



Федеральное государственное унитарное предприятие
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ»

2008 – 6
ОУ-У70, ОЛУ

О.К. Беляев, Ю.А. Буданов, И.А. Звонарев, С.В. Иванов, Е.В. Мазуров,
А.П. Мальцев, В.В. Нижегородцев, С.А. Стрекаловских,
В.А. Тепляков, А.А. Тимофеев, Б.А. Фролов

**ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ–ИНЖЕКТОР
ЦЕНТРА ПРОТОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

Протвино 2008

Аннотация

Беляев О.К., Буданов Ю.А., Звонарев И.А. и др. Линейный ускоритель-инжектор Центра протонно-лучевой терапии. Препринт ИФВЭ 2008–6. – Протвино, 2008. – 19 с., 18 рис., библиогр.: 2.

Приводятся результаты расчетов, технические характеристики и описание систем линейного ускорителя протонов с выходной энергией 5 МэВ, предназначенного для работы в качестве инжектора в кольцевой ускоритель Центра протонно-лучевой терапии клинической больницы им. Боткина в г. Москве. Предлагаемые технические решения опробованы на созданных ранее линейных ускорителях

Abstract

Belyaev O.K., Budanov Yu.A., Zvonarev I.A. et. al. Linear Accelerator as Injector for Center of Proton-Beam Therapy: IHEP Preprint 2008–6. – Protvino, 2008. – 19 p., 18 figs., refs.: 2.

This paper describes beam dynamic simulations and design studies for a project of linear accelerator with a radiofrequency quadrupole focusing (RFQ).

Proton linac for 5 MeV, the proposed injector for the Center of proton-beam therapy in the Botkin's Hospital (Moscow), is described. This accelerator will consist of two sections. The front-end section is a conventional RFQ, the second one being an RFQ DTL structure. Sections would be assembled as H-type cavities.

Введение

Линейный ускоритель протонов с выходной энергией 5 МэВ предназначен для работы в качестве инжектора в кольцевой ускоритель центра протонно-лучевой терапии клинической больницы имени Боткина в г. Москве. Работа линейного ускорителя в составе медицинского комплекса предъявляет особые требования к его надежности, безопасности и стабильности параметров. Для выполнения этих требований при создании ускорителя предлагается использовать принципы построения, технические и технологические решения, разработанные ранее и проверенные при создании ускорителя УРАЛ-30М, физический пуск которого был осуществлен в 2007 году [1,2].

В предлагаемой работе приводятся результаты расчетов и описание систем ускорителя с учетом его особенностей.

1. Технические характеристики

Технические характеристики линейного ускорителя должны удовлетворять медицинским требованиям к параметрам пучка для облучения пациента, требованиям к условиям инъекции в кольцевой ускоритель и габаритным размерам.

Параметры ускорителя, соответствующие перечисленным условиям, должны быть следующими:

- | | |
|---|---|
| • Ускоряемые частицы | протоны |
| • Энергия частиц на выходе | 5 МэВ |
| • Импульсный ток | 1 – 10 мА |
| • Нормализованный эмиттанс пучка по X и Y | $\leq 1 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ |
| • Энергетический разброс | $\pm (10 - 20) \text{ кэВ}$ |
| • Разброс импульсов после дебанчера | $\pm(0.1 - 0.2) \%$ |
| • Длительность импульса тока | 1.2 мксек |
| • Частота повторения | 0,66(6) Гц |
| • Рабочий вакуум в ускорителе | не хуже 10^{-7} Торр |
| • Юстировка ускоряющей структуры | не хуже 0,05 мм |
| • Длина ускорителя (без дебанчера) | 5 – 7 метров |

2. Структурная схема ускорителя

Стандартная структурная схема ускорительной установки, обеспечивающей требуемые параметры, приведена на **рис. 1**.

Пучок протонов из пушки через транспортный канал 1, содержащий ионопровод, корректирующие и фокусирующие элементы, поступает в ускоряющую структуру. Структура со-

стоит из начальной (НЧУ) и основной (ОЧУ) частей ускорителя с различными системами электродов. После набора требуемой энергии пучок через транспортный канал 2 проходит в дебанчер, необходимый для обеспечения требуемого разброса по импульсам, и далее поступает в канал инжекции кольцевого ускорителя.

Система ВЧ-питания возбуждает резонаторы ускоряющей системы и дебанчера.

