сечением $72 \times 34 \text{ мм}^2$ с вакуумной откачкой.

На рисунке 1.5 показана схема линейного ускорителя с волноводным трактом. Описание волноводной системы дано в разделе 1.6. На рисунке 4.20 показан один из семи волноводных фазовращателей. Измеренная зависимость фазы волны ускоряющего напряжения при работе фазовращателя продемонстрирована на рисунке 4.21; видно, что обеспечен диапазон изменения фазы $>180^\circ$. При этом имеется гистерезис при работе шагового двигателя в одну и другую стороны.



Рисунок 4.20 - Волноводный фазовращатель

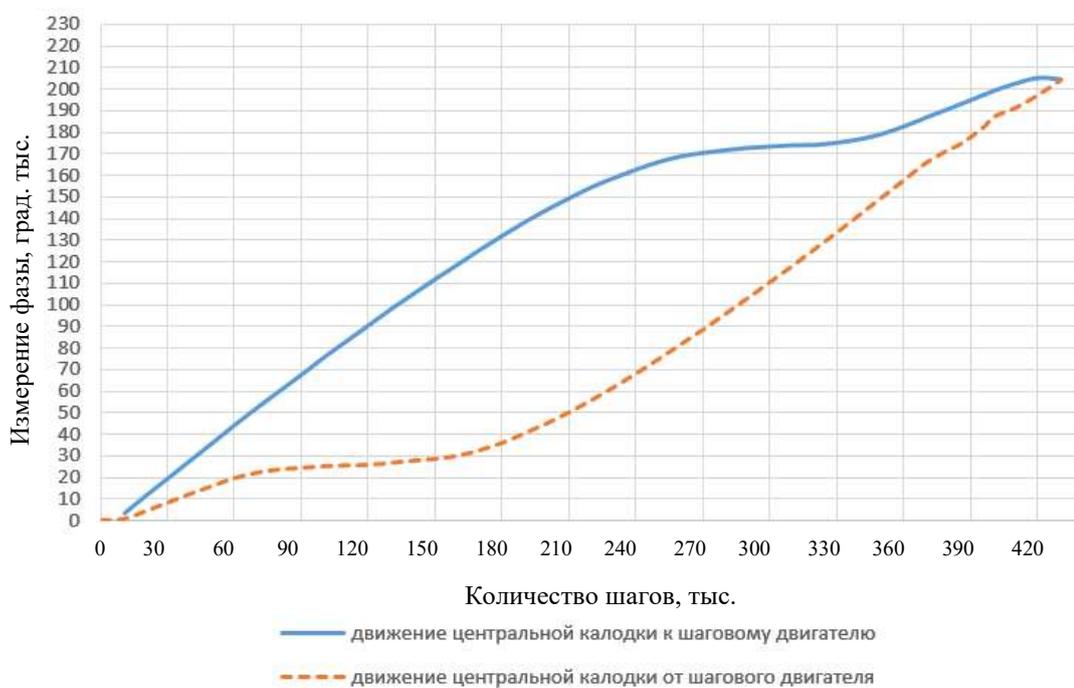


Рисунок 4.21 - Измеренная зависимость фазы волны при работе волноводного фазовращателя

Волноводный мост на 3 дБ показан на рисунке 4.22, а в таблице 4.5 показаны измеренные характеристики всех четырех мостов.

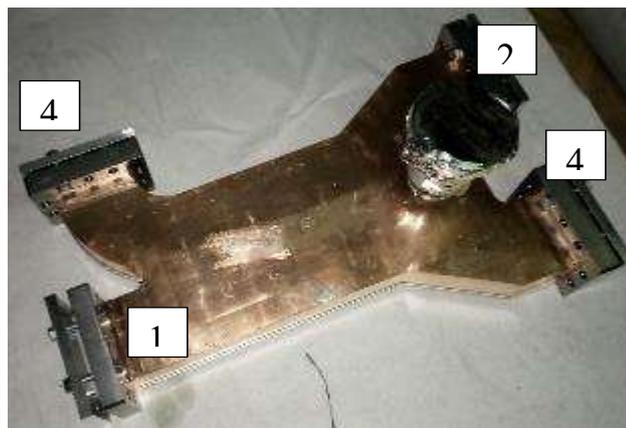


Рисунок 4.22 - Волноводный мост на 3 дБ с пронумерованными плечами

Таблица 4.5 - S-параметры волноводных мостов на 3 дБ в диапазоне частот 2.8-2.9 ГГц

S_{21} , дБ	S_{31} , дБ	S_{41} , дБ
-3.07 ± 0.08	-3.04 ± 0.04	< -25
-3.03 ± 0.04	-3.03 ± 0.02	< -24.5
-3.07 ± 0.02	-3.01 ± 0.04	< -24
-3.04 ± 0.02	-3.06 ± 0.03	< -23.8

Изготовленные волноводные СВЧ нагрузки показаны на рисунке 4.23. Всего сделано 10 нагрузок. В таблице 4.6 приведены измеренные коэффициенты стоячей волны при рабочей частоте 2856 МГц.



Рисунок 4.23 - Изготовленные волноводные СВЧ нагрузки

Таблица 4.6 – Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн) изготовленных нагрузок при частоте 2856 МГц

Нагруз.	КСВн (на частоте 2856 МГц)	Полоса на уровне КСВ=1.5, МГц	Нагруз.	КСВн (на частоте 2856 МГц)	Полоса на уровне КСВ=1.5, МГц
1	1.3	4	6	1.37	4
2	1.35	5	7	1.27	4
3	1.37	4	8	1.2	4
4	1.2	5	9	1.23	5
5	1.1	4	10	1.3	4

Для регулировки уровня СВЧ мощности, которая поступает в предускоритель-группирователь, имеется волноводный аттенюатор, который состоит из двух симметричных волноводных трехдецибельных мостов и одного фазовращателя. На рисунке 4.24 показан аттенюатор в сборе, а рисунок 4.25 демонстрирует измеренный коэффициент затухания.

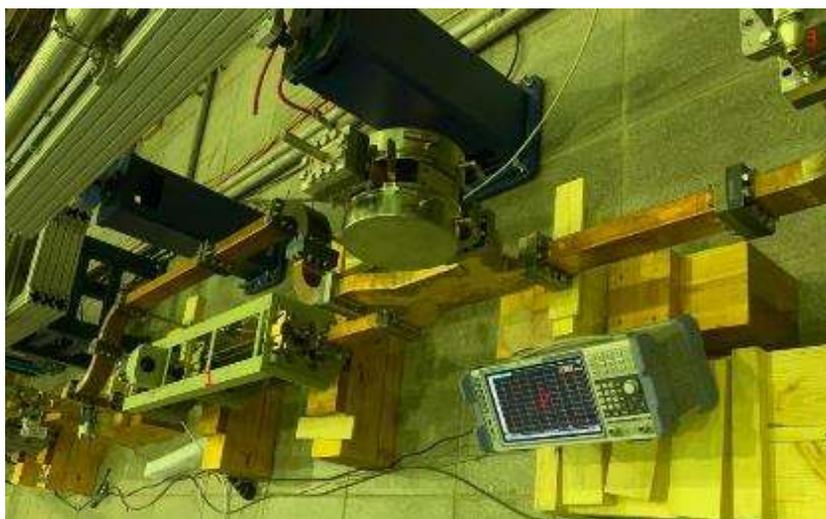


Рисунок 4.24 - Волноводный аттенюатор в сборе во время его измерения (1– фазовращатель, 2 – анализатор S-параметров, 3 – волноводная СВЧ нагрузка)

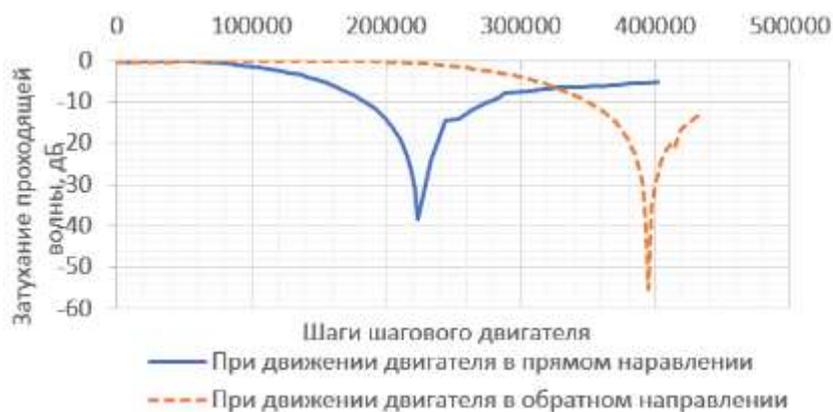


Рисунок 4.25 - Коэффициент затухания аттенюатора

На рисунке 4.25 виден гистерезис коэффициента поглощения, когда максимумы поглощения не совпадают друг с другом при вращении шагового двигателя в прямую и обратную сторону. Тем не менее, максимальное поглощение не выше -40 дБ.

Для ответвления 10 МВт СВЧ мощности от клистрона в ПГ и 40 МВт в первую регулярную ускоряющую структуру, используется 7-ми дБ-ый ответвитель. С помощью короткозамыкающего плунжера были достигнуты ответвления -1.0 дБ и -7 дБ, что соответствует 20% и 80% ответвляемой мощности. На рисунке 4.26 показан изготовленный ответвитель.



Рисунок 4.26 - Семидецибельный ответвитель

4.5 Заключение к Главе 4

В заключение можно сказать, что все элементы линейного ускорителя, включая источники питания, систему диагностики и управления были изготовлены в ИЯФ СО РАН. Все изделия прошли предварительные измерения. Несмотря на выявленные некоторые недостатки, можно считать, что все части ускорителя пригодны для эксплуатации и должны обеспечить необходимые требования к линейному ускорителю ЦКП «СКИФ».

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

5.1 Разработка клистрона

Источником СВЧ мощности, который формирует ускоряющее СВЧ-поле в структурах линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», является клистрон S-диапазона с рабочей частотой 2856 МГц и импульсной мощностью 50 МВт. Для работы ускорителя необходимы три клистрона (плюс один резервный). Планировалось приобрести клистроны E3730A производства японской компании Cannon, обладающие требуемыми параметрами [51], и один такой прибор был поставлен в ИЯФ СО РАН весной 2022 года. Однако следующие клистроны компания Cannon поставлять отказалась, и было принято решение о разработке собственных клистронов в ИЯФ СО РАН, причем сделать это было нужно в кратчайшие сроки.

За основу разработки был выбран клистрон 5045 производства SLAC (Stanford Linear Accelerator Laboratory) [52], 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 [53]. 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.

В таблице 5.1 сравниваются параметры клистронов 5045 и E3730A. Стоит отметить, что после длительной эксплуатации клистронов 5045 на ВЭПП-5 эмиссия катода уменьшилась и ток упал с 400 А до 350 А. При этом, тем не менее, выходная СВЧ мощность оставалась не ниже 50 МВт. Поскольку для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» 50 МВт СВЧ мощности достаточно, было решено изначально заложить в проект клистрона ток пучка 350 А.

Таблица 5.1 - Основные параметры клистронов 5045 (SLAC) и E3730A (Canon)

Параметр	Клистрон 5045	Клистрон E3730A
Частота	2856 МГц	2856 МГц
Выходная импульсная мощность	60 МВт	50 МВт

Продолжение таблицы 5.1

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 А	400 А
Высокое напряжение анода	350 кВ	325 кВ

5.2 Расчет катодного узла

Катодный узел рассчитывался программами POISSON-2 [54] и ULTRASAM [55]. Обе программы дали практически одинаковые результаты. Расчетная вольтамперная характеристика узла показана на рисунке 5.1. При напряжении 350 кВ ток эмиссии составляет 370 А, при этом микроперванс равен $1.8 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

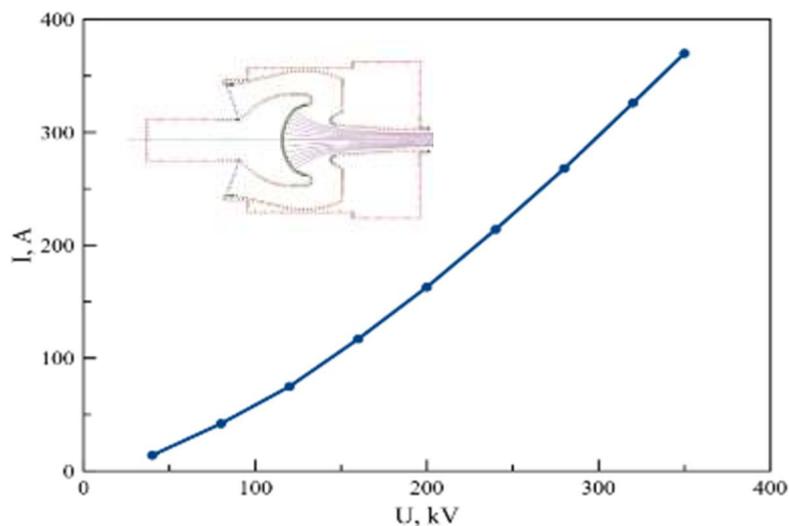


Рисунок 5.1 – Расчетная вольтамперная характеристика катодного узла клистрона ИЯФ СО РАН

На рисунке 5.2 приведено распределение плотности тока пучка в районе возбуждающего резонатора.

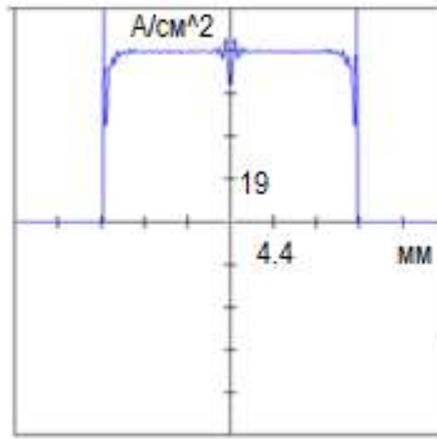


Рисунок 5.2 - Плотность тока пучка в районе первого возбуждающего резонатора (максимальное значение 76 A/cm^2). Одно деление шкалы абсцисс - 4.4 мм

5.3 Расчет поперечной динамики пучка в клистроне

Фокусировку электронного пучка в клистроне обеспечивает многосекционный соленоид (рисунок 5.3). Все катушки включены последовательно и питаются от одного источника с током около 15 А и напряжением 200 В (реальное значение тока подбирается экспериментально). Катушка, расположенная вблизи катода, необходима для компенсации эффекта замагничивания пучка. Последующие катушки должны создавать заданное распределение магнитного поля. На рисунке 5.4 показано продольное распределение магнитного поля соленоида.

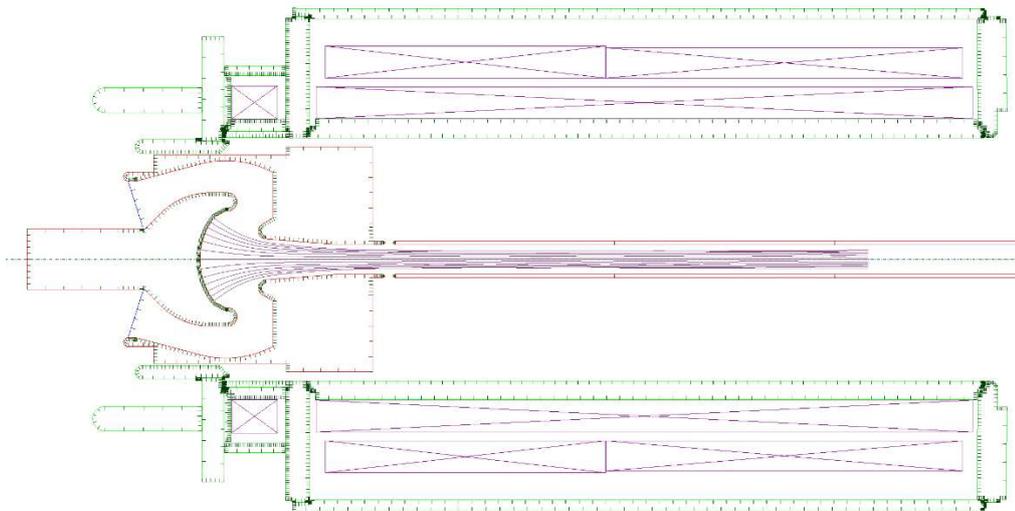


Рисунок 5.3 – Траектории электронов и соленоид с катодным узлом по результатам расчета программы ULTRASAM

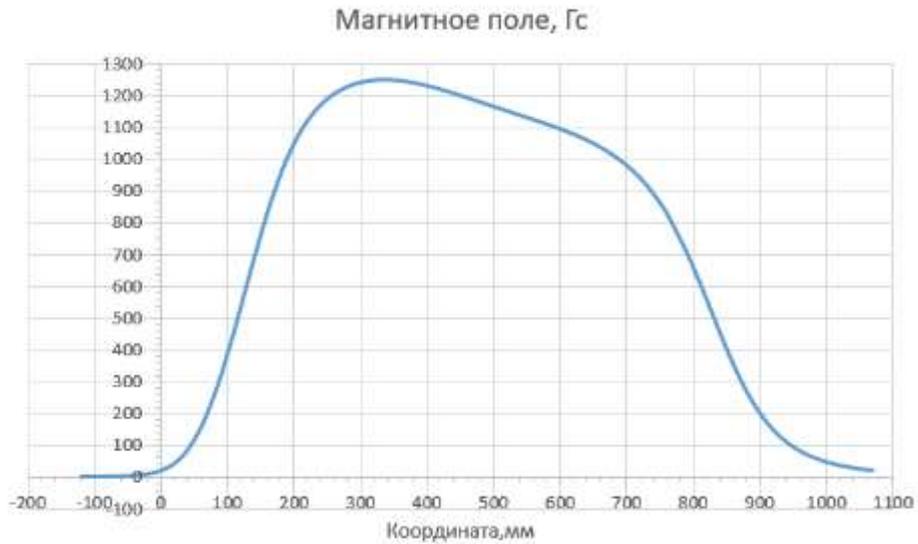


Рисунок 5.4 - Распределение магнитного поля на оси клистрона

Для исследования влияния магнитного поля на стабильность прохождения пучка в клистроне были проведены расчеты изменения поперечного размера пучка в области первого возбуждающего резонатора и амплитуды поперечных пульсаций в клистроне в зависимости от величины магнитного поля на катоде. Результаты приведены на рисунке 5.5.

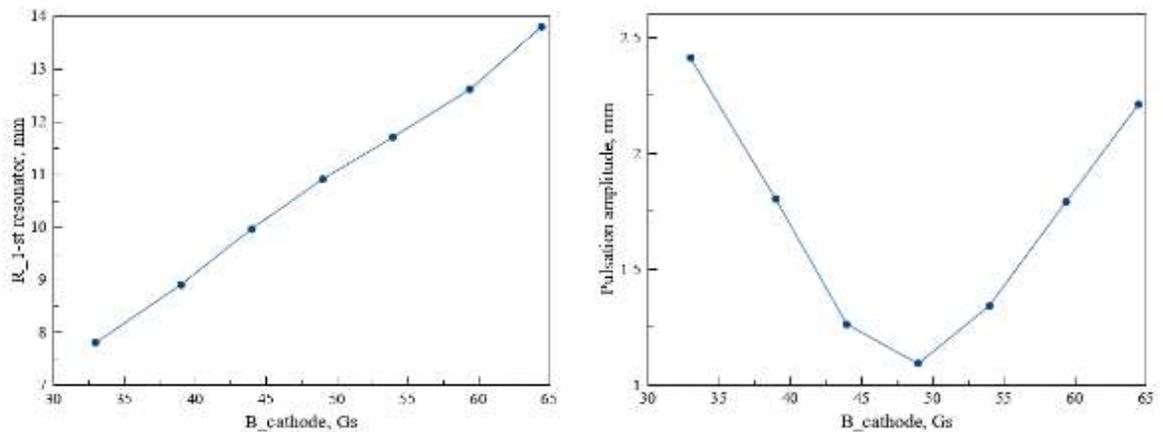


Рисунок 5.5 - Слева – зависимость радиуса пучка в области первого возбуждающего резонатора клистрона от величины магнитного поля на катоде. Справа – зависимость амплитуды поперечных пульсаций пучка в клистроне от магнитного поля на катоде

Из правого рисунка 5.5 видно, что пульсации размера пучка минимальны при поле на катоде около $50 \cdot 10^{-4}$ Тл, при этом радиус пучка в месте расположения возбуждающего резонатора около 11 мм.

5.4 Расчет возбуждающего резонатора

Одним из ключевых элементов клистрона, определяющих эффективность его работы, является возбуждающий резонатор, к конструкции которого предъявляется 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.

От качества работы возбуждающего резонатора в большой степени зависит работоспособность всего клистрона. В свою очередь, параметры возбуждающего резонатора являются исходными для расчета поведения электронного пучка в клистроне, и должны определяться с высокой точностью и достоверностью.

Для возбуждающего резонатора клистрона линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» были тщательно рассмотрены его расчетная модель, технология изготовления, сборки и настройки.

Модель резонатора показана на рисунке 5.6. Возбуждение резонатора осуществляется с помощью петли связи. Поскольку весь клистрон должен поместиться внутри соленоида, имеются конструктивные ограничения на узел соединения внешнего коаксиала. В связи с этим внешний разъем располагается под углом 90° к петле связи параллельно вакуумной камере клистрона. Внутренний проводник разъема имеет фланец, к которому крепится стержень, для чего используется дополнительная керамическая вставка, обеспечивающая необходимую вакуумную пайку фланца со стержнем. Сам фланец вводится внутрь коаксиального разъема и

приваривается к его внешней стенке. Крепление внутреннего стержня разъема и петли связи обеспечивается посредством винтового соединения. Связь внутренних проводников вакуумной части коаксиального разъема с внешней частью также осуществляется с помощью винтового соединения. Наружная стенка коаксиального ввода мощности крепится к вакуумной части с помощью фланцев и винтов.

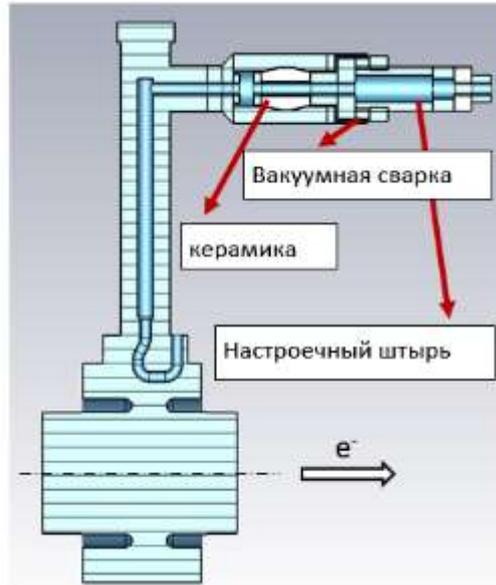


Рисунок 5.6 - Модель возбуждающего резонатора

Такая модель входного резонатора обладает рядом достоинств. Она обеспечивает необходимую вакуумную развязку вакуумной и внешней частей клистрона. Конструкция ввода мощности позволяет помещать клистрон внутрь соленоида. Внешнюю связь резонатора с возбуждающим усилителем можно регулировать с помощью настроечного штыря (см. рисунок 5.6), изменяя его диаметр. Сам настроечный штырь находится на воздухе (что обеспечивает простоту и надежность его замены) и прикручивается к центральному штырю разъема, который уже является деталью вакуумной части ввода мощности. Возможной проблемой такого разъема является керамическая часть, необходимая для создания вакуумной развязки, которая является емкостным элементом, где запасается электрическая энергия. Тогда эта часть разъема превращается в резонатор и может образоваться контур с двумя связанными резонаторами: клистрона и устройства ввода мощности. Однако, как следует из работ [56], при правильном подборе связи между резонаторами и с внешней линией можно добиться практически полного поступления СВЧ мощности в основной резонатор.

Для расчета параметров возбуждающего резонатора воспользуемся эквивалентной схемой представления резонатора (рисунок 5.7) [57]. Здесь используются обозначения: $R = 1/G$ – потери в стенках резонатора, G – активная проводимость стенок резонатора, G_b – активная внесенная проводимость пучка, B – реактивная проводимость самого резонатора, B_b – внесенная пучком реактивная проводимость, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота контура, L и C – эквивалентные сосредоточенные индуктивность и емкость резонатора без пучка, $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление резонатора, которое для объемного резонатора можно найти по формуле (5.1), где E_z – продольная компонента электрического поля на оси резонатора, z – продольная координата, W – запасенная энергия в резонаторе [58].

$$\rho = \frac{(\int E_z dz)^2}{2\omega_0 W}, \quad (5.1)$$

Собственная добротность резонатора Q_0 определяется согласно (5.2).

$$Q_0 = \omega_0 CR = \frac{R}{L\omega_0} = \frac{R}{\rho} = \frac{1}{\rho G}. \quad (5.2)$$

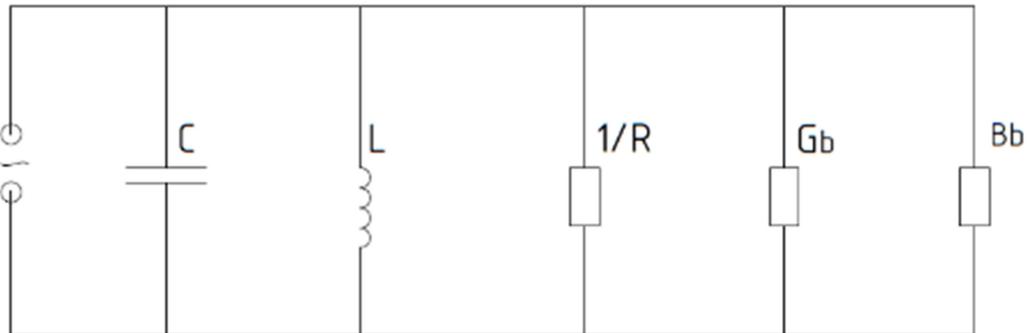


Рисунок 5.7 - Эквивалентная схема резонатора клистрона

Для резонансного контура, работающего на частоте вынужденных колебаний ω , известно выражение для реактивной проводимости [57]:

$$B = \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = \omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \approx 2 \frac{Q_0}{R} \delta\omega = 2GQ_0\delta\omega = 2 \frac{\delta\omega}{\rho}, \quad (5.3)$$

где $\delta\omega = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ – относительная расстройка резонатора. Таким образом, можно записать, что относительная расстройка резонатора определяется реактивной составляющей проводимости

$$\delta\omega \approx 0.5B\rho. \quad (5.4)$$

Пучок в резонаторе, с одной стороны, поглощает СВЧ мощность резонатора, а с другой – вносит емкостную составляющую, то есть добавляет в резонансный контур активную и реактивную проводимости. В этом случае из (5.4) можно утверждать, что при наличии реактивной составляющей проводимости, вносимой пучком, частота резонатора изменится согласно

$$\delta\omega \approx -0.5B_b\rho. \quad (5.5)$$

Отрицательный знак говорит о том, что пучок уменьшает частоту резонатора в силу своего емкостного характера. Поскольку пучок привносит также активную проводимость G_b , то из (5.2) можно видеть появление дополнительной добротности

$$Q_b = \frac{1}{G_b\rho}. \quad (5.6)$$

В итоге полная добротность резонатора без учета нагрузки внешним контуром будет определяться как:

$$Q_{ut} = \frac{1}{1/Q_0 + 1/Q_b}. \quad (5.7)$$

В свою очередь, полную активную проводимость контура можно найти из выражения

$$G_t = \frac{1}{Q_{ut}\rho}. \quad (5.8)$$

Если рассматривать работу резонатора в некоторой полосе частот $\delta\omega$, то полное реактивное сопротивление будет иметь вид

$$B_t(\delta\omega) \approx 2\frac{\delta\omega}{\rho} + B_b. \quad (5.9)$$

Теперь из (5.8) и (5.9) можно записать полную проводимость резонатора с пучком

$$Y_t(\delta\omega) = G_t + jB_t. \quad (5.10)$$

Окончательно получим коэффициент отражения от возбуждающего резонатора клистрона при наличии пучка:

$$\Gamma(\delta\omega) = \frac{G_e - Y_t(\delta\omega)}{G_e + Y_t(\delta\omega)}. \quad (5.11)$$

Здесь G_e – проводимость внешней линии, которую можно найти, зная внешнюю добротность резонатора Q_e согласно (5.2):

$$G_e = \frac{1}{Q_e \rho}. \quad (5.12)$$

Из (5.5) следует, что реактивная проводимость B_b , вносимая пучком, приводит к изменению частоты резонатора, и, если начальная частота резонатора выбрана с учетом этого эффекта, то есть выше рабочей частоты, то можно добиться выполнения условия $B_t(\delta\omega_0) = 0$ при пролете пучка.

Напряжение в резонаторе с учетом мощности внешнего генератора P_g найдем из выражения [60, 61]

$$V = \frac{2}{1+\beta} \sqrt{2P_g Q_{ut} \rho}. \quad (5.13)$$

Стоит отметить, что эффективное среднеквадратичное значение напряжения будет отличаться от приведенного выше:

$$V_{rms} = \frac{2}{1+\beta} \sqrt{P_g Q_{ut} \rho}. \quad (5.14)$$

Выражение (5.11) включает в себя параметры резонатора без пучка и с пучком. К первым относятся собственные частота ω_0 и добротность Q_0 , характеристическое сопротивление ρ , внешняя добротность Q_e . Пучок добавляет реактивную B_b и активную G_b проводимости. Параметры резонатора без пучка хорошо моделируются многими современными кодами, такими как SUPERFISH [62], CST-Studio [33] и др. Проводимости, привносимые в резонатор пучком, рассчитать в явном виде значительно труднее.

Аналитический вывод B_b и G_b сильно зависит от используемой модели резонатора. Так, например, для резонатора с двумя сетками подробный вывод активной и реактивной составляющих проводимости сделан в работах [63, 64, 65]:

$$G_{bg} = \frac{I}{U} \frac{1 - \frac{\theta_d}{2} \sin \theta_d - \cos \theta_d}{\theta_d^2} \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b+1)}, \quad (5.15)$$

$$B_{bg} = \frac{I}{U} \frac{\sin \theta_d - \frac{\theta_d}{2}(1 + \cos \theta_d)}{\theta_d^2} \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b+1)}, \quad (5.16)$$

где 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. Для

определения пролетного угла используется промежуток взаимодействия с резонатором d . Для сеточного резонатора можно считать, что расстояние между сетками равно промежутку d . В выражениях (5.15 - 5.16) учтена релятивистская поправка, связанная с напряжением пучка согласно [66].

Для трёхмерного резонатора получить выражения реактивностей, вносимых пучком, значительно сложнее. Формулу для G_b можно найти в работе [65]:

$$G_{bc} = \frac{I}{U} M^2 \left[\left(\frac{1}{m_b^2} - \frac{\theta_b^2}{4} \right) \left(1 - \frac{\theta_d}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_d}{2} + \frac{1}{2} \theta_a^2 m_a \right) - \frac{\theta_b^2}{4} \right] \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b+1)}. \quad (5.17)$$

Здесь используются следующие обозначения: $\theta_b = \beta b$ $\theta_a = \beta a$ – пролетные углы, связанные с радиусами пучка b и вакуумной камеры a соответственно, $m_b = 2 \frac{I_1(\theta_b)}{\theta_b I_0(\theta_b)}$, $m_a = 2 \frac{I_1(\theta_a)}{\theta_a I_0(\theta_a)}$ – коэффициенты связи ($I_0(x)$ и $I_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно), а коэффициент связи пучка с резонатором

$$M = \frac{\sin\left(\frac{\theta_d}{2}\right)}{\frac{\theta_d}{2}} \frac{2I_1\left(\frac{\theta_b}{\gamma_b}\right)}{\frac{\theta_b}{\gamma_b} I_0\left(\frac{\theta_b}{\gamma_b}\right)}.$$

В формулу (5.17) также включена релятивистская поправка.

В выражении (5.17), как и в (5.15), используется пролетный угол взаимодействия с резонатором θ_d . Объемный резонатор имеет зазор, связывающий его с пролетным каналом (см. рисунок 5.1), но, в отличие от сеточного резонатора, поле взаимодействия с пучком здесь не сосредоточено в зазоре. Эффективная длина, на которую распространяется электрическое поле резонатора, значительно больше, чем зазор резонатора, что представляет определенную трудность при расчете.

Практически во все выражения (5.1 - 5.17) входит напряжение пушки клистрона (энергия, приобретаемая пучком). В нашем случае анодное напряжение пушки 350 кВ и ток пучка 350 А. Для строгого анализа необходимо учесть провисание напряжения, вызванное зарядом тока пучка. Дополнительное моделирование показало, что уменьшение напряжения не превышает 3% и не оказывает существенного влияния на параметры резонатора и далее мы им пренебрегаем.

В результате моделирования резонатора с рисунка 5.6 были получены следующие параметры:

- характеристическое сопротивление $\rho = 68 \text{ Ом}$,
- шунтовое сопротивление $R_{sh} = 0.72 \text{ МОм}$,
- собственная добротность $Q_0 = 5430$.

Расчетное распределение поля на оси возбуждающего резонатора клистрона ИЯФ СО РАН показано на рисунке 5.8. Радиус пролетного канала $a = 15.85 \text{ мм}$. Длина зазора связи с пролетной камерой 9 мм .

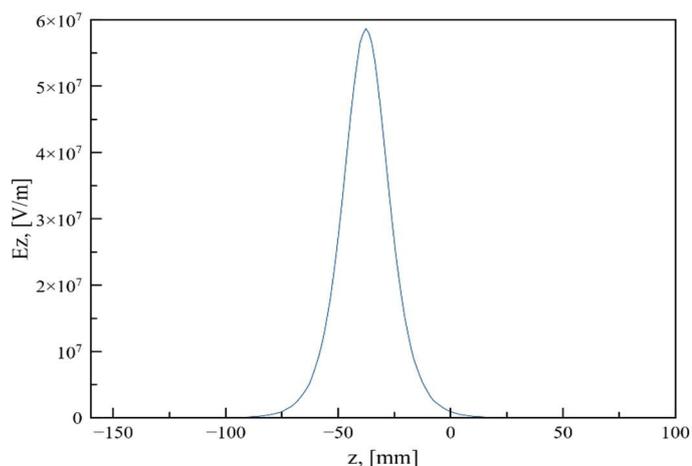


Рисунок 5.8 - Распределение электрического поля на оси возбуждающего резонатора клистрона ИЯФ СО РАН при запасенной энергии 1 Дж

Из рисунка 5.8 видно, что электрическое поле заметно «вываливается» за пределы зазора (9 мм) связи резонатора с пролетной камерой. Поэтому, чтобы воспользоваться выражением (5.17), за размер промежутка взаимодействия пучка с полем, определяющего пролетный угол θ_a , была выбрана ширина на полувысоте распределения электрического поля, показанного на рисунке 5.8 - $d = 24 \text{ мм}$, что соответствует пролетному углу $\theta_a = 102^\circ$. Поперечные пролетные углы, используемые в (5.17) и связанные с размерами вакуумной камеры и пучка, находились следующим образом. Первый угол фиксирован радиусом пролетного канала $a = 15.85 \text{ мм}$. Угол θ_b определялся, исходя из радиуса пучка $b = 11 \text{ мм}$. Моделирование динамики пучка в пушке клистрона показало именно такой радиус в районе возбуждающего резонатора для наиболее гладкой огибающей пучка в клистроне. Полученный размер пучка связан с выбранным магнитным полем и, вообще говоря, может изменяться при варьировании амплитуды поля. Для полного прохождения тока пучка величина b способна меняться в пределах $b = 8 \div 14 \text{ мм}$ в

районе возбуждающего резонатора. При этом пульсации амплитуды радиуса пучка вдоль всего клистрона будут не более 2.5 мм. Рабочий диапазон радиусов в первом резонаторе может отличаться от расчетного значения, а магнитное поле может изменяться для получения максимальной выходной СВЧ мощности и устойчивости пучка. Тем не менее, для первоначального анализа радиус пучка в возбуждающем резонаторе принят равным $b = 11$ мм.

На рисунке 5.9 показана зависимость активной проводимости первого возбуждающего резонатора клистрона для разных значений тока пучка, полученных с помощью (5.17) при постоянном первеансе пушки клистрона $P_\mu = 1.7$ мкА/В^{1.5}, который соответствует току 350 А и напряжению 350 кВ.

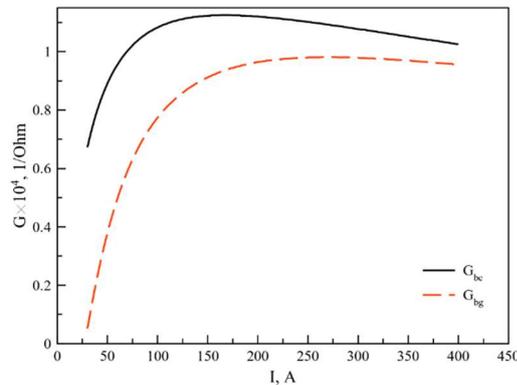


Рисунок 5.9 - Активная проводимость в зависимости от тока пучка ($P_\mu = 1.7$ мкА/В^{1.5}). Сплошная линия получена для объемного резонатора по (5.17), пунктирная – для сеточного по (5.15)

На этом же рисунке показана активная проводимость, полученная с помощью выражения для сеточного резонатора (5.15). При этом пролетный угол θ_b подбирался для достижения наилучшего согласования с выражением (5.17). В итоге значение пролетного угла для (5.15) составило 204° против 102° для (5.17), то есть эффективная длина взаимодействия для сеточного зазора в два раза больше, чем для объемного резонатора, что согласуется с результатами работы [67]. Из графиков рисунка (5.4) видно, что лучшее согласование достигается в области больших токов и, соответственно, высоких напряжений. При токе пучка клистрона $I = 350$ А и напряжении катода $U = 350$ кВ разница между активными проводимостями для трехмерного и сеточного приближений модели резонатора составляет около 7%.

Проведенное сравнение с результатами, представленными на рисунке 5.9, позволяет уточнить величину изменения частоты резонатора из-за емкостного характера пучка, которое можно найти, используя выражение реактивной проводимости (5.10). Его вывод для трехмерного резонатора затруднителен, поэтому можно воспользоваться (5.16) для сеточного резонатора, используя подобранный пролетный угол и эффективный промежуток взаимодействия из графиков рисунка 5.9.

Рисунок 5.10 демонстрирует изменение частоты входного резонатора для разных токов пучка при постоянном первеансе $P_\mu = 1.7 \text{ мкА/В}^{1.5}$, найденное с помощью (5.5). Из графика видно, что при напряжении 350 кВ максимальное изменение частоты для тока 350 А составляет примерно 2 МГц. Напомним, что именно при высоких напряжениях наблюдается наилучшее согласование между активными проводимостями рисунка 5.9.

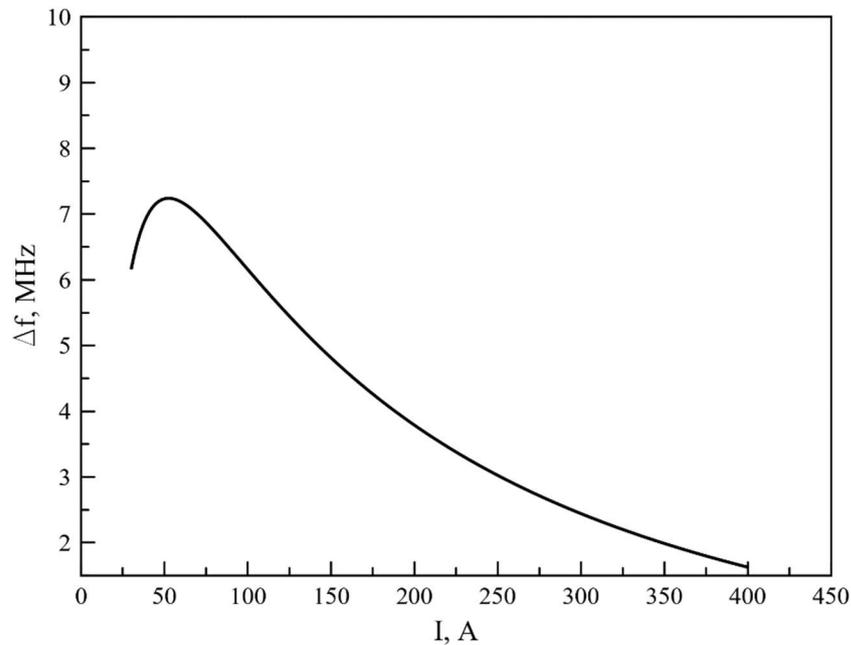


Рисунок 5.10 - Изменение частоты резонатора от тока пучка ($P_\mu = 1.7 \text{ мкА/В}^{1.5}$)

Теперь с помощью выражения (5.9) можно оценить реактивную составляющую проводимости резонатора, настроенного с учетом изменения частоты с рисунка 5.10, для $I_0 = 350 \text{ А}$ и $U_0 = 350 \text{ кВ}$, что соответствует микропервеансу $P_\mu = 1.7 \text{ мкА/В}^{1.5}$ и расстройке резонатора $|\delta\omega| = 6.9 \cdot 10^{-4}$. Именно при этих значениях параметров пучка реактивная составляющая проводимости равна нулю. На рисунке 5.11 показаны графики зависимости

коэффициента отражения (5.11) от внешней добротности резонатора для разных значений токов пучка.

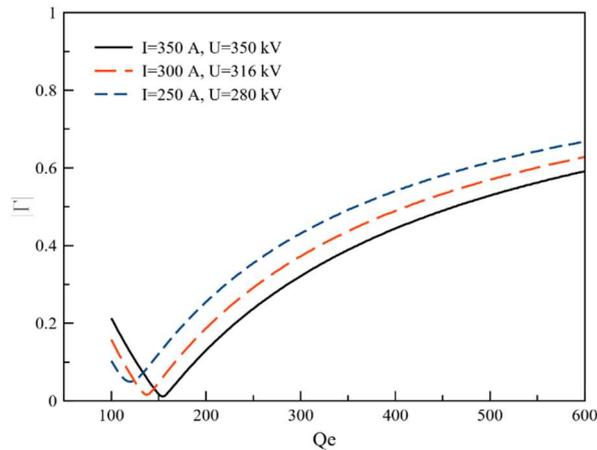


Рисунок 5.11 - Зависимость коэффициента отражения от внешней добротности резонатора при фиксированных значениях расстройки и первеанса

Из рисунка 5.11 видно, что отражение минимально вблизи значения внешней добротности $Q_e \approx 130$. Результаты получены при фиксированной расстройке резонатора, а значит, при токах отличных от $I_0 = 350$ А появится отражение электромагнитной волны. Однако даже для тока 250 А мощность отраженного сигнала $< 1\%$. При расчетной собственной добротности резонатора $Q_0 = 5430$ и внешней $Q_e \approx 130$, коэффициент связи должен быть равен $\beta = 41.8$. На левом рисунке 5.12 показано среднеквадратичное напряжение (5.14), действующее на пучок при пролете резонатора с $Q_e \approx 130$ и фиксированных выше расстройке и первеансе.

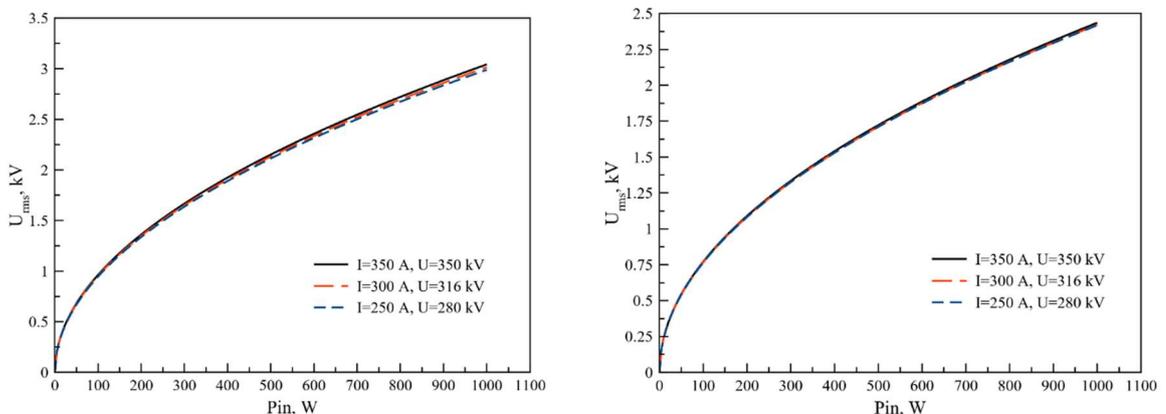


Рисунок 5.12 - Среднеквадратичное напряжение, действующее на пучок, в зависимости от входной мощности при внешней добротности $Q_e \approx 130$ (слева) и $Q_e \approx 543$ (справа)

Видно, что напряжение почти не зависит от тока и, например, при входной СВЧ мощности 500 Вт составляет ≈ 2 кВ.

В реальности с учетом конструкции резонатора и ввода мощности достичь значений коэффициента связи $\beta = 41.8$ и внешней добротности $Q_e \approx 130$ затруднительно. Коэффициент связи будет значительно меньше вычисленного для минимального отражения и близким к $\beta = 10$. Тогда внешняя добротность составит $Q_e = 543$, а отражение по мощности, согласно графикам рисунка 5.4.6, будет около 36%. Этот случай показан на правом рисунке 5.12, и тогда при входной мощности 500 Вт среднеквадратичное изменение энергии пучка составит около 1.7 кэВ.

5.5 Расчет канала группировки клистрона

В клистроне расположены шесть резонаторов, включая возбуждающий и выходной. Общий вид клистрона представлен на рисунке 5.13. Расчет группировки пучка производился несколькими методами. Для аналитического исследования использовались методы, изложенные в [68]. Возбуждающий резонатор определяет исходные данные, связанные с начальной модуляцией тока пучка. Для этого используется расчет, приведенный в разделе 5.4. Ниже обсуждаются основные формулы и алгоритм расчета системы группировки клистрона, состоящего из N резонаторов, где $i = 1..N$ – обозначает номер резонатора.

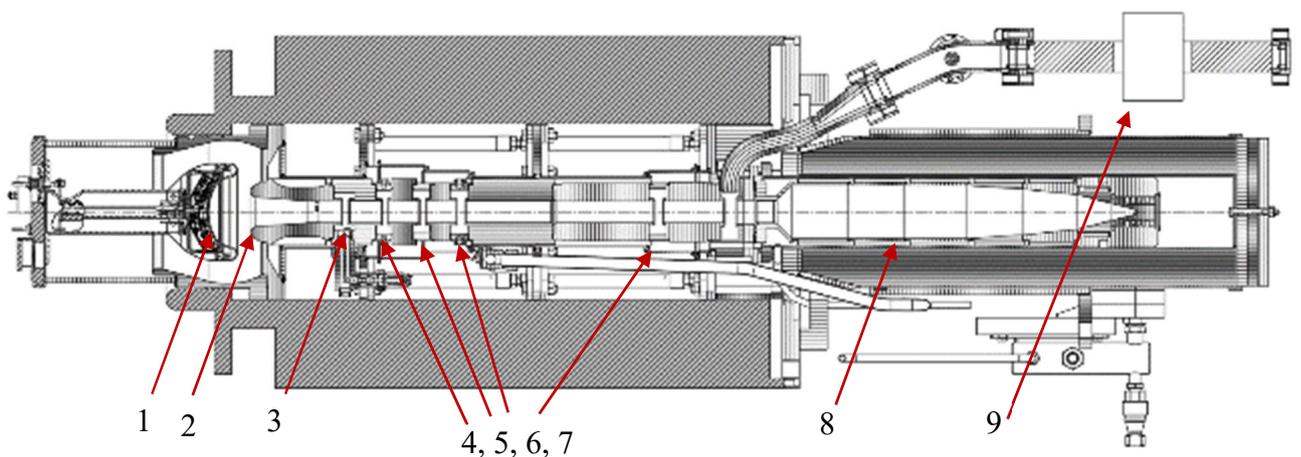


Рисунок 5.13 – Общий вид клистрона: 1 – катод, 2 – анод, 3 – первый возбуждающий резонатор, 4-7 – пассивные группирующие резонаторы (№ 2-5 соответственно), 8 – коллектор, 9 – выходное волноводное СВЧ окно

С учетом напряжения первого возбуждающего резонатора определяются коэффициенты скоростной модуляции для каждого зазора резонатора:

$$v_i = \frac{1}{2} k_r M_i^2 I_{m_{i-1}} G_0 R_i \cos(\varphi_i), \quad (5.18)$$

где M_i – коэффициент связи пучка с полем резонатора, $G_0 = I_b/U_b$ – проводимость пучка (I_b – ток пучка, U_b – потенциал пучка с учетом провисания), k_r – коэффициент релятивистской поправки, R_i – полное активное сопротивление резонатора, φ_i – фазовый угол расстройки резонатора, $I_{m_i} = I_i/I_b$ – отношение первой гармоники пучка к полному току пучка. Если речь идет о первом резонаторе, куда попадает пучок без модуляции, то коэффициент скоростной модуляции можно представить в виде

$$v_1 = \frac{M_1 V_1}{2 U_b} k_r, \quad (5.19)$$

где V_1 – напряжение в первом резонаторе, полученное в разделе 5.4, а в общем виде V_i – напряжение в i -м резонаторе

$$V_i = I_b M_i \chi_{i-1} R_i \cos(\varphi_i), \quad (5.20)$$

где $i \geq 2$, а χ_{i-1} – параметр группировки пучка в дрейфовом промежутке перед резонатором

$$\chi_i = \frac{v_i}{a_q} \sin(a_q \zeta_{0i}), \quad (5.21)$$

a_q – параметр расталкивания, ζ_{0i} – угол пролета промежутка дрейфа

$$\zeta_{0i} = \frac{L_i \omega_0}{\beta_b c}, \quad (5.22)$$

L_i – длина промежутка дрейфа, ω_0 – рабочая круговая частота, β_b – скорость пучка с учетом его потенциала. Зная параметр группировки можно найти первую гармонику тока пучка при его модуляции в линейном приближении

$$I_i = I_b \chi_{i-1}, \quad (5.23)$$

которая, собственно, и входит в выражение напряжения на резонаторе (5.20).

Для полного описания выражений (5.18 - 5.23) нам понадобятся коэффициент релятивистской поправки

$$k_r = \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}, \quad (5.24)$$

где релятивистский фактор γ_b находится с учетом потенциала пучка U_b и полное активное сопротивление резонатора

$$R_i = \frac{1}{1/\rho_i Q_{0i} + G_{bi}}, \quad (5.25)$$

где ρ_i – характеристическое сопротивление резонатора (5.1), Q_{0i} – собственная добротность резонатора, G_{bi} – активная проводимость, вносимая пучком в резонатор (5.17).

Для определения параметра расталкивания a_q в (5.21) необходимо найти коэффициент редукции плазменной частоты R_p

$$R_p^2 = 4 \left[\frac{J_1(2.405 \frac{b}{a})^2}{2.405^2 J_1(2.405)^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{2.405}{\theta a}\right)^2\right)} + \frac{J_1(5.527 \frac{b}{a})^2}{5.527^2 J_1(5.527)^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{5.527}{\theta a}\right)^2\right)} \right], \quad (5.26)$$

где J_1 – функция Бесселя первого порядка, тогда

$$a_q = \frac{R_p}{\gamma_b} \cdot \left(\frac{2}{1+\gamma_b}\right)^{1/4}. \quad (5.27)$$

Фазу колебания пучка в резонаторе φ_i в (5.18) и (5.20) можно выразить через полные активные и реактивные проводимости резонаторов:

$$\varphi_i = \arctg \left(\frac{B_i + B_{bi}}{\frac{1}{R_i} + G_{bi}} \right), \quad (5.28)$$

$$B_i = \frac{\omega_0^2 - \omega_i^2}{\omega_0 \omega_i} \cdot \frac{1}{\rho_i Q_{0i}}, \quad (5.29)$$

где B_i – реактивность, а ω_i – круговая частота i -го резонатора, R_i и G_{bi} определяются согласно (5.25) и (5.17). В разделе 5.4 для первого возбуждающего резонатора рассматривалась реактивная составляющая проводимости, вносимая пучком, B_{bi} и было показано, что для катодного напряжения ≈ 350 кВ в разумном приближении можно воспользоваться выражением для сеточного резонатора (5.16), используя в качестве зазора между сетками эффективную длину взаимодействия электрического поля с пучком.

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}

$$a_{qn} = f_a(\theta)a_q, \quad (5.30)$$

где $f_a(\theta)$ зависит от угла θ , который определяется отношением второй гармоники тока к первой

$$\cos\theta = \frac{J_2(2\chi_{N-1})}{J_1(\chi_{N-1})}, \quad (5.31)$$

где коэффициент группировки χ_{N-1} находится согласно (5.21). После этого можно найти $f_a(\theta)$ и подставить в (5.30):

$$f_a(\theta) = 0.705 \left[1 + \frac{\pi}{2\theta} (1 - e^{-4.8\theta/\theta_a}) \right]^{1/2}. \quad (5.32)$$

С учетом уже нового увеличенного параметра расталкивания вычисляется уточненный коэффициент группировки для последнего пространства дрейфа:

$$\chi_{N-1} = \frac{\nu_{N-1}}{a_{qn}} \sin(a_{qn}\zeta_{0i}) + I_{m_{N-1}} \left(1 - \cos(a_{qn}\zeta_{0_{N-1}}) \right). \quad (5.33)$$

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

$$\eta_e = J_1(\chi_{N-1}) \left(1 + \frac{I_{m_{N-2}}}{\chi_{N-1}} \right) \xi, \quad (5.34)$$

где ξ – коэффициент использования ускоряющего напряжения. Его можно найти, если знать минимальную относительную скорость электронов в выходном резонаторе:

$$\beta_{bmin} = \beta_b - |\beta_{bmax}|, \quad (5.35)$$

где β_{bmax} – максимум выражения

$$\beta(t) = - \left[a_{qn} I_{m_{N-1}} \left(\sin(a_{qn}\zeta_{0_{N-1}}) - a_{qn} \chi_{N-1} \sin(a_{qn}\zeta_{0_{N-1}}) \sin(\omega_0 t) - \left(\cos(a_{qn}\zeta_{0_{N-1}}) + a_{qn} \chi_{N-1} \sin(a_{qn}\zeta_{0_{N-1}}) \sin(\omega_0 t) \right) \right) \right] \beta_b \sin(\omega_0 t). \quad (5.36)$$

Таким образом,

$$\xi = \left(\frac{\beta_{bmin}}{\beta_b} \right)^2. \quad (5.37)$$

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

$$\eta_c = 1 - \frac{R_{LN}}{R_N}, \quad (5.38)$$

$$\eta = \eta_e \eta_c = J_1(\chi_{N-1}) \left(1 + \frac{I_{m_{N-2}}}{\chi_{N-1}}\right) \left(1 - \frac{R_{LN}}{R_N}\right) \xi, \quad (5.39)$$

где R_{LN} – нагруженное сопротивление выходного N -го резонатора.

Общий вид клистрона представлен на рисунке 5.13. Возбуждающий резонатор подробно обсуждается в разделе 5.4. Для последующих пассивных группирующих резонаторов на рисунке 5.14 приведены распределения полей на оси клистрона. Собственные добротности Q_{0i} и характеристические сопротивления ρ_i для каждого из резонаторов соответственно составили (i – номер резонатора): $Q_{02} = 6940$ и $\rho_2 = 67.3$ Ом, $Q_{03} = 6900$ и $\rho_3 = 73.8$ Ом, $Q_{04} = 7790$ и $\rho_4 = 86.5$ Ом, $Q_{05} = 8520$ и $\rho_5 = 91.7$ Ом.

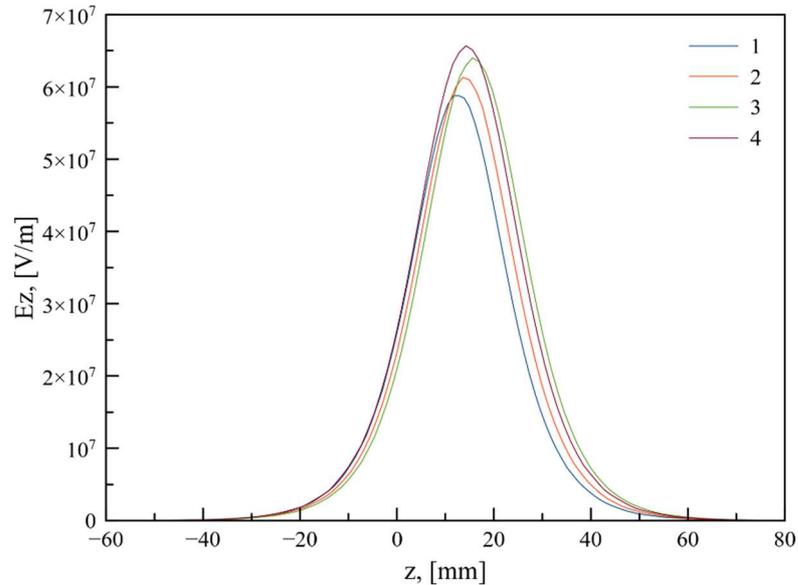


Рисунок 5.14 – Распределения электрических полей на оси резонаторов при запасенной энергии 1 Дж: 1- резонатор 2 (№ 4 на рисунке 5.13), 2 – резонатор 3 (№ 5 на рисунке 5.13), 3 – резонатор 4 (№ 6 на рисунке 5.13), 4 – резонатор 5 (№ 7 на рисунке 5.13)

С учетом полученных параметров резонаторов, согласно приведенному выше анализу для клистрона с током пучка 350 А и напряжением катода 350 кВ, были получены значения напряжений в резонаторах (5.20), параметров группировки (5.21) и амплитуды токов первой гармоники модуляции пучка (5.23), приведенные в таблице 5.2. Напряжение в первом возбуждающем резонаторе было получено в разделе 5.4. Для согласованного с пучком

выходного резонатора с учетом (5.38) 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 (см. раздел 5.4), коэффициент усиления составил 50.2 дБ, а КПД – 42.4%.

Таблица 5.2 – Результаты расчета системы группировки пучка в клистроне

Номер резонатора	Напряжение в резонаторе, кВ	Параметр группировки после i -го резонатора χ_i	Ток первой гармоники модуляции пучка, А
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

Кроме полученных значений было замечено, что выходная СВЧ мощность достаточно сильно зависит от радиуса пучка. Например, при радиусе 10 мм, мощность падает до 47 МВт, а при радиусе 12 мм – возрастает до 55 МВт. Данный результат может быть полезен при эксперименте с изготовленным клистроном, однако, нужно понимать, что простое увеличение размера пучка с помощью понижения магнитного поля будет приводить к поперечным пульсациям пучка и стать источником различных нестабильностей.

Для надежности, помимо теоретических оценок по результатам материала [68], система группировки рассчитывалась численно с помощью одномерного кода VIDISK [69], и 3D кода CST-Studio [33]. Последнее моделирование включало не только систему группировки, но весь клистрон целиком с учетом катодного узла и реалистичного распределения магнитного поля. Вид канала группировки клистрона с пучком из моделирования на CST-Studio представлен на рисунке 5.15. Теоретический анализ и одномерный численный расчет не учитывали поперечную динамику электронов и выполнялись для радиуса пучка $b = 11$ мм. В итоге, на рисунке 5.16 приведены полосовые характеристики коэффициента усиления клистрона. Все расчеты неплохо

совпадают, что повышает доверие к полученным результатам, и дают коэффициент усиления около 50 дБ в широкой полосе частот.

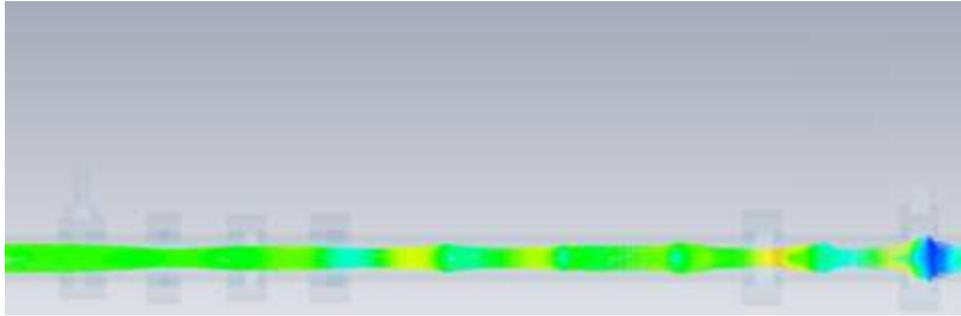


Рисунок 5.15 – Динамика частиц в клистроне

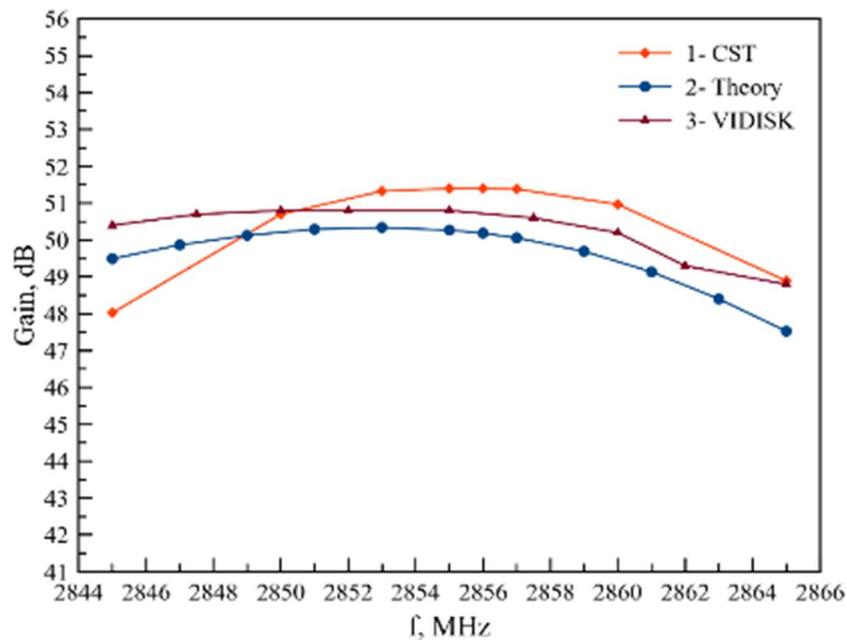


Рисунок 5.16 - Коэффициент усиления клистрона при токе пучка 350 А и напряжении 350 кВ: 1 – моделирование программой CST-Studio, 2 – теоретическая оценка, 3 – одномерный численный расчет с помощью кода VIDISK

5.6 Изготовление клистрона

Прототип клистрона было решено делать модульным [70, 71], чтобы производить быструю замену ключевых элементов – катодного узла, системы группировки, приемного коллектора и выходного вакуумного волноводного окна. Все перечисленные элементы

соединяются вакуумными фланцами с медным уплотнением типа CF. Предусмотрен порт для постоянной вакуумной откачки, который располагается перед выходным волноводным вакуумным окном. Готовый прототип клистрона показан на рисунке 5.17.



Рисунок 5.17 - Изготовленный клистрон

Катодный узел клистрона должен обеспечивать ток до 350 А при анодном напряжении 350 кВ. В качестве высоковольтного изолятора используется цилиндрическая керамика ВК-100 высотой около 200 мм. Разобранный катодный узел показан на рисунке 5.18. С одного торца катодного узла располагается вакуумный фланец типа CF-200, с другой – элементы ввода накала катода и юстировочные мембраны.



Рисунок 5.18 - Изготовленный катодный узел

Диспенсерный катод крепится внутри катодного узла на катодной «ноге»-кронштейне. Положение катода регулируется с помощью юстировочных мембран. Питание накала подается через вакуумные вводы с керамической развязкой. Сам катод изготовлен компанией ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» и имеет сферическую поверхность диаметром около 88 мм.

Система группировки пучка (рисунок 5.19) состоит из возбуждающего резонатора, четырех пассивных и выходного резонаторов. Первый резонатор имеет возбуждающую петлю, которая соединяется с коаксиалом через вакуумную развязку. Выходной резонатор соединен с волноводом через окно связи. Для компенсации искажения электромагнитного поля, вызванного элементом связи, резонатор имеет асимметричную форму.



Рисунок 5.19 - Система группировки пучка в клистроне

На рисунке 5.20 показан возбуждающий резонатор в составе клистрона. Как было сказано выше, для настройки коэффициента связи используется центральный штырь СВЧ ввода мощности. Для коррекции частоты резонатора имеются специальные места, подготовленные для деформации.

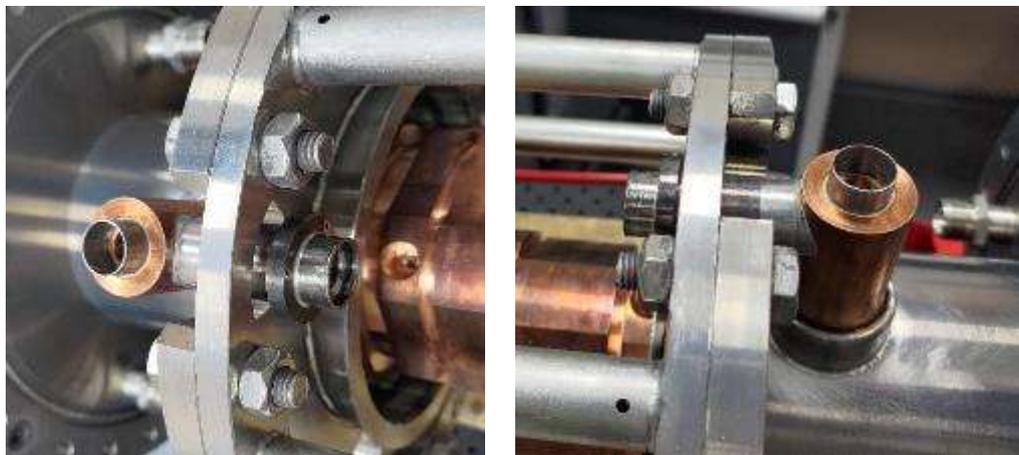


Рисунок 5.20 - Возбуждающий резонатор в составе клистрона

Коллектор клистрона (рисунок 5.21) служит для поглощения пролетевшего пучка; в его конструкции учитывается требование минимизации потока отраженных электронов.



Рисунок 5.21 - Изготовленный коллектор клистрона

Внешняя часть коллектора представляет собой радиатор для эффективного снятия выделяющегося тепла водой внешнего контура охлаждения.

Выходное окно вывода СВЧ мощности клистрона [72, 73, 74] представляет собой волноводное СВЧ-окно с бегущей волной в керамике (окно бегущей волны). Конструкция окна позволяет пропускать высокую мощность за счет пониженной по сравнению с распространенным баночным окном напряженностью электрического поля на керамике. Это позволяет упростить узел и использовать одно окно вместо волноводного делителя-сумматора с двумя баночными окнами. Окно (рисунок 5.22) крепится с помощью волноводных вакуумных фланцев и охлаждается водой. Значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) окна в рабочей полосе частот клистрона не превышает 1.2.



Рисунок 5.22 - Волноводное вакуумное СВЧ окно с бегущим типом волны

В процессе изготовления клистрона проводился мониторинг параметров резонаторов в процессе всего изготовления. Окончательная настройка и измерения проводились после последней пайки резонаторов. В результате были измерены добротности резонаторов, приведенные в таблице 5.3. Добротность выходного резонатора измерить не получилось из-за большой связи с выходным волноводом. Из таблицы видно, что добротность всех резонаторов достаточно близка к результатам моделирования, за исключением возбуждающего резонатора. Это может быть связано с процессом изготовления, в особенности с процессом пайки петли связи. В этом случае практически невозможно контролировать припой внутри резонатора, что может приводить к его выходу на стенки и, соответственно, к увеличению омических потерь и ухудшению добротности.

Таблица 5.3 – Измеренные и расчетные добротности резонаторов

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

5.7 Исследование параметров клистрона

Для тестовых испытаний клистрона, разработанного в ИЯФ СО РАН, был создан измерительный стенд, показанный на рисунке 5.23. Выходная мощность клистрона поступает в согласованную водяную нагрузку, перед которой располагается калиброванный волноводный ответвитель. Перед волноводным вакуумным окном также имеется ответвитель для

мониторинга процессов в области вывода СВЧ мощности. Пролетная и группирующая часть клистрона помещены в соленоид. Высокое катодное напряжение подается от импульсного трансформатора, размещенного в масляном баке. Оно формируется модулятором на основе формирующей линии. Напряжение накала катода создается накальным трансформатором, также размещённым внутри маслonaполненного танка.



Рисунок 5.23 - 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

На рисунке 5.24 приведена достигнутая вольтамперная характеристика клистрона. Видно, что полученный ток меньше расчетного (см. рисунок 5.1). Измеренный микроперванс составил $1.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ вместо $1.8 \text{ мкА/В}^{3/2}$ расчетного значения.

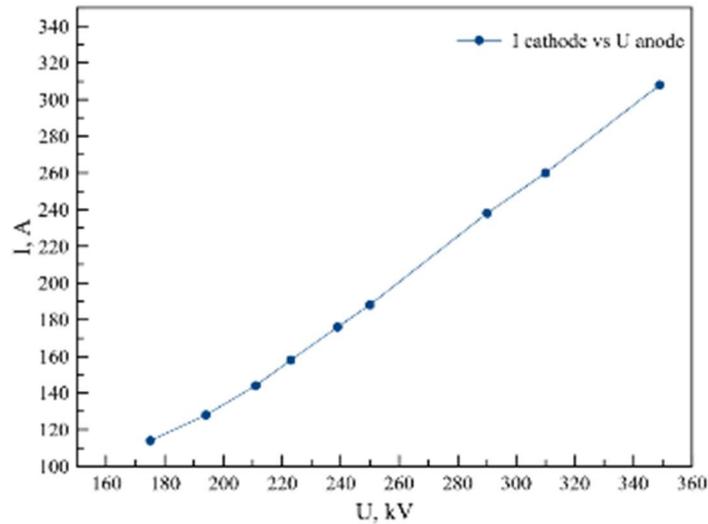


Рисунок 5.24 - Измеренная вольтамперная характеристика изготовленного клистрона

Одна из возможных причин уменьшения первеанса – ошибка выставки катода по отношению к аноду. Оценки показывают, что при ошибке расстояния между катодом и анодом в 1 мм микропервеанс снижается с $1.8 \text{ мкА/В}^{3/2}$ до $1.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$. В итоге был достигнут ток 310 А. Осциллограмма 5.25 демонстрирует импульс анодного напряжения и тока пучка.

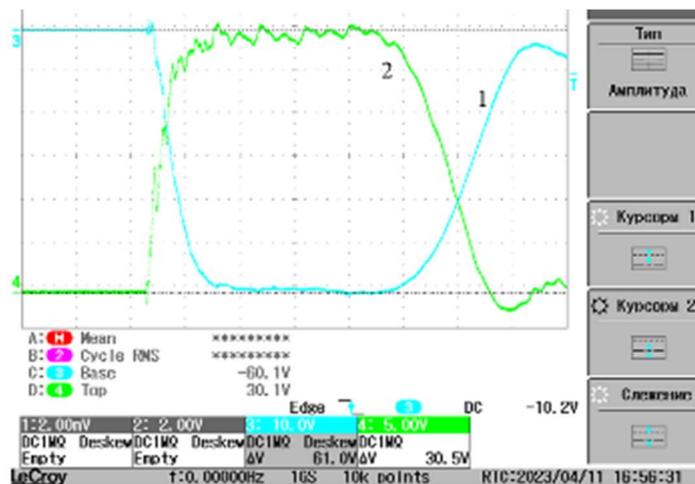


Рисунок 5.25 - Осциллограммы катодного напряжения клистрона 350 кВ (1) и тока пучка 310 А (2)

С учетом уменьшенной измеренной добротности возбуждающего резонатора (см. таблицу 5.3) и тока пучка клистрона 310 А, полная добротность резонатора (5.7) увеличится, а

согласование с внешним подводным коаксиалом (5.11) улучшится. Это должно привести к увеличению напряжения в возбуждающем резонаторе (5.14) на 23%, по сравнению с результатом, приведенным в разделе 5.4. На рисунке 5.26 показана зависимость напряжения (5.14) от входной СВЧ мощности возбуждающего резонатора при новых значениях добротности и тока пучка клистрона. В итоге, несмотря на уменьшение тока пучка, степень группировки в возбуждающем резонаторе увеличится, что частично должно компенсировать уменьшение выходной СВЧ мощности клистрона.

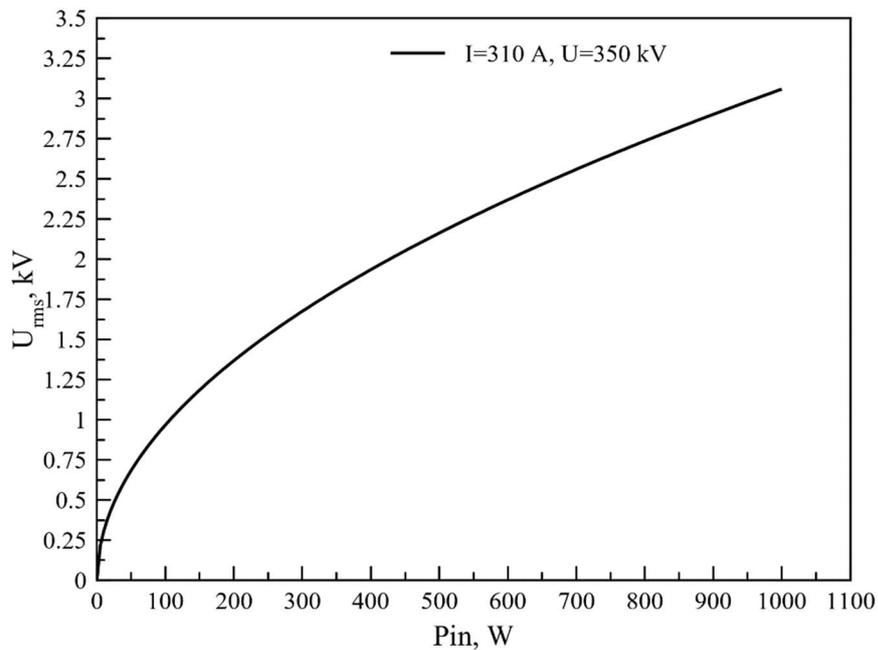


Рисунок 5.26 – Рассчитанное среднеквадратичное напряжение изготовленного резонатора при пролете тока пучка 310 А с ускоряющим напряжением между катодом и анодом 350 кВ

Согласно уточненному аналитическому расчету напряжения, наводимые в резонаторах (5.20), параметр группировки (5.21) и токи первой гармоники модулированного пучка (5.23) приведены в таблице 5.4. Сравнивая таблицы (5.2) и (5.4) можно заметить, что благодаря увеличенному напряжению в возбуждающем резонаторе параметр группировки пучка немного увеличился, но, поскольку ток первой гармоники модулированного пучка зависит от полного тока катода (5.23), абсолютное значение тока первой гармоники все-таки меньше, чем для случая с током пучка 350 А. Таким образом, согласно аналитическому расчету с новыми параметрами возбуждающего резонатора и тока пучка выходная СВЧ мощность составляет 47 МВт, что на 10% меньше, чем для пучка с током 350 А. Однако, как было замечено в разделе

5.5, 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 сделанного анализа было решено, что, несмотря на достигнутый более низкий первичный пучка по сравнению с расчетным, клистрон может обеспечить выходную СВЧ мощность в районе 50 МВт при подстройке поперечного размера пучка с помощью магнитного поля. В связи с этим было принято решение не переделывать клистрон, а использовать имеющийся клистрон с достигнутыми параметрами тока пучка.

Таблица 5.4 – Уточненные напряжения и токи первой гармоники модулированного пучка клистрона

Номер резонатора	Напряжение в резонаторе, кВ	Параметр группировки после i -го резонатора χ_i	Ток первой гармоники модуляции 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

Выходная мощность клистрона измерялась детекторной головкой через волноводный ответвитель, установленный перед согласованной нагрузкой; оба устройства предварительно были откалиброваны. Точность калибровки волноводного ответвителя составляет ± 0.37 дБ.

В процессе работы была выявлена зависимость выходной СВЧ мощности от магнитного поля соленоида, то есть от поперечного размера пучка, как и было предсказано при теоретическом анализе и моделировании в разделе 5.5. При этом сильное увеличение размера пучка приводило к появлению неустойчивостей в выходном СВЧ сигнале. Магнитное поле подбиралось экспериментально таким образом, чтобы выходная СВЧ мощность была

максимальной без паразитных возбуждений. В итоге, измеренная зависимость выходной СВЧ мощности клистрона от входной представлена на рисунке 5.27 [71].

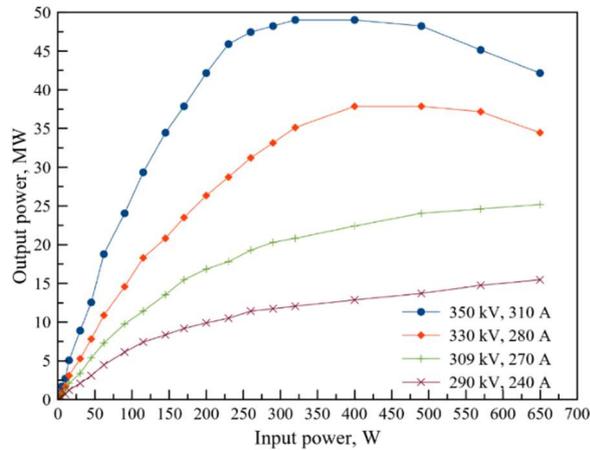


Рисунок 5.27 – Зависимость выходной импульсной СВЧ мощности клистрона от входной при разных токах пучка клистрона

Из рисунка 5.27 видно, что достигнутая выходная СВЧ мощность клистрона ИЯФ СО РАН составляет около 50 МВт. С учетом калибровки волноводного ответвителя, можно сказать, что точность этого измерения составляет $\pm 8\%$. Кроме того, видно, что насыщение происходит при входной мощности >400 Вт. Длительность импульса тока 1.5 мкс ограничена длительностью импульса катодного напряжения. Огибающие СВЧ импульса с диодной головки показаны на рисунке 5.28 [71].

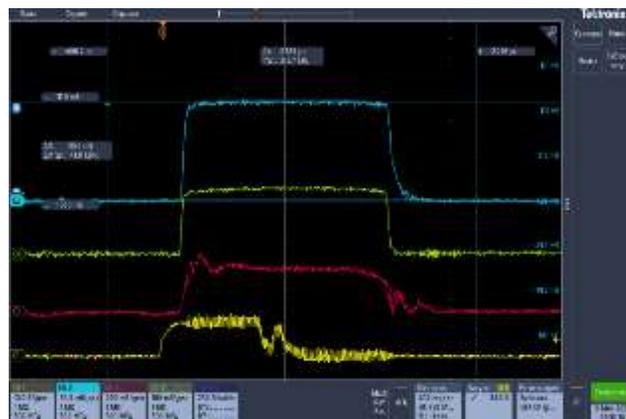


Рисунок 5.28 - Оциллограммы сверху вниз: синяя – огибающая СВЧ мощности в нагрузке, зеленая – огибающая выходной СВЧ мощности перед выходным вакуумным окном, красная – огибающая СВЧ сигнала, отраженного в клистрон вакуумным окном, желтая – импульс запуска

Рисунок 5.29 показывает отраженный сигнал от первого возбуждающего резонатора с пучком в клистроне и включенным магнитным полем соленоида. Видно, что СВЧ мощность поглощается пучком, что свидетельствует о правильно подобранных характеристиках возбуждающего резонатора.

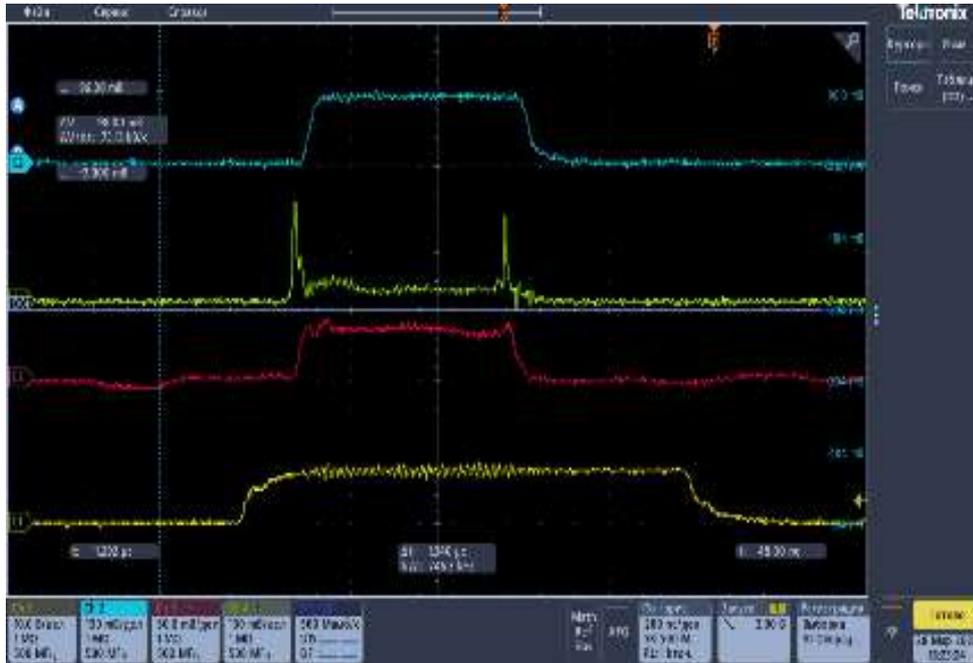


Рисунок 5.29 - Огибающая отраженного сигнала из резонатора с магнитным полем соленоида; ток пучка 300 А. Сверху вниз: синий – сигнал в нагрузке после вакуумного СВЧ окна, зеленый – отраженный сигнал из резонатора, красный – отраженный сигнал от СВЧ окна, желтый – импульс запуска

Левый рисунок 5.30 воспроизводит измеренную частотную полосу клистрона и рассчитанную на CST-Studio с учетом измеренных параметров изготовленного клистрона, а правый показывает измеренную зависимость выходной СВЧ мощности от напряжения клистрона. Видно, что в полосе ± 4 МГц, выходная мощность не меняется. Коэффициент усиления составляет 51 дБ [71]

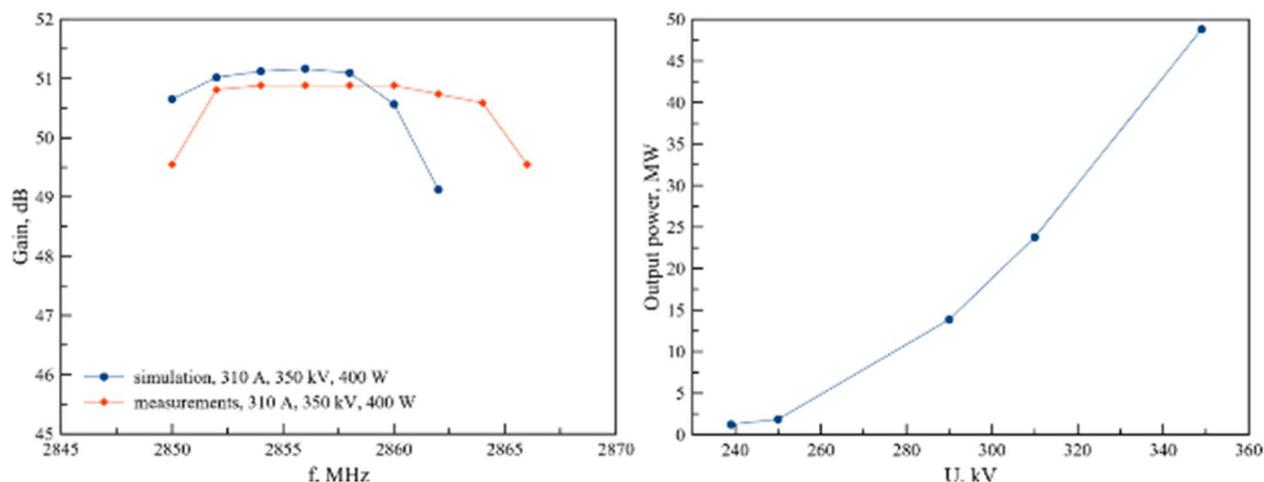


Рисунок 5.30 - Слева – полоса частот клистрона измеренная (красная кривая) и рассчитанная численным моделированием (синяя кривая). Справа – измеренная выходная импульсная СВЧ мощность в зависимости от анодного напряжения при входной мощности 400 Вт

Достигнутые параметры клистрона приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Достигнутые параметры первого мощного клистрона, разработанного в ИЯФ СО РАН для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Частота	2856±4 МГц
Выходная импульсная мощность	50±4 МВт
Входная мощность	350 Вт
Длительность СВЧ импульса	1.5 мкс
Частота повторения	≤5 Гц
Ток пучка	310 А
Напряжение анода	350 кВ

Отметим, что для источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» требуются три клистрона. Кроме того, в подобных клистронах нуждаются другие ускорительные проекты, реализуемые или планирующиеся в России. Поэтому совершенствование и изготовление мощных клистронов, разработанных в ИЯФ СО РАН, продолжается. На момент написания этого текста готовы и испытаны следующие два клистрона серии. Для них были точнее оптимизированы частоты резонаторов и уменьшен зазор между катодом и анодом. Это привело

к увеличению эмиссии тока катода, как и ожидалось. Микропервеанс пушек стал равен $1.7 \text{ мкА/В}^{3/2}$, вместо $1.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ предшествующего прототипа.

Рисунок 5.31 показывает характерные осциллограммы тока и напряжения, а 5.32 – измеренную выходную СВЧ мощность одного из следующих клистронов. Измерения производились с помощью нового волноводного ответвителя, точность калибровки которого составила $\pm 0.1 \text{ дБ}$, что соответствует $\pm 2.3\%$ по мощности. Из рисунка 5.32 видно, что при токе пучка 330 А достигнута выходная мощность клистрона 58 МВт , превышающая требующуюся для линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».



Рисунок 5.31 - Осциллограммы: желтая – напряжение с модулятора клистрона, голубая – ток катода. Микропервеанс равен $1.7 \text{ мкА/В}^{3/2}$

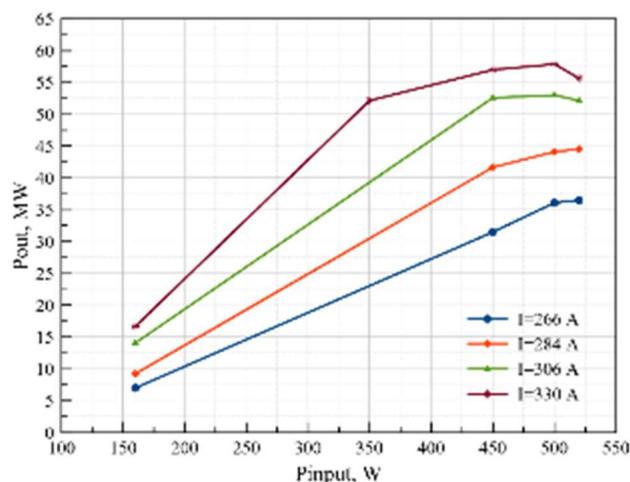


Рисунок 5.32 - Измеренная выходная СВЧ мощность клистрона в зависимости от входной мощности для разных токов пучка. Точность измерения $\pm 2.3\%$

Для третьего клистрона измерения для различных токов не были получены в момент написания работы, но максимальное измеренное значение выходной СВЧ мощности было достигнуто равным 58 МВт. Такому значению соответствует осциллограмма напряжения детектора волноводного ответвителя, показанная на рисунке 5.33.



Рисунок 5.33 –Осциллограммы детекторов: 1 (желтый сигнал) – огибающая падающей в согласованную нагрузку СВЧ мощности, 2 (синий сигнал) – огибающая отраженной от входного резонатора СВЧ мощности, 4 (зеленый сигнал) – контрольный сигнал работы возбуждающего усилителя

5.8 Заключение к Главе 5

Поскольку в ИЯФ СО РАН имеется богатый опыт эксплуатации клистронов SLAC 5045, то именно он был выбран за основу собственного клистрона. Разработанная аналитическая модель позволила определить начальные данные системы группировки пучка, которые в дальнейшем были проверены различными моделированиями. Кроме этого, разработанная модель позволила проанализировать влияние различных параметров клистрона на выходную СВЧ мощность. Было показано, что, например, изменение поперечного размера пучка влияет на выходную СВЧ мощность, а снижение значения тока пучка и добротности возбуждающего резонатора позволяет увеличить его результирующее напряжение, что также сказывается на процессе группировки пучка. Такой анализ в дальнейшем позволил быстро объяснять

некоторые процессы, связанные с изготовлением и работой клистрона и быстро принимать оптимальное решение.

В итоге были определены все элементы клистрона, включая катодный узел, систему группировки, коллектор, магнитную систему. Для быстрой замены и ремонта катодного узла, канала группировки и коллектора новый клистрон решено было изготавливать модульным. Такой подход не является распространённым, но при этом сильно уменьшил стоимость разработки и пригодился во время отработки отдельных систем клистрона.

Расчитанный и разработанный клистрон, был реализован и выведен на максимальные выходные параметры. Измерения тока катода и напряжения показали, что достигнутый переанс пучка меньше расчетного. Проведенный анализ позволил заключить, что, тем не менее, есть режим эксплуатации клистрона, который должен обеспечить выходную СВЧ мощность в районе 50 МВт. Дальнейшие измерения показали, что, действительно, достигнута выходная СВЧ мощность 50 МВт при рабочей частоте 2856 МГц. Кроме этого, запуск второго и третьего клистронов, не только позволил исправить некоторые допущенные ранее ошибки, например, связанные с выставкой катода, но и оптимизировать частотные характеристики резонаторов канала группировки, что позволило получить СВЧ мощность более 50 МВт.

Разработка такого клистрона является одним из ключевых моментов создания линейного ускорителя ЦКП «СКИФ», поскольку зарубежные клистроны такого типа в настоящее время недоступны. Данный клистрон является неотъемлемой частью ускорителя, без которого его запуск невозможен. В итоге были изготовлены все клистроны, необходимые для запуска линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Глава 6. Стенд ЛИНАК-20

6.1 Описание стенда ЛИНАК-20

Многие идеи, разработки, технологические и конструктивные решения, изложенные в данной работе и лежащие в основе концепции линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ», являются инновационными и для обеспечения эффективной, устойчивой и безотказной работы создаваемого ускорителя требуют экспериментальной проверки. В первую очередь речь идет о формировании электронного пучка в начальной части линейного ускорителя и его ускорении до ультррелятивистских скоростей, когда малые погрешности магнитного поля (геомагнитное поле, рассеянные поля магниторазрядных насосов, остаточная намагниченность ферромагнитных материалов окружающей конструкции и т.д.) перестают влиять на электроны.

Инжекция из ВЧ пушки происходит не в оптимальной ускоряющей фазе с точки зрения максимального ускорения, а в группирующей, и для группировки используется резонатор, частота которого в три раза выше чем у ВЧ пушки, что позволяет значительно уменьшить размер резонатора и требуемую входную ВЧ мощность. Применение структуры на бегущей волне с ускоряющими ячейками регулярной структуры в качестве предускорителя-группирователя существенно упрощает его изготовление, поскольку не требуется разрабатывать специальные ячейки с переменной геометрией для согласования скорости частиц с фазовой скоростью волны. Кроме этого, наличие предускорителя позволяет отказаться от ведущего магнитного поля в первой структуре и использовать один небольшой согласующий соленоид. Такой подход несколько усложняет волноводный тракт, поскольку необходимо разделить СВЧ мощности клистрона между предускорителем-группирователем и первой регулярной ускоряющей структурой. Для подборки оптимальной фазы ускорения в волноводном тракте используются волноводные фазовращатели. Поскольку процесс группировки пучка также зависит от амплитуды поля в предускорителе-группирователе, то он дополнительно оснащен волноводным аттенуатором.

Отдельно стоит упомянуть тот факт, что последний раз ускоряющая структура на основе диафрагмированного волновода создавалась в ИЯФ СО РАН более двадцати лет назад и необходимо было восстановить соответствующие технологии и инструментарий.

В связи с вышесказанным было решено, не дожидаясь готовности помещений ЦКП «СКИФ», разработать, собрать и испытать начальную часть линейного ускорителя в ИЯФ СО

РАН. Поскольку после первой регулярной ускоряющей структуры можно считать пучок окончательно сформированным, испытательный стенд (который получил название ЛИНАК-20) решили ограничить одной структурой. Начальная часть стенда повторяет реальный линейный ускоритель ЦКП «СКИФ» (который впоследствии переносится в помещения ЦКП «СКИФ»), финальная – короткий диагностический участок для исследования характеристики пучка и настройки оборудования. Такая конфигурация позволяет протестировать самые критичные места, связанные с формированием пучка, его предускорением и управлением.

Как было сказано, стенд ЛИНАК-20 представляет собой начальную часть линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» и состоит из ВЧ пушки, системы группировки, регулярной ускоряющей секции, магнитных элементов, системы питания (включая ВЧ-питание), узлов систем диагностики и управления. Основной задачей стенда являлось подтверждение правильности концептуальных идей и конструкционных решений, а также получение требуемых режимов формирования ускорения, проектных параметров пучка и их измерение [75].

Структура стенда показана на рисунке 6.1. Пучок формируется в ВЧ пушке с рабочей частотой 178.5 МГц с управляющим модулятором катодно-сеточного узла, что позволяет варьировать параметры инжекции и работать в многосгустковом режиме. Затем пучок проходит через группирующий резонатор с рабочей частотой 535.5 МГц и канал группировки, включающий в себя элементы системы диагностики и фокусирующие соленоиды.

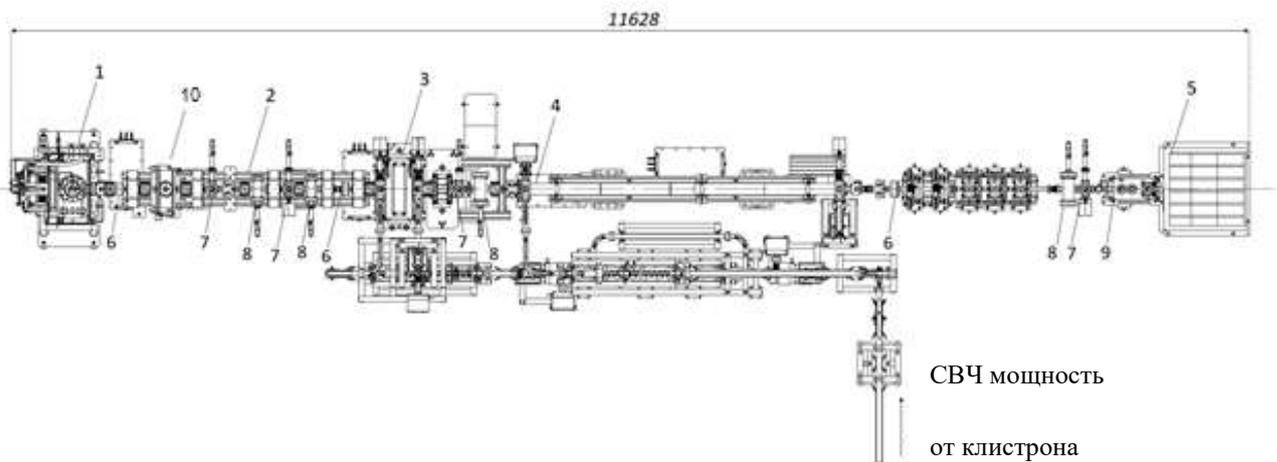


Рисунок 6.1 - Схема ускорительного стенда: 1 – ВЧ пушка, 2 – канал группировки, 3 – предускоритель-группирователь, 4 – регулярная ускоряющая структура, 5 – цилиндр Фарадея в радиационной защите, 6 – датчик тока пучка, 7 – люминофорные датчики, 8 – черенковские датчики, 9 – магнитный спектрометр, 10 – резонатор третьей гармоники

Далее пучок вводится в предускоритель-группирователь и регулярную ускоряющую структуру с рабочей частотой 2856 МГц, после чего проходит через канал с магнитными элементами и финальный канал диагностики. Стенд располагался в помещении ИЯФ СО РАН, оснащённом биологической защитой. Фотография полностью собранного и работающего стенда представлена на рисунке 6.2 [75].



Рисунок 6.2 - ЛИНАК-20 в ИЯФ СО РАН: левая часть помещения предназначена для системы питания и электроники, правая – для линейного ускорителя

На рисунке 6.3 показана общая блок-схема раздачи сигналов основных частот и импульсов синхронизации инжектора; часть, относящаяся к стенду ЛИНАК-20 выделена красным контуром. От задающего стабилизированного осциллятора (RMO – reference master oscillator) частоты 178.5 МГц сигнал поступает в усилитель и умножитель (DA – distribution amplifier), который распределяет сигналы между потребителями через индивидуальные каналы. Полученные таким образом сигналы поступают в усилители ВЧ пушки, резонатора канала группировки и в задающий усилитель клистрона. Для контроля и измерения сигналов непосредственно с нагрузок (ускоряющие структуры, резонаторы, волноводный тракт), используется блок LLRF (Low Level Radio Frequency), который позволяет детектировать

сигналы, измерять их амплитуду и фазу. Все перечисленное оборудование изготовлено компанией Instrumentation Technology (Словения) [76].

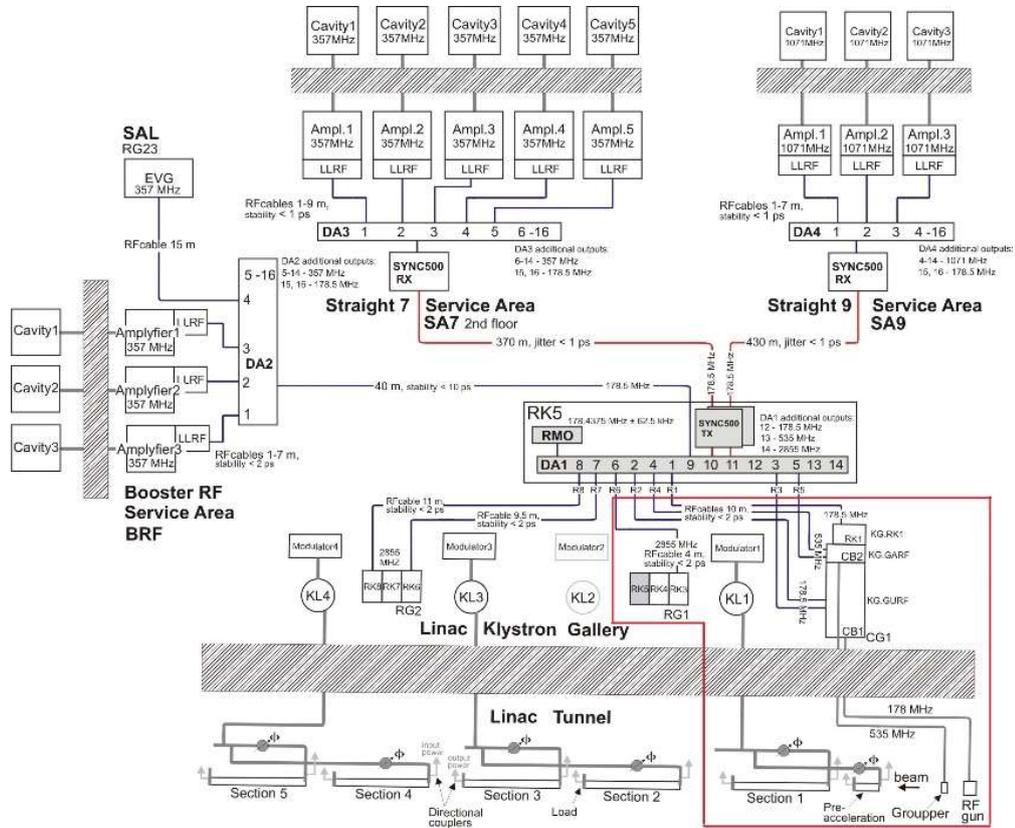


Рисунок 6.3 - Схема блока раздачи сигналов частот и синхронизации

СВЧ мощность от клистрона Canon E3730A, работающего на частоте 2856 МГц, поступает в волноводный тракт, где при помощи 7 дБ ответвителя делится в отношении 1:4. Она возбуждает ускоряющие секции: предускоритель-группирователь и регулярную ускоряющую структуру. Отдельно изготовленные элементы волноводного тракта описаны в Главе 2. Рисунок 6.4 [20] представляет 3D модель волноводного тракта, который питает предускоритель-группирователь и первую регулярную ускоряющую структуру.

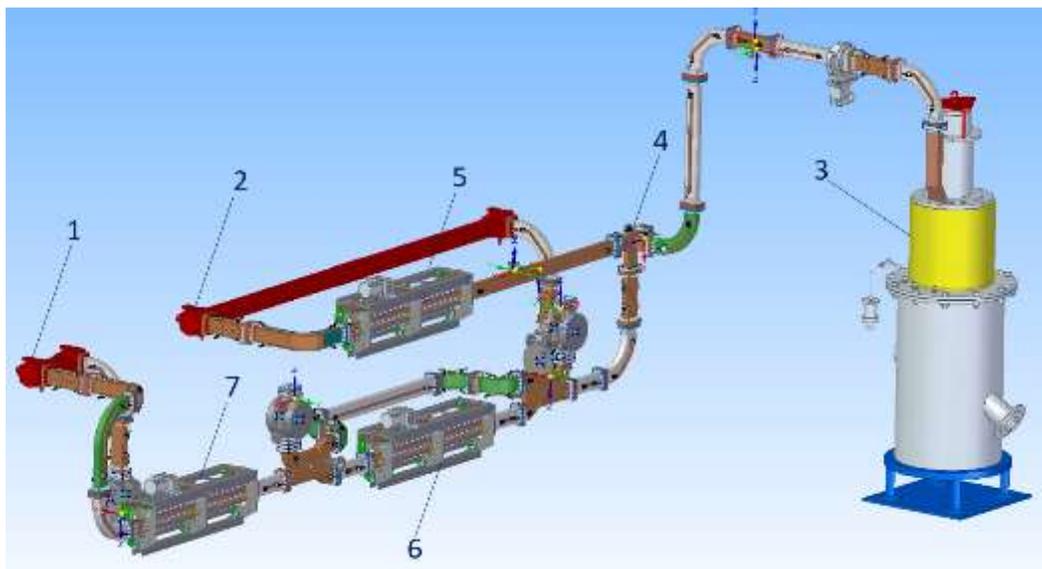


Рисунок 6.4 - Волноводный тракт стенда линейного ускорителя ЦКП «СКИФ»: 1 – предускоритель группирователь 2856 МГц, 2 – регулярная ускоряющая структура, 3 – клистрон, 4 – 7 дБ ответвитель, 5 – фазовращатель регулярной ускоряющей структуры, 6 – фазовращатель в составе аттенюатора для предускорителя-группирователя, 7 – фазовращатель предускорителя-группирователя

Модулятор для клистрона, использующий индукционный принцип генерации импульса (рисунок 6.5), разработан и изготовлен в ИЯФ СО РАН. Модулятор состоит из 12 индукторов, запитанных от формирующих линий с напряжением до 3.5 кВ и работающих на один общий виток вторичной обмотки.



Рисунок 6.5 - Слева – модулятор со стойкой управления, справа – клистрон Canon E3730A

Мощность в ВЧ пушку и резонатор канала группировки поступает от полупроводниковых усилителей, разработанных в компании Триада ТВ (Россия) [47]. Передача осуществляется с помощью коаксиальных фидеров с воздушным заполнением. Для ВЧ пушки и резонатора канала группировки усилители имеют максимальные импульсные мощности 700 кВт и 10 кВт соответственно с длительностью до 100 мкс и частотой повторения до 10 Гц. На рисунке 6.6 продемонстрированы усилители с фидерами.



Рисунок 6.6 - ВЧ усилители для питания пушки и резонатора группировки

Кроме ВЧ системы и системы раздачи импульсов частот и синхронизации стенд ЛИНАК-20 обеспечен всеми необходимыми источниками питания, котроллерами, системами диагностики, визуализации и пр.

6.2 Исследование параметров работы стенда ЛИНАК-20

Запуск и работа со стендом была разделена на несколько этапов. На первом этапе тестировалась только ВЧ пушка, после которой для наблюдения за выходящим пучком и измерения его параметров были установлены фокусирующий соленоид, датчик черенковского излучения, люминофорный датчик, коллиматор и спектрометр (см. рисунок 6.7).



Рисунок 6.7 - 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

До получения пучка резонатор ВЧ пушки был тренирован электромагнитным полем с постепенным увеличением мощности. В результате максимальная ВЧ мощность, поступающая в пушку, достигла 500 кВт без существенных пробоев в резонаторе при рабочем уровне в районе 300 кВт. На рисунке 6.8 показаны осциллограммы ВЧ сигналов – прошедшего, отраженного и поступающего от усилителя [46].

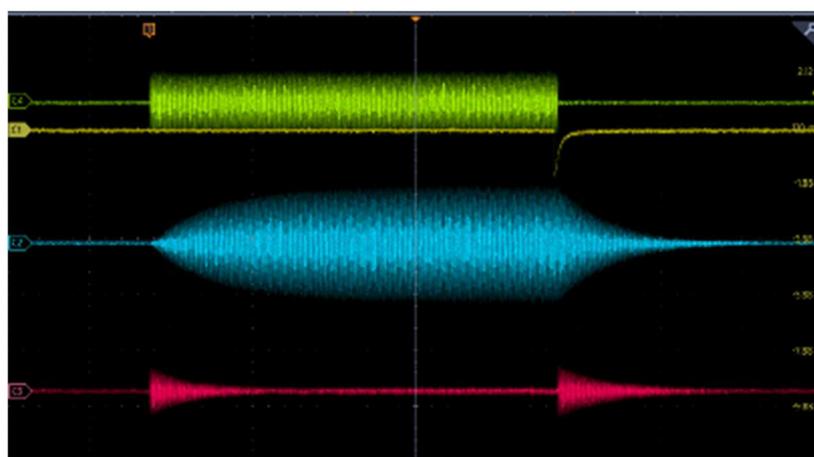


Рисунок 6.8 - Осциллограммы сигналов с ВЧ пушки: С2 (синий) – сигнал с петли резонатора ВЧ пушки (прошедший), С3 (красный) – сигнал с петли в фидере (отраженный от резонатора пушки), С4 (зеленый) – сигнал, поступающий из ВЧ усилителя

При первом включении пучка ВЧ пушки были исследованы темновые токи. На рисунке 6.9 показаны следы электронов темнового тока на первом люминофоре после пушки при полностью запертом токе катода, постоянном напряжении 20 В и нулевом отпирающем напряжении модулятора. Из рисунка видно, что структура пучка повторяет сетку катода, что говорит о эмиссионных свойствах сетки. Наличие темнового тока подтверждается исследованиями катодно-сточного узла на стенде, описанными в разделе 4.1, когда такой ток был также замечен при запертом катоде. Причина этого эффекта заключается в способе изготовления сетки не методом травления, а лазерной резкой, приводящей к появлению острых кромок, способных эмиттировать электроны в результате кратного увеличения напряжённости электрического поля. При этом на цилиндре Фарадея измерительного стенда (рисунок 6.7) этот темновой ток зафиксировать не удалось. Последующие работы с каналом группировки и первой ускоряющей структурой также не подтвердили наличие темнового тока, распространяющегося дальше первого люминофора ВЧ пушки.

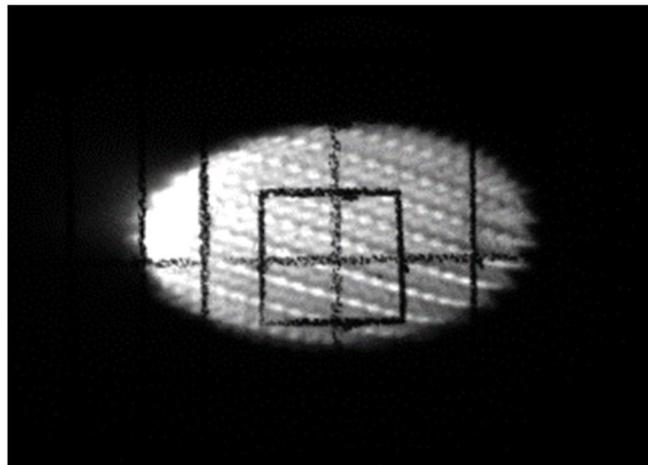


Рисунок 6.9 – Следы электронов темнового тока на первом люминофоре после ВЧ пушки

После отпираания катода и получения ускоренного рабочего пучка был измерен заряд электронов на цилиндре Фарадея в зависимости от напряжения в зазоре сетка-катод (суммарного напряжения постоянной составляющей запирающего напряжения и отпирающего напряжения модулятора). Результаты, полученные при фиксированной фазе инжекции пучка, показаны на рисунке 6.10 [77].

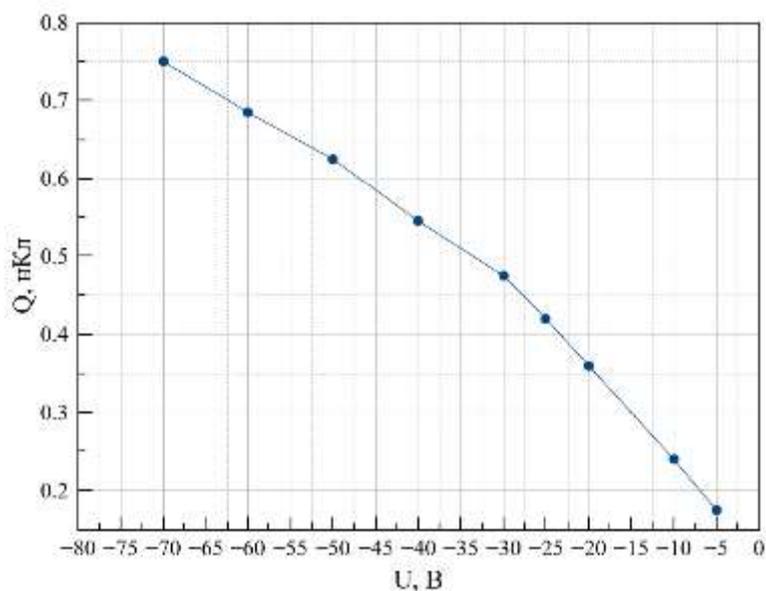


Рисунок 6.10 - Заряд пучка в ВЧ пушке в зависимости от напряжения в зазоре сетка-катод. Постоянное запирающее напряжение равно 20 В

Приведенные результаты показывают, что основной (многосгустковый) режим работы линейного ускорителя при заряде 0.3 нКл достигается без каких-либо проблем. Для получения заряда 1 нКл (требуемого для проведения экспериментов с малым числом интенсивных сгустков) необходимо либо изменять фазу инжекции, либо увеличивать амплитуду ускоряющего поля, как это и показывали результаты теоретического исследования. При этом такой заряд также является достижимым.

На рисунке 6.11 показан типичный вид поперечного профиля рабочего пучка с люминофорного датчика после ВЧ пушки.

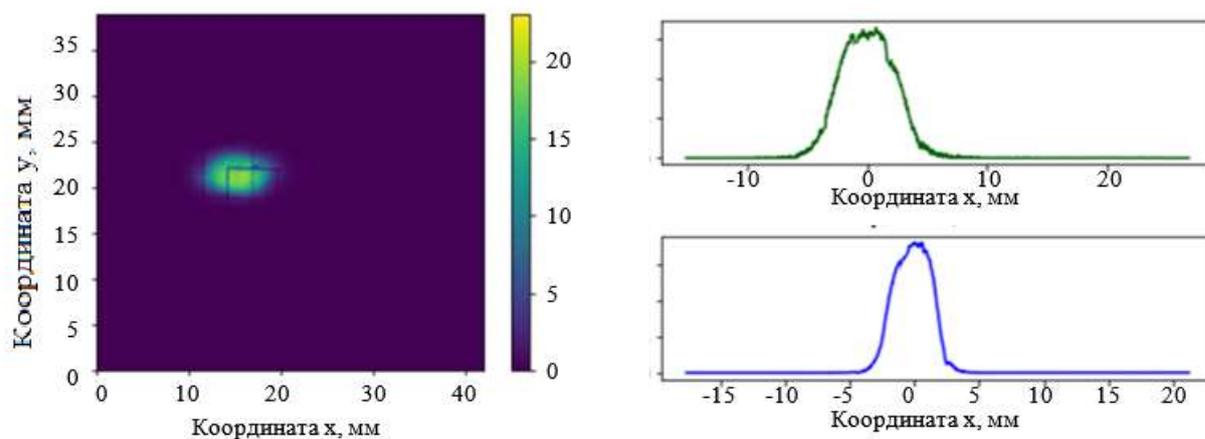


Рисунок 6.11 - Поперечный профиль пучка на люминофорном ратчике после ВЧ пушки

Эмиттанс пучка ВЧ пушки был оценен путем измерения размера пучка на люминофорном датчике при вариации силы фокусирующей магнитной линзы [78]. Как известно, матрица вторых моментов пучка имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

где матричный элемент B_{11} , который является квадратом поперечного размера пучка и зависит от силы фокусирующей линзы K как

$$B_{11}(K) = a(K - b)^2 + c, \quad (6.2)$$

где (индекс 0 показывает величины на входе в линзу)

$$\begin{cases} a = S_{12}^2 \langle x_0^2 \rangle \\ -2ab = 2S_{11}S_{12} \langle x_0^2 \rangle + 2S_{12}^2 \langle x_0 x_0' \rangle \\ c + ab^2 = S_{11}^2 \langle x_0^2 \rangle + 2S_{11}S_{12} \langle x_0 x_0' \rangle + S_{12}^2 \langle x_0'^2 \rangle \end{cases}, \quad (6.3)$$

может быть измерен с помощью люминофорного датчика. Матрица перехода «пустого» промежутка длиной l (в нашем случае – это расстояние от линзы до датчика) вычисляется согласно

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Зная расстояние от линзы до люминофора, найдя зависимость квадрата размера пучка от силы линзы, аппроксимируя полученную зависимость выражением (6.2) и найдя параметры a, b, c , можно решить систему уравнений (6.3). Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс пучка с учетом релятивистского фактора γ и относительной скорости β находится из выражения

$$\varepsilon_{nx} = \gamma\beta \sqrt{\langle x_0^2 \rangle \langle x_0'^2 \rangle - \langle x_0 x_0' \rangle^2} = \frac{\sqrt{ac}}{S_{12}^2}. \quad (6.4)$$

На рисунке 6.12 приведена зависимость квадрата размера пучка от силы линзы, откуда получается среднеквадратичный нормализованный эмиттанс $\varepsilon_{nx,y} = 10.9 \pm 0.3$ мм·град, что хорошо соответствует данным, полученным при моделировании пушки [24, 77, 79].

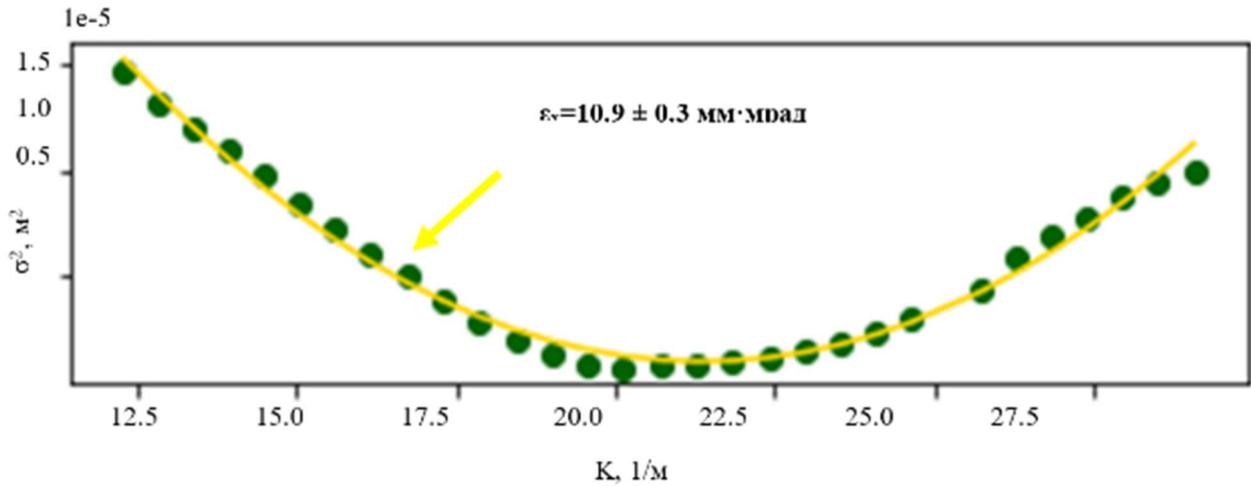


Рисунок 6.12 - Квадрат размера пучка после ВЧ пушки в зависимости от силы линзы фокусирующего соленоида

Для измерения энергии пучка после ВЧ пушки использовался магнитный спектрометр (см. рисунок 6.7), состоящий из дипольного магнита и люминофорных датчиков, расположенных внутри вакуумной камеры магнита в разных точках по длине траектории пучка. По положению пучка в центре того или иного датчика и по току спектрометра рассчитывается энергия пучка [24].

Особенностью данного метода измерения является зависимость результата от угла влета пучка в дипольный магнит. Во время первых экспериментов этому факту не было уделено должное внимание и результаты нельзя считать достоверными. Надежно энергия пучка после ВЧ пушки была измерена на следующем этапе запуска стенда ЛИНАК-20 с каналом группировки и первой регулярной ускоряющей структурой с помощью дипольного корректора, поскольку спектрометр располагался после ускоряющей структуры. Результаты приведены на рисунке 6.13. Принцип измерения также основан на смещении центра пучка на люминофоре под действием магнитного поля корректора и сравнении результатов с моделированием с учетом измеренной карты распределения магнитного поля корректора [77]. Следует отметить, что мощность ВЧ пушки была около 375 кВт и соответствовала энергии пучка 650 кэВ, что хорошо совпадает с результатами моделирования, приведенными в Главе 2.

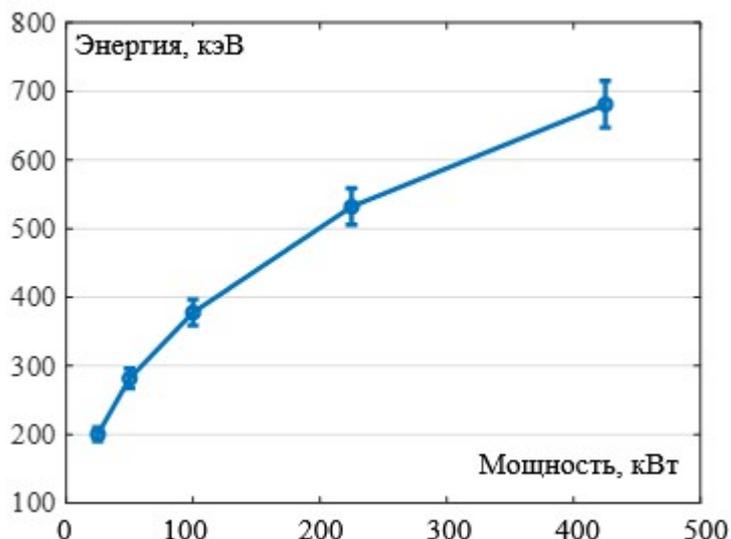


Рисунок 6.13 - Результат измерения энергии пучка ВЧ пушки в зависимости от мощности резонатора

Продольный размер пучка после ВЧ пушки измерялся черенковским датчиком со стрик-камерой, описанной в разделе 1.9 [24]. Электроны, проходящие через прозрачный сцинтиллятор (кристалл кварца, пригодный для энергии пучка 0.6 МэВ), создают черенковское излучение, которое с помощью оптической системы подается на вход стрик-камеры, как показано на рисунке 6.14.



Рисунок 6.14 - Слева – схема черенковского датчика, справа – фотография стрик-камеры, установленной на линейный ускоритель ЦКП «СКИФ»

Рисунок 6.15 демонстрирует изображение продольного профиля пучка и его распределение. Полная длительность пучка на полувысоте распределения 65 пс, что совпадает с теорией [77].

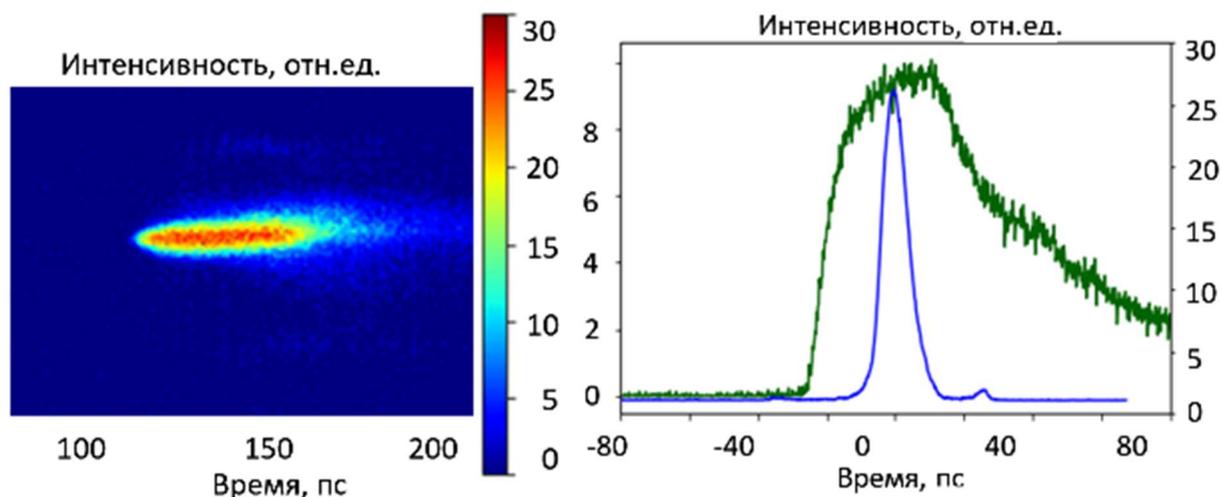


Рисунок 6.15 - Изображение (слева) и продольное распределение пучка (справа) после ВЧ пушки. Зеленая и синяя кривые – горизонтальное и вертикальное центральные сечения изображения

На рисунке 6.16 приведена зависимость длительности пучка ВЧ пушки от фазы питающего усилителя для двух значений напряжения смещения. Отметим, что эта фаза не привязана к реальной фазе ускоряющего напряжения резонатора ВЧ пушки, а задает задержку отпирающего напряжения катода. Таким образом, по абсолютным величинам значений фаз нельзя судить об амплитуде ускоряющего поля.

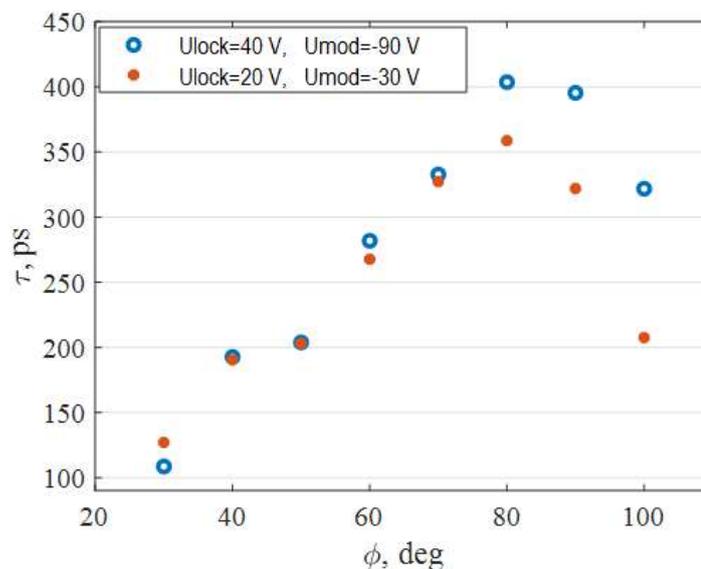


Рисунок 6.16 - Длительность пучка ВЧ пушки от фазы напряжения предусилителя: кружки/точки – запирающее напряжение катода 40/20 В и отпирающего напряжения модулятора –90/–30 В

Тем не менее, из графика видно, что с ростом фазы длительность пучка сначала увеличивается, но после 80° начинает уменьшаться. Это связано с тем, что пучок находится в области разгруппирующих фаз резонатора, и после 80° часть частиц попадает в область поля, которая отвечает совсем малой энергии электронов ниже порога рождения черенковского света. На стрик-камере это приводит к уменьшению размера светового пятна, но не за счет сокращения реальной длительности пучка, а из-за низкоэнергетического «невидимого» для стрик-камеры края.

После исследований пучка на выходе ВЧ пушки была собрана оставшаяся часть стенда, включая систему группировки, ускоряющую структуру и канал диагностики с цилиндром Фарадея в качестве поглотителя пучка. Полностью собранный стенд показан на рисунке 6.2. Он повторяет начальную часть линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» вплоть до начала второй регулярной ускоряющей структуры. Заканчивается ускоритель каналом диагностики с корректирующими диполями, триплетом, спектрометром и цилиндром Фарадея.

В качестве источника СВЧ мощности использовался клистрон Canon E3730A с волноводным трактом, схему которого можно увидеть на рисунке 6.4.

После тренировки СВЧ мощностью элементов линейного ускорителя типичный вид получаемых огибающих СВЧ сигналов клистрона можно увидеть на рисунке 6.17. Клистрон возбуждался полупроводниковым предусилителем с выходной мощностью 500 Вт, разработанным и изготовленным в ИЯФ СО РАН. СВЧ сигналы в волноводном тракте за выходным керамическим окном клистрона (падающая и отраженная мощность) измерялись с помощью калиброванных волноводных ответвителей и детекторных головок [75].

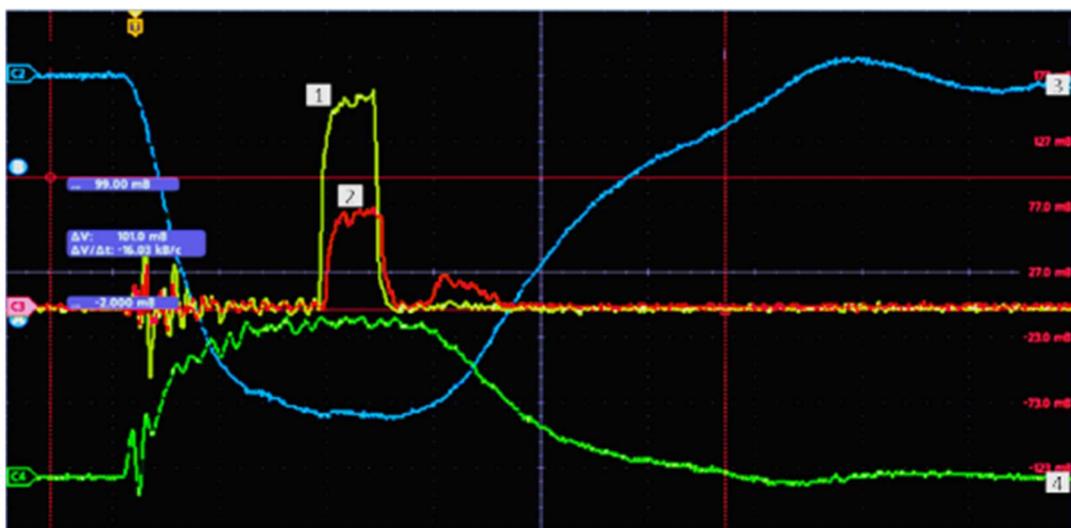


Рисунок 6.17 - Сигналы клистрона: 1 и 2 – выходная и отраженная огибающие СВЧ мощности, 3 – высокое напряжение на катоде клистрона, 4 – сигнал с предусилителя клистрона

Отраженный в сторону клистрона сигнал (кривая 2 на рисунке 6.17) состоит из двух импульсов. Второй импульс представляет собой отражение от нагрузки ускоряющей секции с неоптимальным коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВн), который на рабочей частоте ускоряющей секции составляет около 1.4. Задержка по времени этого сигнала связана с небольшой групповой скоростью волны в ускоряющей структуре, равной 0.02 от скорости света в вакууме. По данным паспорта клистрона, полученный уровень отражения является приемлемым.

Первый импульс отраженного сигнала (рисунок 6.17) связан с отражением в волноводном тракте до входа в ускоряющую структуру. Его величина соответствует 10% от выходной мощности клистрона, что является существенным. Дополнительные исследования баланса мощностей показали, что они распределяются, как показано на рисунке 6.18: в предускоритель-группирователь поступает 10% мощности клистрона, а в ускоряющую структуру – 80%, отражается обратно в клистрон 10%. Полученные соотношения отличаются от расчета, поскольку в предускоритель-группирователь предполагалось подавать до 20% мощности клистрона.

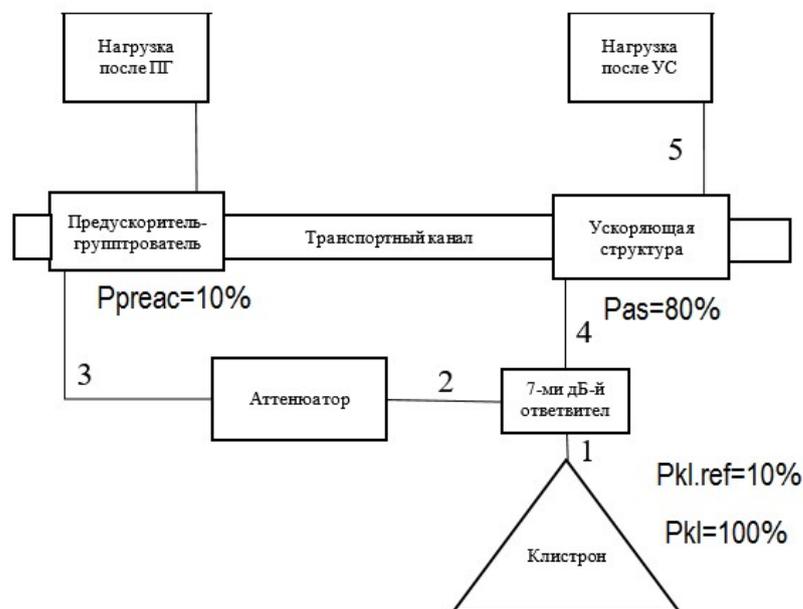


Рисунок 6.18 - Баланс мощностей ускорителя стенда ЛИНАК-20

Исследования показали, что дополнительное отражение возникает в 7-дБ-ом ответвителе из-за появления реактивной составляющей сопротивления в плече, по которому распространяется СВЧ мощность в ускоряющую структуру. Причиной этого стало неидеальное

согласование ускоряющей структуры с внешней линией. Согласно измерениям, КСВ структуры 1.4 оказалось достаточно для нарушения работы 7-ми дБ-го ответвителя. В итоге произошло перераспределение баланса мощностей по плечам ответвителя и вместо 20% ответвления в преускоритель-группирователь, реальное значение составило 10% с дополнительным отражением 10% мощности в клистрон. Поэтому, чтобы минимизировать влияние отраженной волны на работу клистрона и снизить нагрузку на его выходное вакуумное окно было решено, что выходная СВЧ мощность клистрона не должна превышать 20 МВт.

В таком режиме удалось провести первый пучок до выхода ускоряющей структуры. При этом резонатор третьей гармоники канала группировки временно не работал. На рисунке 6.19 показаны сигналы с датчиков тока пучка [25] (Fast Current Transformer – FCT), которые расположены сразу после ВЧ пушки, перед ускоряющей структурой и в конце ее (см. рисунок 6.1). Согласно полученным данным токопрохождение составило 70%. На рисунке 6.20 показаны изображения пучка с люминофорных датчиков перед и после спектрометра. По измерениям спектрометра, средняя энергия пучка составила 30 МэВ, что оказалось примерно на 10% меньше ожидаемого.

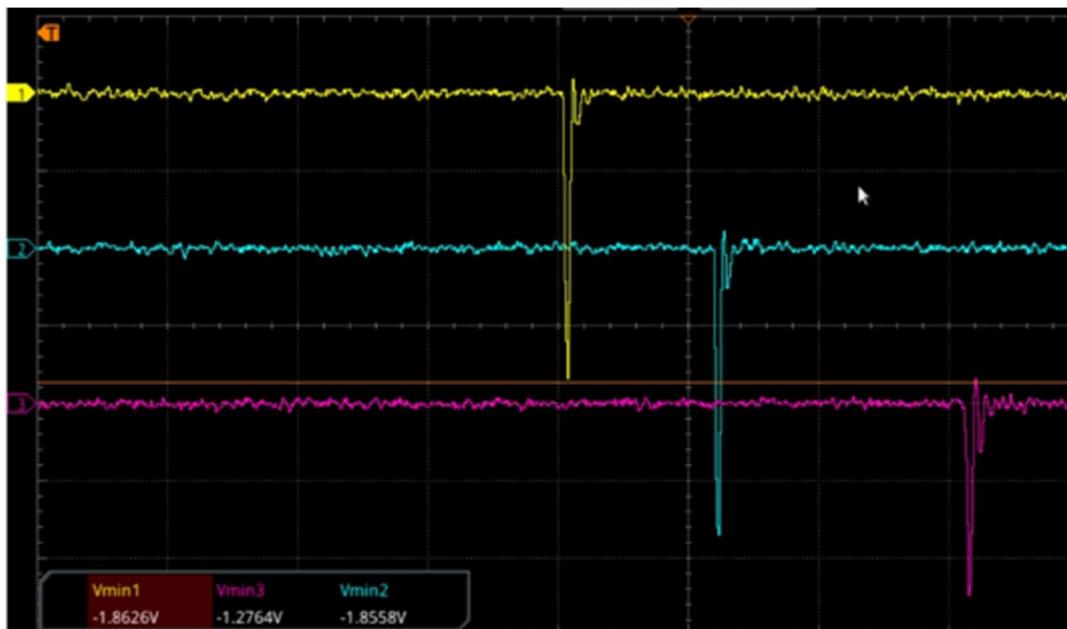


Рисунок 6.19 - Осциллограммы тока пучка с датчиков FCT сразу после пушки – желтый сигнал (канал 1), перед – голубой (2) и после – розовый (3) ускоряющей структуры

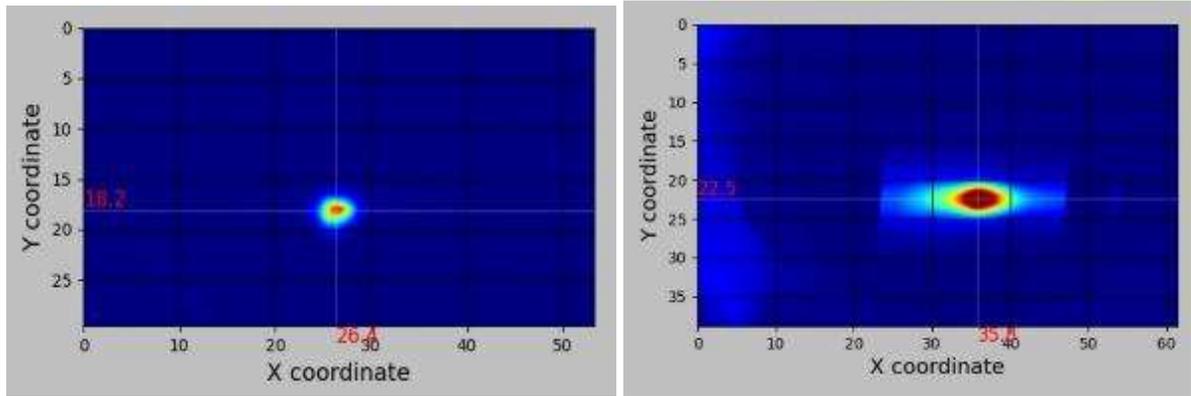


Рисунок 6.20 - Изображение пучка после ускоряющей структуры (слева) и на люминофоре спектрометра

После запуска резонатора третьей гармоники канала группировки была получена зависимость размера пучка на первом черенковском датчике (см. рисунок 6.1) от фазы этого резонатора, приведенная на рисунке 6.21 для заряда 0.4 нКл. Результаты, представленные графиком, подтверждают группировку пучка под действием поля резонатора. Пример продольного профиля пучка на первом черенковском датчике приведен на рисунке 6.22. Измерения со второго черенковского датчика показали, что при одних и тех же условиях пучок после пролета дрейфового промежутка укорачивается на 70% по сравнению с первым датчиком.

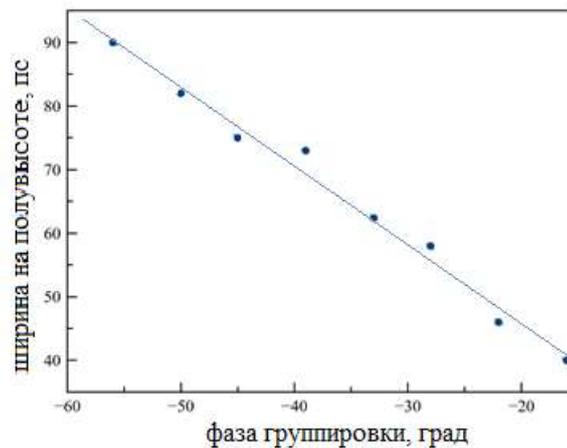


Рисунок 6.21 - Зависимость длительности пучка с зарядом 0.4 нКл (ширина на полувысоте) на первом черенковском датчике канала группировки от фазы резонатора третьей гармоники

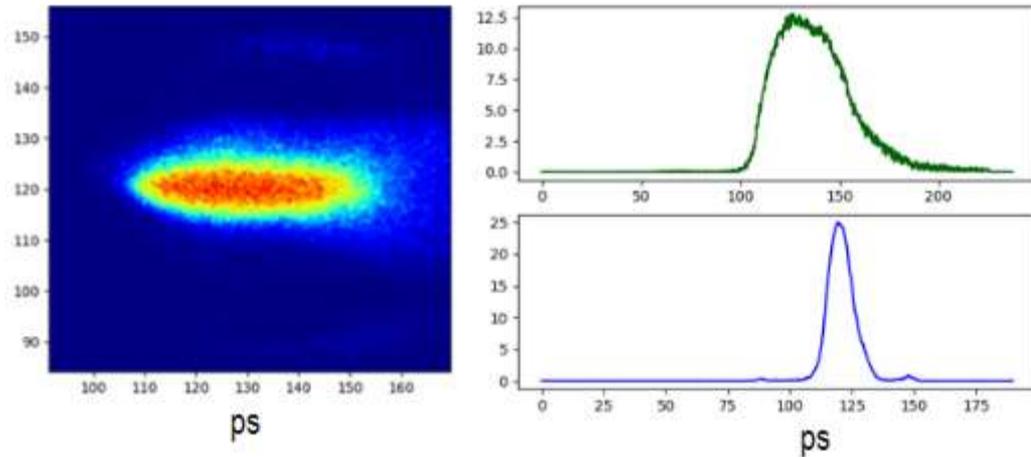


Рисунок 6.22 - Продольный профиль пучка на первом черенковском датчике с включенным резонатором третьей гармоники: слева – изображение со стрик-камеры, справа сверху – продольное распределение пучка, справа снизу – аппаратная функция стрик-камеры

Для получения одногусткового режима были подобраны не только фаза резонатора третьей гармоники, но и фаза предускорителя-группирователя. Причем последняя подбиралась с помощью электронного фазовращателя клистрона. Поскольку предускоритель-группирователь и ускоряющая структура питаются одним клистроном, то оптимальная фаза для предускорителя-группирователя не обеспечивает одновременно оптимальную фазу структуры. На рисунке 6.23 показано наиболее короткое распределение продольного профиля пучка после предускорителя-группирователя. Измерения проведены с помощью третьего черенковского датчика и стрик-камеры (показаны на рисунке 6.1). Как видно, удалось достичь длительности пучка на полувысоте 18 пс [24].

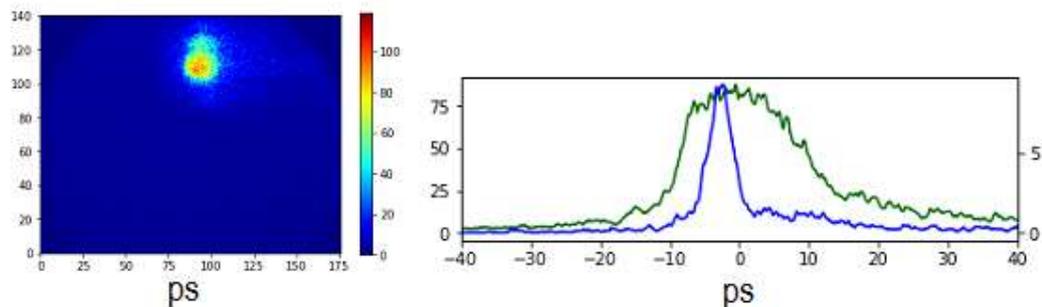


Рисунок 6.23 - Продольный профиль пучка после предускорителя-группирователя: слева – изображение со стрик-камеры, справа – продольный профиль пучка (зеленая кривая) и аппаратная функция стрик-камеры (синяя кривая). Ширина пучка на полувысоте – 18 пс

Как было сказано ранее, на начальной фазе работа с пучком велась при значении СВЧ мощности клистрона 20 МВт из-за большой амплитуды отраженной волны. Измерениями в волноводном тракте было установлено, что в ускоряющую структуру поступает 80% мощности клистрона, а в предускоритель-группирователь – 10%, что составляет около 2 МВт.

Для оценки энергии пучка после предускорителя-группирователя, были проведены измерения смещения центра тяжести пучка на люминофорном датчике, смещаемого дипольным корректором. Эти же значения были получены численно с учетом измеренного значения магнитного поля корректора. Результат сравнения теоретических и измеренных данных показан на рисунке 6.24, откуда можно заключить, что энергия пучка получается около 1.77 МэВ. Согласно моделированию при 10 МВт входной мощности в предускорителе-группирователе, максимальная энергия пучка должна быть 3.6 МэВ. При пересчете на 2 МВт, энергия пучка составляет 1.6 МэВ. С учетом точности измерения мощностей в волноводном тракте с помощью ответвителей, полученная энергия хорошо согласуется с ожидаемой.

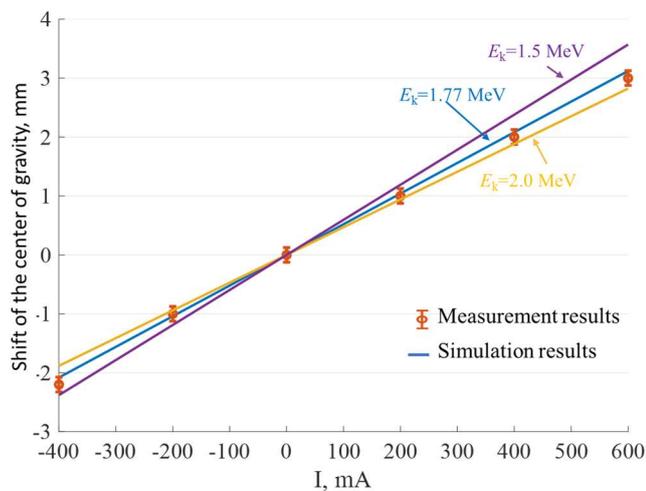


Рисунок 6.24 - Зависимости смещения пучка на люминофорном датчике после предускорителя-группирователя от тока дипольного корректора

В результате измерений и последующих настроек, а также благодаря тщательно подобранной с помощью механического фазовращателя фазе ускоряющей структуры удалось получить токопрохождение через ускоритель 100%, а на выходе ускоряющей структуры получить один сгусток. На рисунке 6.25 показаны сигналы с датчиков тока пучка FCT, а на рисунке 6.26 – сигнал с цилиндра Фарадея, который соответствует заряду 0.3 нКл.

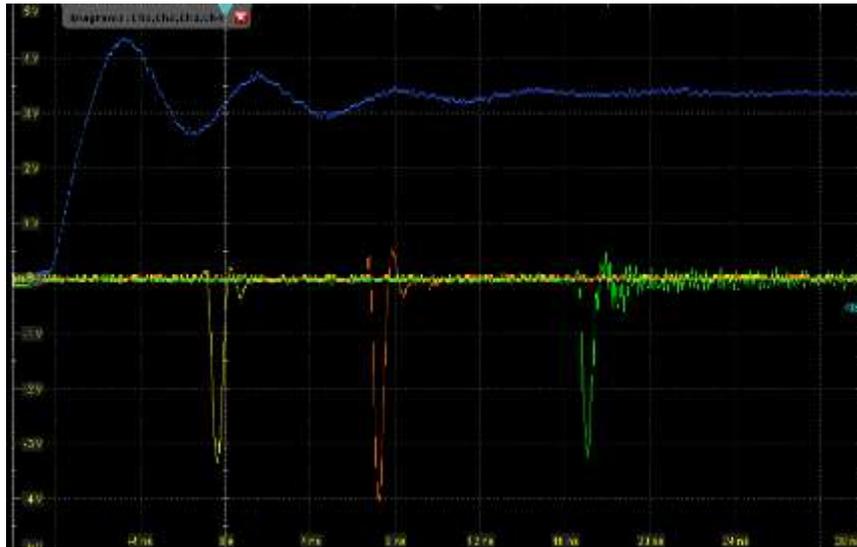


Рисунок 6.25. Осциллограммы тока пучка с датчика тока FCT сразу после ВЧ пушки (желтый), перед (красный) ускоряющей структурой на выходе канала группировки и после структуры (зеленый)

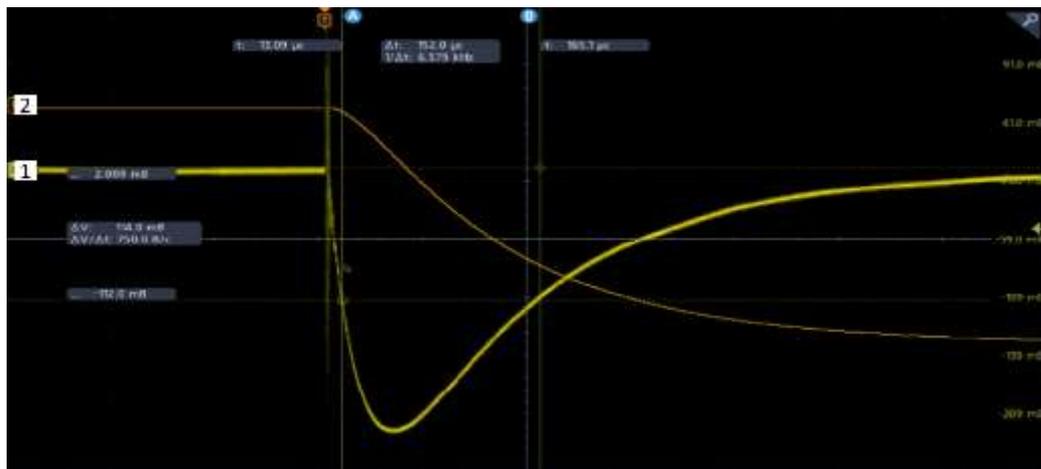


Рисунок 6.26 - Сигнал с цилиндра Фарадея, соответствующий заряду сгустка 0.3 нКл

На рисунке 6.27 показан поперечный профиль пучка на люминофорном датчике после ускоряющей структуры. Рисунок 6.28 демонстрирует продольный профиль пучка на четвертом черенковском датчике, расположенном после ускоряющей структуры (показан на рисунке 6.1). Длительность пучка на полувывсоте составила 19 пс.

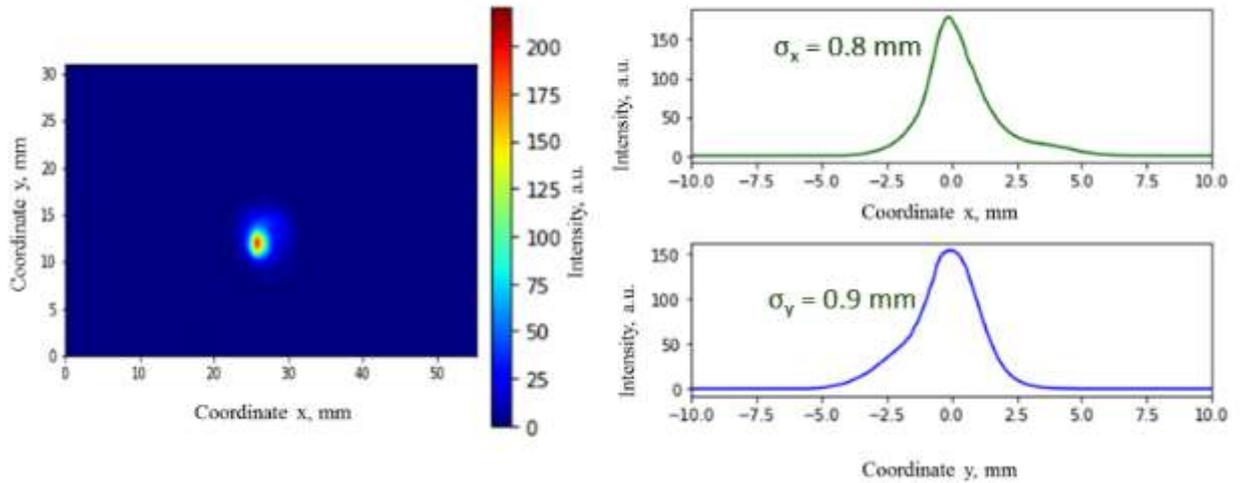


Рисунок 6.27 - Изображение поперечного профиля пучка с люминофорного датчика после ускоряющей структуры

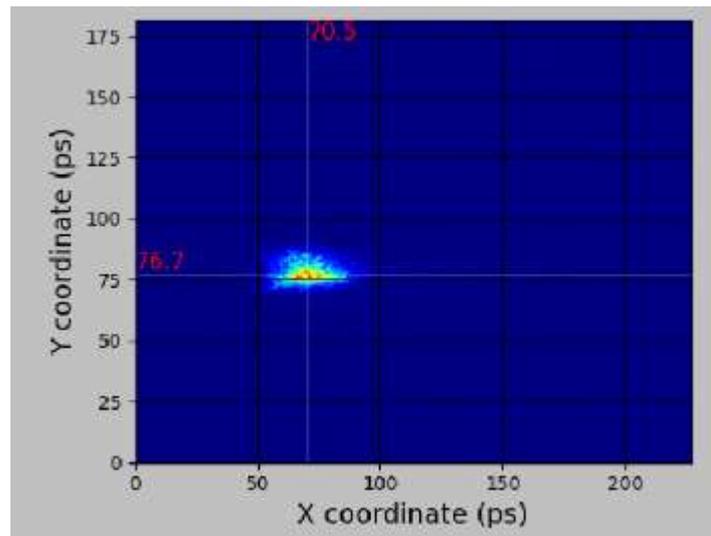


Рисунок 6.28 - Изображение продольного профиля пучка на четвертом черенковском датчике. Длительность пучка на полувысоте – 19 пс

После этих измерений были уточнены энергия пучка и энергетический разброс, который измерялся также с помощью спектрометра и введенного дополнительного коллиматора, вырезающего часть пучка [24]. Полученные результаты, продемонстрированные на рисунке 6.29, показывают, что достигнута энергия около 34 МэВ с разбросом на полувысоте 0.9 МэВ, что соответствует среднеквадратичному разбросу 1.1%.

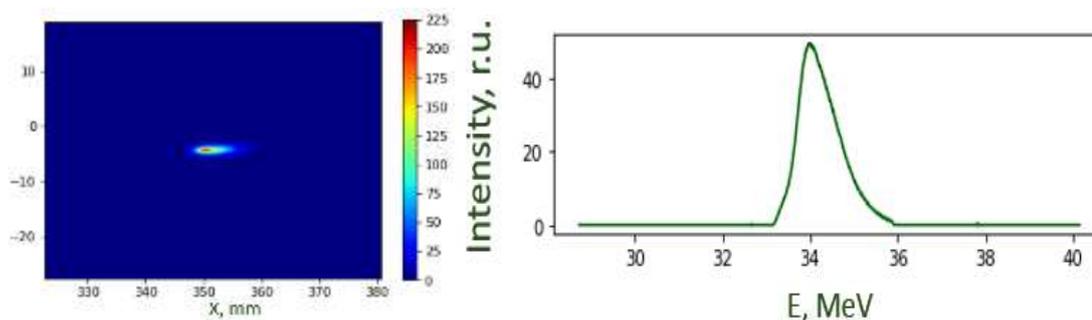


Рисунок 6.29 - Измерение энергии одного сгустка спектрометром в конце ускорителя. Средняя энергия $34 \pm 0.5\%$ МэВ, разность энергий на полувысоте распределения 0.9 МэВ ($\text{rms} \frac{\Delta W}{W} = 1.1\%$). Заряд пучка 0.3 нКл, мощность клистрона 20 МВт

Исследование ускорения одного сгустка позволило лучше измерить среднюю энергию пучка, поскольку отсутствовали частицы, образующие «хвосты» пучка. Масштабируя полученные результаты на входную СВЧ мощность клистрона 50 МВт, можно оценить энергию пучка после первой регулярной ускоряющей секции как 53 МэВ, что совпадает с расчетами.

Для подавления отраженной в клистрон СВЧ волны и увеличения значения выходной мощности клистрона была проведена дополнительная настройка волноводного тракта путем изменения фазы, что позволило точнее скомпенсировать реактивную составляющую импеданса волноводного тракта. В результате удалось скомпенсировать отраженную волну, что видно на осциллограмме рисунка 6.30. При этом оптимальное соотношение фаз, подобранное для предускорителя-группирователя и ускоряющей структуры были нарушены. Новая настройка проводилась для ускоряющей структуры с помощью электронного фазовращателя клистрона, а для предускорителя-группирователя с помощью механического волноводного фазовращателя, расположенного перед предускорителем. Это, в конечном итоге, позволило поднять до 30 МВт полезную выходную СВЧ мощность клистрона. Дальнейшая настройка была прекращена из-за необходимости подготовки переноса оборудования на площадку ЦКП «СКИФ».

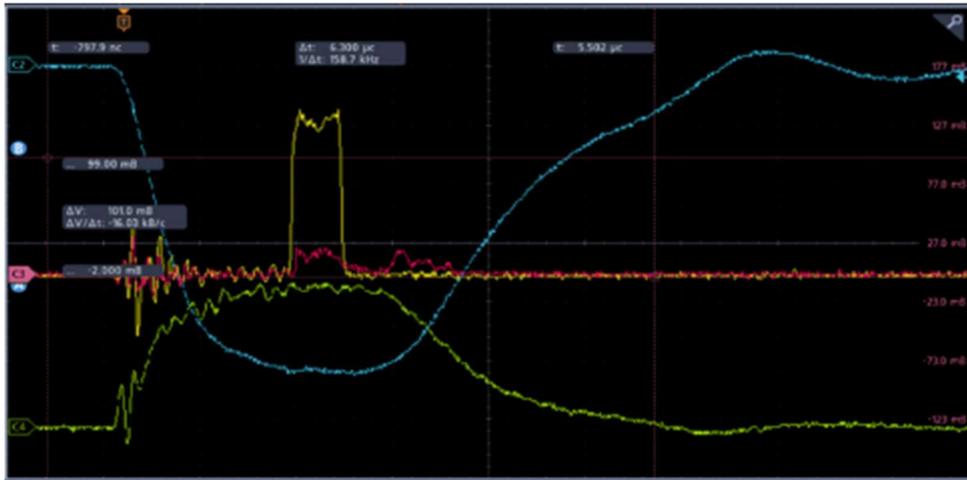


Рисунок 6.30 - Сигналы клистрона: огибающая СВЧ мощности с выхода клистрона – желтый график (канал 1) и отраженная в клистрон – красный (3), высокое напряжение на катоде клистрона – голубой (2), сигнал с предусилителя клистрона – зеленый (4)

На рисунке 6.31 показаны результаты измерения энергии пучка при мощности клистрона 30 МВт. Средняя энергия ускоренного пучка оказалась равной 39 МэВ. При этом среднеквадратичный энергетический разброс на полувысоте распределения не изменился и составил 1.1%. Результаты измерения продольной длительности пучка, показанные на рисунке 6.32, дали результат 19 пс.

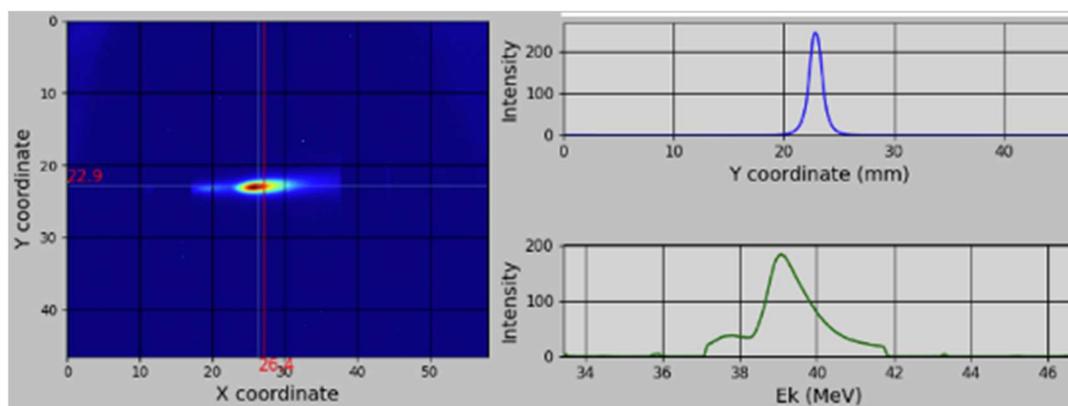


Рисунок 6.31 - Измерение энергии пучка спектрометром в конце ускорителя. Средняя энергия $39 \pm 0.5\%$ МэВ, разность энергии на полувысоте 0.9 МэВ (среднеквадратичное относительное значение $\Delta W/W = 1.1\%$). Заряд пучка 0.3 нКл, мощность клистрона 30 МВт

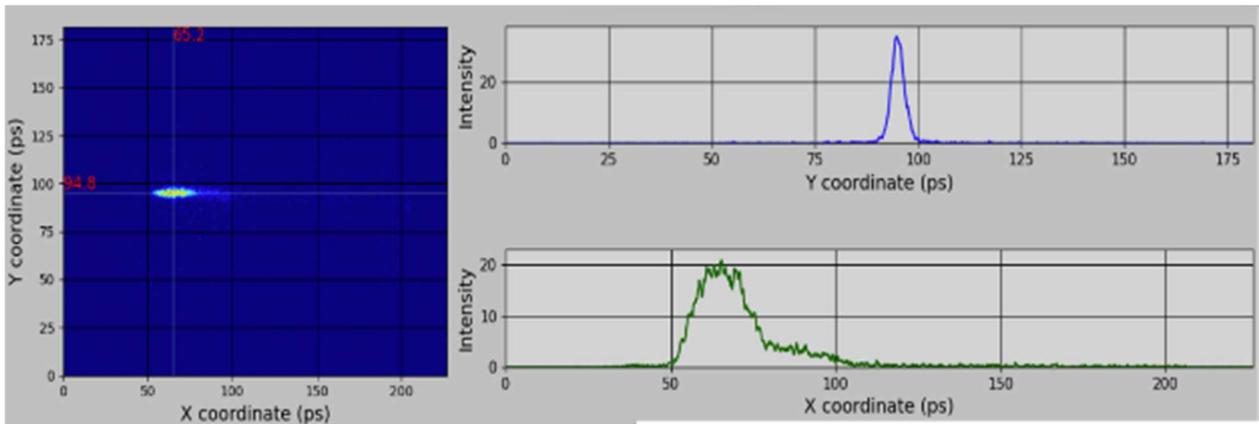


Рисунок 6.32 - Изображение продольного профиля пучка на четвертом черенковском датчике, полученное с помощью стрик-камеры. Длительность пучка на полувысоте – 19 пс

Были проведены и измерения эмиттанса пучка, ускоренного до энергии 39 МэВ. Метод измерения описан выше и опирается на выражения (6.2 - 6.4). В качестве фокусирующей линзы использовался последний квадруполь триплета после ускоряющей структуры (см. рисунок 6.1). Результаты измерений, приведенные на рисунке 6.33, показали, что нормализованный эмиттанс пучка (6.4) составил около 40 мкм·рад.

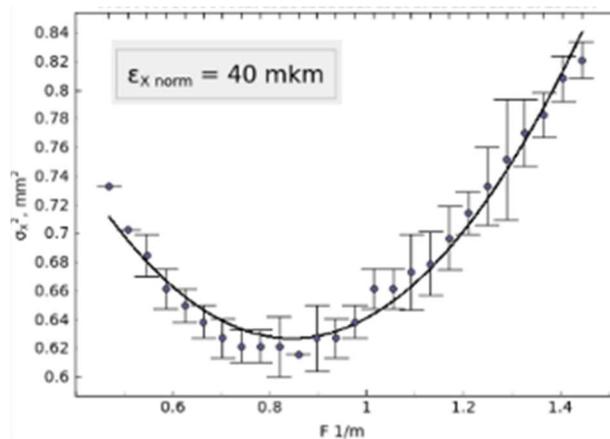


Рисунок 6.33. Результаты измерения поперечного эмиттанса пучка в конце ускоряющей структуры. Нормализованный эмиттанс составил 40 мкм·рад

По результатам измерений можно экстраполировать, что при 50 МВт выходной ВЧ мощности клистрона пучок электронов после первой секции линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» ускорится до 50 МэВ. Это значение примерно на 5% меньше, чем расчетное.

Скорее всего, это связано с точностью определения выходной мощности клистрона, которую можно получить исходя из снимаемых осциллограмм (см. рисунок 6.30).

При тестировании многосгусткового режима работы линейного ускорителя удалось ускорить 38 сгустков из проектных 55, что связано с недостаточной длительностью ВЧ импульса клистрона, который не позволил работать с полным сгустком электронов протяженностью 310 нс. Для увеличения длительности импульса ВЧ мощности клистрона требовалась дополнительная тренировка ВЧ тракта, и было принято решение не тратить на это время, а сосредоточиться на исследовании многосгусткового режима, пусть не с полным числом сгустков.

На рисунке 6.34 показана последовательность сгустков электронов, измеренная быстрыми FST датчиками тока пучка. Сгустки следуют с частотой 178.5 МГц (период 5.6 нс).

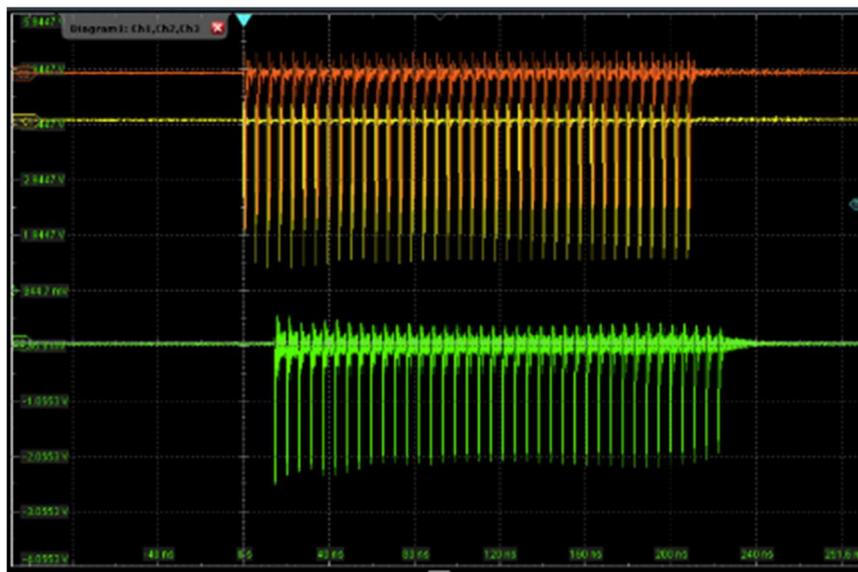


Рисунок 6.34 - Осциллограммы последовательности сгустков: желтый сигнал – сразу после ВЧ пушки, оранжевый – перед ускоряющей структурой на выходе канала группировки, зеленый – после ускоряющей структуры

Рисунок 6.35 демонстрирует результаты измерения средней энергии и энергетического разброса пучка спектрометром, установленным в конце ускорительной секции при ускорении 38 сгустков электронов. Средняя энергия получилась 39 МэВ при разбросе на полувысоте 0.9 МэВ.

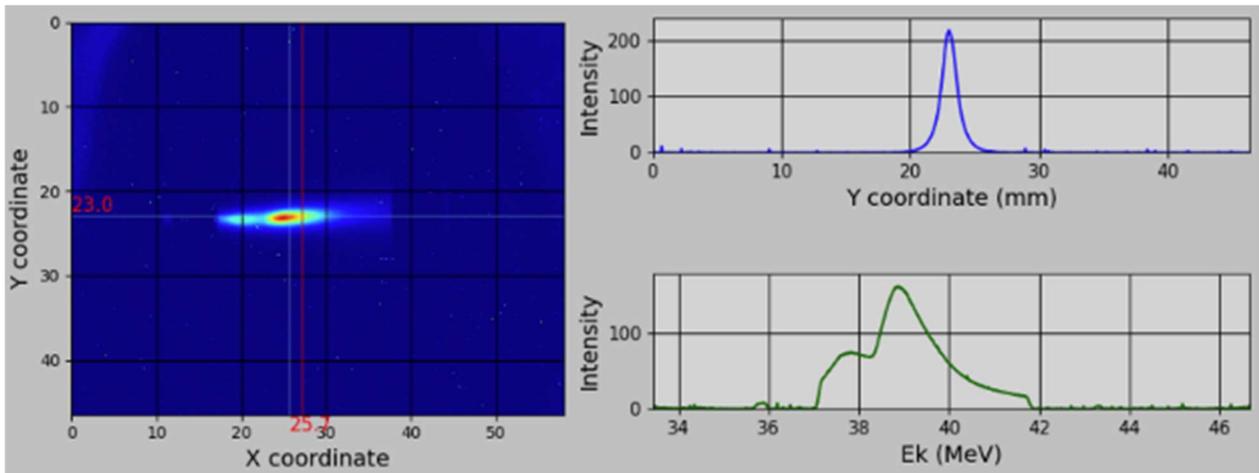


Рисунок 6.35 - Измерение энергии 38-ми сгустков электронов. Средняя энергия $39 \pm 0.5\%$ МэВ, разность энергии на полувысоте распределения 0.9 МэВ (среднеквадратичное относительное значение $\Delta W/W = 1.1\%$). Заряд пучка в сгустке 0.3 нКл, мощность клистрона 30 МВт

На рисунке 6.36 показаны результаты измерения продольного профиля пучка на четвертом черенковском датчике.

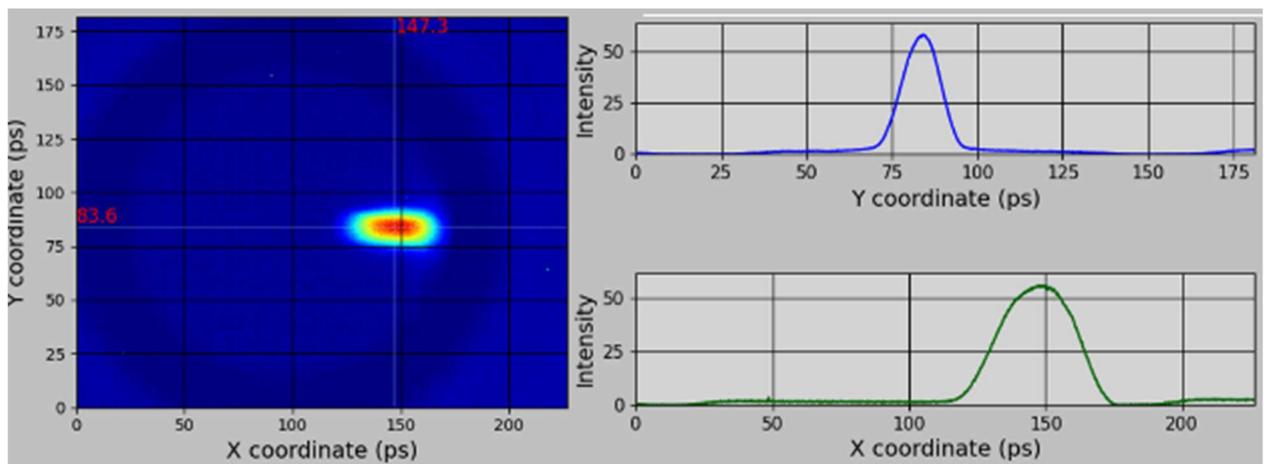


Рисунок 6.36 - Продольный профиль пучка одного из 38 сгустков на четвертом черенковском датчике. Длительность пучка на полувысоте 20 пс

В таблице 6.1. приведены параметры пучка, полученные при тестировании многосгусткового режима работы линейного ускорителя.

Таблица 6.1 - Полученные параметры пучка на стенде ЛИНАК-20

СВЧ мощность клистрона	30 МВт
Энергия пучка	39±0.5% МэВ
Среднеквадратичный энергетический разброс	1.1%
Нормализованный поперечный эмиттанс	40 мкм
Длительность пучка на полувысоте	20 пс
Заряд в сгустке	0.3÷1 нКл
Количество ускоренных сгустков	38

6.3 Заключение к Главе 6

Разработанный стенд ЛИНАК-20 позволил экспериментально проверить основные подходы разработки и протестировать ключевые элементы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ».

Показано, что источник электронов – ВЧ пушка – позволяет получать частицы с энергиями, близкими к релятивистским значениям. Поскольку фаза ВЧ пушки на стенде не совпадает с реальной фазой моделирования, то однозначное сопоставление невозможно, однако величины измеренных энергий совпадают с расчетными. То же относится и к результатам измерения длительности электронных сгустков.

Протестирована система управления током пучка для получения любой последовательности сгустков с частотой от 0 до 178.5 МГц. Результаты испытаний подтвердили возможность полного запираания тока пучка, что важно с точки зрения процедуры заданного заполнения сепаратрис накопительного кольца и получения требуемой экспериментаторам последовательности сгустков.

Концепция и конструктивное исполнение системы группировки пучка и его предускорения были реализованы на практике. Группирователь третьей гармоники приводит к уменьшению длительности пучка так, что пучок полностью захватывается в режим ускорения

и окончательно группируется в предускорителе-группирователе. Это позволяет получить одногустковый режим и захват пучка без потерь в режим ускорения. При этом показано, что предускоритель-группирователь действительно позволяет получать на выходе пучки с релятивистской энергией, что необходимо для ускорения в регулярных ускоряющих структурах, которые работают с волной, фазовая скорость которой практически равна скорости света.

Изготовленная в ИЯФ СО РАН ускоряющая структура на основе круглого диафрагмированного волновода впервые за более, чем двадцать лет, также продемонстрировала проектные возможности. Полученная энергия пучка 39 МэВ при мощности клистрона 30 МВт позволяет экстраполировать энергию пучка до 50 МэВ при мощности клистрона 50 МВт, что соответствует ожиданиям и первоначальным оценкам. Этот результат был бы невозможным без реализации всего сложного и трудоемкого технологического цикла изготовления и измерений, которые прошли ускоряющие структуры.

Измерен энергетический разброс пучка, составивший (относительный) 1.1%, что согласуется с требованиями на инжекцию в бустерный синхротрон.

Измеренный нормализованный эмиттанс пучка позволяет ожидать при энергии 200 МэВ его геометрическое значение около 100 нм, что даже меньше технических требований. Расчетный эмиттанс - 50 нм. Увеличение эмиттанса, скорее всего связано с не самой точной коррекцией орбиты пучка.

Для стенда ЛИНАК-20 были разработаны и реализованы разнообразные системы измерений и диагностики параметров пучка. Все устройства показали свою эффективность и востребованность, что позволило получить исчерпывающую информацию для настройки различных элементов ускорителя и получения пучка с высоким качеством.

Исследования, проведенные на стенде, позволили проверить и подтвердить правильность выбора магнитной структуры фокусировки и коррекции траектории пучка. Параметры соленоидов канала группировки позволили быстро и эффективно управлять поперечным размером пучка, а соленоид предускорителя-группирователя и последующий согласующий соленоид обеспечили инжекцию пучка в первую регулярную ускоряющую структуру практически без потерь частиц. Отказ от размещения первой ускоряющей структуры внутри соленоида значительно упростил конструкцию линейного ускорителя. Отсутствие рассеянных краевых полей от такого соленоида улучшило качество пучка при прохождении секции.

ЛИНАК-20 выявил и некоторые проблемы, в первую очередь, связанные с волноводным трактом. При расчетах и моделировании волноводного ответвителя на 7 дБ, который должен передавать 20% СВЧ мощности клистрона в предускоритель-группирователь, а 80% – в ускоряющую структуру, не была учтена возможная большая реактивная составляющая сопротивления в плечах ответвителя. Предполагалось, что ускоряющие структуры линейного ускорителя будут согласованы с внешним трактом с КСВ равным 1. На практике такое согласование достичь не удалось и КСВ составило ≈ 1.4 , что оказалось достаточно для изменения распределения фаз в плечах ответвителя и повлекло изменение коэффициентов ответвления. В результате значительная СВЧ мощность отражалась обратно в клистрон. Существенно, что эта проблема была выявлена на испытательном стенде, а не в момент реального запуска всего линейного ускорителя в месте штатного помещения в ЦКП «СКИФ» в очевидных условиях прессинга и нехватки времени. Заложенные при разработке ускорителя способы коррекции фаз электромагнитной волны в волноводном тракте (электронная коррекция для клистрона и механическая для предускорителя-группирователя) позволили компенсировать реактивность волноводного тракта ускоряющей структуры при сохранении необходимых фаз для захвата и ускорения пучка электронов. Стоит подчеркнуть, что неидеальное согласование регулярных ускоряющих структур в первую очередь влияет на качество волноводного тракта именно первого клистрона из-за конструктивной особенности волноводного ответвителя между предускорителем-группирователем и первой ускоряющей структурой. В последующих волноводных трактах мощность от клистрона делится поровну между двумя ускоряющими структурами с помощью 3-х дБ-го щелевого моста. Мост выполнен в виде пассивного четырехполюсника с одним из плеч, нагруженным на волноводную нагрузку. В этом случае отраженная часть ВЧ мощности от ускоряющих структур будет следовать в плечо с нагрузкой и не приводит к возврату мощности в клистрон.

В итоге можно заключить, что созданный стенд ЛИНАК-20 включил в себя самые сложные и ответственные части линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Его запуск позволил проверить и подтвердить заложенные решения, а также выявить и устранить некоторые недостатки отдельных компонентов оборудования до полного запуска всего ускорителя на энергию 200 МэВ.

Заключение

Линейный ускоритель инжектора ЦКП «СКИФ» формирует и задает начальные свойства инжектируемого электронного пучка, который становится в циклическом накопителе источником синхротронного излучения. Несмотря на то, что при реализации линейного ускорителя мы опирались на имеющийся международный опыт, многие подходы и решения являются оригинальными и уникальными. Стоит отметить, что линейные ускорители подобного типа и масштаба в России последний раз изготавливались более 20 лет тому назад. За это время многие подходы конструирования подобных ускорителей в значительной мере утрачены или стали неактуальны из-за развития новых технологий. Кроме того, при реализации проекта пришлось быстро решать задачи, которые не планировались в начале проектирования ЦКП «СКИФ». В первую очередь речь идет о создании клистронного усилителя с выходной импульсной СВЧ мощностью 50 МВт.

При создании линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ» были решены все поставленные задачи. Самая сложная часть ускорителя, заключающаяся в получении пучка, его первоначальном формировании и ускорении, была реализована на стенде. Работа со стендом подтвердила правильность выбранных решений и работоспособность разработанной схемы ускорителя. В результате описанной работы, кроме собственно разработки линейного ускорителя ЦКП «СКИФ», были получены знания, связанный с процессом захвата частиц в режим ускорения в ускоряющих структурах на основе диафрагмированных волноводов, что позволило поэтапно определить необходимые параметры пучка и элементы ускорителя для их достижения. Разработанный анализ учета ошибок изготовления ускоряющих структур позволил определить степень их влияния на ускоренный пучок и разработать критерии для снижения их отрицательного воздействия. Разработанная модель работы клистрона обеспечила не только его создание, но и возможность быстрого анализа процессов, связанных с его работой и выводом на рабочие параметры. Кроме этого сформированы технологические процессы, приобретены компетенции и опыт по созданию электронных пушек, ускоряющих структур, резонаторов группировки пучка, регулярных ускоряющих структур и структур предускорения, которые могут быть востребованы при реализации других подобных проектов в России. Создано большое количество вспомогательных, но необходимых, элементов, компонентов и узлов пучковой диагностики, управления ускорителем, магнитной, вакуумной систем и т.д. Отдельно стоит отметить, что была решена одна из самых острых задач – создание источника СВЧ

мощности для ускоряющих структур – клистрона. На данный момент изготовлены все клистроны, необходимые для работы линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ»

Таким образом, в качестве основных результатов диссертации можно перечислить:

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 и 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.
8. 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.

В заключение 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 помогли 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. Хочется отметить, что ваши профессиональные замечания всегда помогают находить правильные решения, а работать с вами не только интересно, но и весьма 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!

Список литература

1. Фетисов Г. В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. / Под ред. Л. А. Асланова – Москва : ФИЗМАЛИТ, 2007. 672 с. – Текст : непосредственный
2. Margaritondo G. Synchrotron light science: from flux to brightness to coherence. – Текст : непосредственный // II Nuovo Cimento D – July 1998 – Т.20 – С.1083-1089.
3. Информационный портал по источникам СИ: [сайт]. – URL: <https://lightsources.org/>
4. Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). / Бухтияров А. В. [и др.] – Текст : непосредственный // Кристаллография. – 2022 – Т. 67 – № 5 – С. 742-765.
5. Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске. / Баранов Г. Н. [и др.] – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2020 – Т.15 – № 1 – С. 5. – URL: https://journals.nsu.ru/files/sjp/2020/1/0699_SJP_2020T15V1_p05_p23.pdf. – Дата обращения 01.10.2024.
6. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk. / G. Varanov [и др.]. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. 2021. V. 24, № 12. С. 120704. – URL: <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>. – Дата публикации 28.12.2021.
7. Results of NSLS-II linac commissioning. / Fliller R.P. [и др.]. – Текст : электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC2013 – 2013 – Shanghai, China. – WEPWA083 – С. 2301-2303. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2013/papers/wepwa083.pdf>. – Дата обращения 10.09.2024.
8. Ma H., Rose J., Sorrentino C. Radio frequency system of NSLS-II injector LINAC for multi-bunch-mode beams. – Текст : электронный // 5th North American Particle Accel. Conf. NAPAC2022. – Albuquerque, NM, USA. – JACoW Publishing. – ISBN: 978-3-95450-232-5. ISSN: 2673-7000. – С. 813-815. – URL: <https://inspirehep.net/files/a55a523d32cec2546aac9c103352f4d9>. – Дата обращения 10.10.2024.
9. New preinjector for the ESRF booster. / Perron T. [и др.] – Текст : электронный // Proceedings of European Particle Accelerator Conference EPAC08. – 2008 – Genoa, Italy – WEP087 – С.

- 2195-2197. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e08/papers/wepc087.pdf>. – Дата обращения 10.10.2024.
10. Описание ускорительного комплекса Европейского источника СИ ESRF EBS: [сайт]. – URL: <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Accelerators/the-accelerator-complex.html>
11. Detailed design report on the MAX IV facility: [сайт]. // <https://www.maxiv.lu.se/beamlines-accelerators/accelerators/accelerator-documentation-2> – Дата обращения 10.10.2024.
12. SLED: A Method of doubling SLAC’s Energy. / Farkas Z. D. [и др.] – Текст : электронный // Proc. 9th International Conference on High Energy Accelerators. – Stanford University, California. – 1974 – С. 576-583. – URL: <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-0/068ed22dae5ba0bab8bcf19f9dcac092> – Дата обращения 10.10.2024.
13. Status of the FERMI@ELETTRA photoinjector. / Trovo M. [и др.] – Текст : электронный // Proceeding of European particle accelerator conference EPAC’08. – 2008 – С. 247–249. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e08/papers/mopc080.pdf> – Дата обращения 11.10.2024.
14. New features of the MAX IV thermionic pre-injector. / Andersson J. [и др.] – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2017 – Т. А 855 – С. 65–80. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216311007> – Дата обращения 11.10.2024.
15. 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
16. VEPP-5 injection complex: new possibilities for BINP electron-positron colliders. / Maltseva Yu. [и др.]. – Текст : электронный // Proc.of International Particle Accelerator Conference IPAC2018. – 2018. – Vancouver BC, Canada. – С. 371. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/mopmk011.pdf> – Дата обращения 26.11.2024
17. Status of NSLS-II booster. / Gurov S. [и др.]. – Текст : электронный // Proc.of Particle Accelerator Conference PAC2011. – 2011. – New York NY, USA. – WEP201. – С. 1864. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/PAC2011/papers/wep201.pdf>. – Дата обращения 08.11.2024
18. 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/Репан/v-55-4/87_Nikifirov_r.pdf. – Дата обращения 20.11.2024
19. Лампа ГС-34 (генераторный триод): [сайт] // URL: <https://rudatasheet.ru/tubes/gc-34/>.

20. 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.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>. – Дата публикации 28.02.2022
21. Test of electron linac for VEPP-5 pre-injector. / Akimov V. E. [и др.]. – Текст : электронный // Proc. of European Particle Accel. Conf. EPAC2000. – 2000. – Vienna, Austria. – P. 1648. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e00/PAPERS/MOP4A05.pdf>. / Дата обращения 23.10.2024
22. Вольман В. И., Пименов Ю. В. // Техническая электродинамика. Радио и связь. Москва : 2000, С. 449-452.
23. Барняков А. М. Резонаторная сверхвысокочастотная нагрузка. – Текст : непосредственный // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – №3. – С. 72-75.
24. Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ : по специальности 1.3.18 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сяочао Ма ; Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. – Новосибирск, 2023. – 160 с. – Текст: непосредственный URL: https://www.inp.nsk.su/images/MaXiaochao_disser.pdf.
25. Bergoz Instrumentation: [сайт] // URL: <https://www.bergoz.com/products/fct/>.
26. THORLABS: [сайт фирмы] // URL: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG550UEC>.
27. «Катод» [сайт] // URL: <https://katodnv.com/catalog/fotoelektronnye-umnozhiteli/>.
28. «Энерг-Он»: [сайт] // URL: <https://energ-on.ru/tiristornyy-regulyator-trm-3m-30/>.
29. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. // Москва : Энергоатомиздат, 1991. 528 с.
30. 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 Instrumentation. – 2020 – V. 15. – P10015. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/P10015/pdf>. – Дата публикации 16.10.2020
31. Wangler T.P. RF Linear Accelerators. // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 2008. – Weinheim. – с. 192.

32. Latest results of CW 100 mA electron RF gun for Novosibirsk ERL. / Volkov V. [и др.]. – Текст : электронный // Proc. of LINAC-2018 Conf. – 2018. – Beijing, China. – P. 598-600. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/linac2018/papers/we1a03.pdf>. – Дата обращения 06.11.2024
33. CST Studio Suit [сайт] // URL: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/cst-studio-suite/>
34. Floettmann K. A space charge tracking algorithm ASTRA [сайт] // URL: https://www.desy.de/~mpyflo/Astra_manual/Astra-Manual_V3.2.pdf.
35. Test of accelerating section for VEPP-5 pre-injector [препринт ИЯФ Со РАН]. / Avilov M. S. [и др.]. – Текст : электронный. – 2000. – SIS-2000-379 – №. BUDKER-INP-2000-50. – 27 с. – URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/1997_098.pdf. – Дата обращения 06.11.2024
36. Wangler T.P. (ibid.) – P. 53-83.
37. 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). – С. 492–50. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2021_5/08_Dronova.pdf. – Дата обращения 06.10.2024
38. Wang J. RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders. – Текст : электронный. // SLAC Report-339. – 1989. – 138 с.
39. Статус магнитных элементов инжектора СКИФ. / Павлюченко В. А. [и др.] – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2024 – Т. 19(1). – С.43-53. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53>. – Дата обращения 06.11.2024
40. Electromagnetic and electromechanical simulation - OPERA [сайт] // URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera>.
41. Wangler T. (ibid.) – P.20
42. Stanford High Energy Linear Electron Accelerator (Mark III). / Chodorow M. [и др.]. – Текст : электронный // Rev. Sci. Instrum. – 1955. – Т. 26. – P. 134-204. – DOI: 10.1063/1.1771254.
43. Анализ регулярных ускоряющих структур линейного ускорителя инжектора Сибирского Кольцевого Источника Фотонов. / Гришина К.А. [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2020. – Т. 17. – № 1(226). – С. 49–62. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_1/08_Grishina.pdf. – Дата обращения 26.11.2024
44. 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. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/39_Levichev_r.pdf. – Дата обращения 22.10.2024
45. 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: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/T09001>. – Дата публикации 02.09.2024
46. Термокатодная высокочастотная пушка и группирующий резонатор для инжектора синхротрона СКИФ / Волков В.Н. [и др.]. – Текст : электронный // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – Вып. 6. – С. 924-933. – URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/58133>. – Дата обращения 26.11.2024
47. TRIADA [сайт] // URL: <https://www.triadatv.ru/>.
48. АО «НПП «Торий» [сайт] // URL: <https://www.toriy.ru/>.
49. 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 Instrumentation](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001). – 2023. – V.18. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001>. – Дата публикации 03.07.2023
50. Slater J. C. Microwave Electronics. // D. Van Nostrand Company Inc. – 1950. – New York. – 81 с.
51. Pulsed klystron amplifier E3730A. Product Information [Электронный ресурс] // URL: [https://etd.canon/en/product/pdf/microwave/E3730A_PI\(E\)_2018-11.pdf](https://etd.canon/en/product/pdf/microwave/E3730A_PI(E)_2018-11.pdf).
52. Jensen A., Beebe A. S., Fazio M. 25 year performance review of the SLAC 5045 S-band klystron. – Текст : электронный // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC2011. – 2011. – San Sebastian, Spain. – MOPC142. – P. 409-411. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2011/papers/mopc142.pdf>. – Дата обращения 10.10.2024.
53. Инжекционный комплекс ВЭПП-5. / Еманов Ф. А. [и др.]. – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2023. – Т. 20. – № 4(249). – С. 792–796. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2023_4/29_Emanov.pdf. – Дата обращения 08.10.2024.
54. Пакет программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. / Астрелин В. Т., Иванов В. Я. – Текст : электронный // Автометрия. – 1980. – № 3. – С. 92-99. – URL: https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1980/3/92-99.pdf

55. Ivanov V. Y., Tiunov M. A. ULTRASAM-2D code for simulation of electron guns with ultra-high precision. – Текст : электронный // Proceeding of European Particle Accelerator Conference EPAC2002. – 2002. – Paris, France. – P. 1634–1636. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e02/papers/wepri050.pdf>. – Дата обращения 10.10.2024.
56. Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В., Левичев А. Е., Павлов В. М. Полосовые характеристики связанных резонаторов. – Текст : непосредственный // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 8. – С. 923–929.
57. Асеев Б. П. Основы радиотехники. – Текст : непосредственный / Москва : Связьиздат. 1947. С. 42-59.
58. Хаби В. С. Измерение характеристического сопротивления резонатора с бессеточным зазором. – Текст : непосредственный // Электронная техника. – 1971. – Серия 1. (Электроника СВЧ). – Вып. 3. – С. 138-140.
59. Асеев Б. П. (ibid.) с.76. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. // Высшая школа. М: – 1970. – Т. 1. – 307 с.
60. Влияние переходных процессов в ускоряющем резонаторе на энергетический разброс частиц. / Иванников В. И. [и др.]. – Текст : непосредственный // ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – № 6. – С. 134-136.
61. Vaughan J. R. M. The Input Gap Voltage of a Klystron. – Текст : электронный // Transactions on electron devices. – 1985. – V. 32. – No. 11. – P. 2510-2511. – DOI: [10.1109/T-ED.1985.22305](https://doi.org/10.1109/T-ED.1985.22305)
62. Halbach K., Holsinger R. F. SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry. – Текст : электронный // Particle Accelerators. – 1976. – V. 7(4). – P. 213-222.
63. Кацман Ю. А. Приборы сверхвысоких частот. – Текст : непосредственный / Высшая школа. Москва : – 1974. – Т.2. – С. 104.
64. Gewartowski J. W., Watson H. A. Principles of Electron Tubes. – Текст : непосредственный / Princeton, NJ: D. van Nostrand Company (Canada). – 1965. – 212 p.
65. Branch G. M. Electron Beam Coupling in Interaction Gaps of Cylindrical Symmetry. – Текст : электронный // Trans. of the I. R. E. – 1961. – V. ED-8. – №. – С. 3193-207. – DOI: [10.1109/T-ED.1961.14787](https://doi.org/10.1109/T-ED.1961.14787)
66. Кацман Ю. А. (ibid.). – С. 371.
67. Кацман Ю. А. (ibid.). – С. 116.
68. Кацман Ю. А. Приборы сверхвысоких частот. – Текст : непосредственный / Высшая школа. Москва : – 1974. – Т.2. – С. 96-171.

69. Ivanov V. Method for solving multidimensional problems of optimizing the parameters of high-power klystrons. – Текст : электронный // 19th International Asian School-Seminar on Optimization Problems of Complex Systems (OPCS). – 2023. – DOI:10.1109/OPCS59592.2023.10275774.
70. Разработка клистрона S-диапазона. / А. В. Андрианов [и др.] – Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ – 2020. – Т. 17, № 4(229). – С. 580–586. – URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/32_Andrianov_2.pdf. – Дата обращения 15.02.2023
71. 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. – С. 1-10. – DOI: 10.1007/s41365-024-01471-9
72. 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: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S003281621802012X>. – Дата обращения 22.10.2022
73. Michizono S., Saito Y., Mizuno H. and Kazakov S.Yu. High-power tests of pill-box and TW-in-ceramic type S-band RF windows. – Текст : электронный // Proceedings of the 1994 International Linac Conference. – 1994. – Tsukuba, Japan. – P. 457-459. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/I94/papers/tu-39.pdf>. – Дата обращения 22.10.2022
74. Патент №56720 Российской Федерации, МПК H01P 1/08 (2006.01). Волноводное окно : № 2006116298 : заявл. 11.05.2006 : опубл. 10.09.2006 / Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
75. 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
76. Instrumentation technologies [сайт] // URL: <https://www.i-tech.si>.
77. Измерение параметров ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов. / Ма С. [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2023. – Т. 18. – № 1. – С.14-27. – DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27. – Дата обращения 04.10.2024
78. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / «Параллель», Под ред. чл.-корр. РАН Н. С. Диканского. // Новосибирск. – 2009. – 223 с.
79. Разработка структуры резонаторов W-диапазона : специальность 1.3.18 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» : диссертация на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук / Арсентьева Мария Васильевна ;
Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. – Новосибирск, 2022. – 100 с. –
Текст: непосредственный.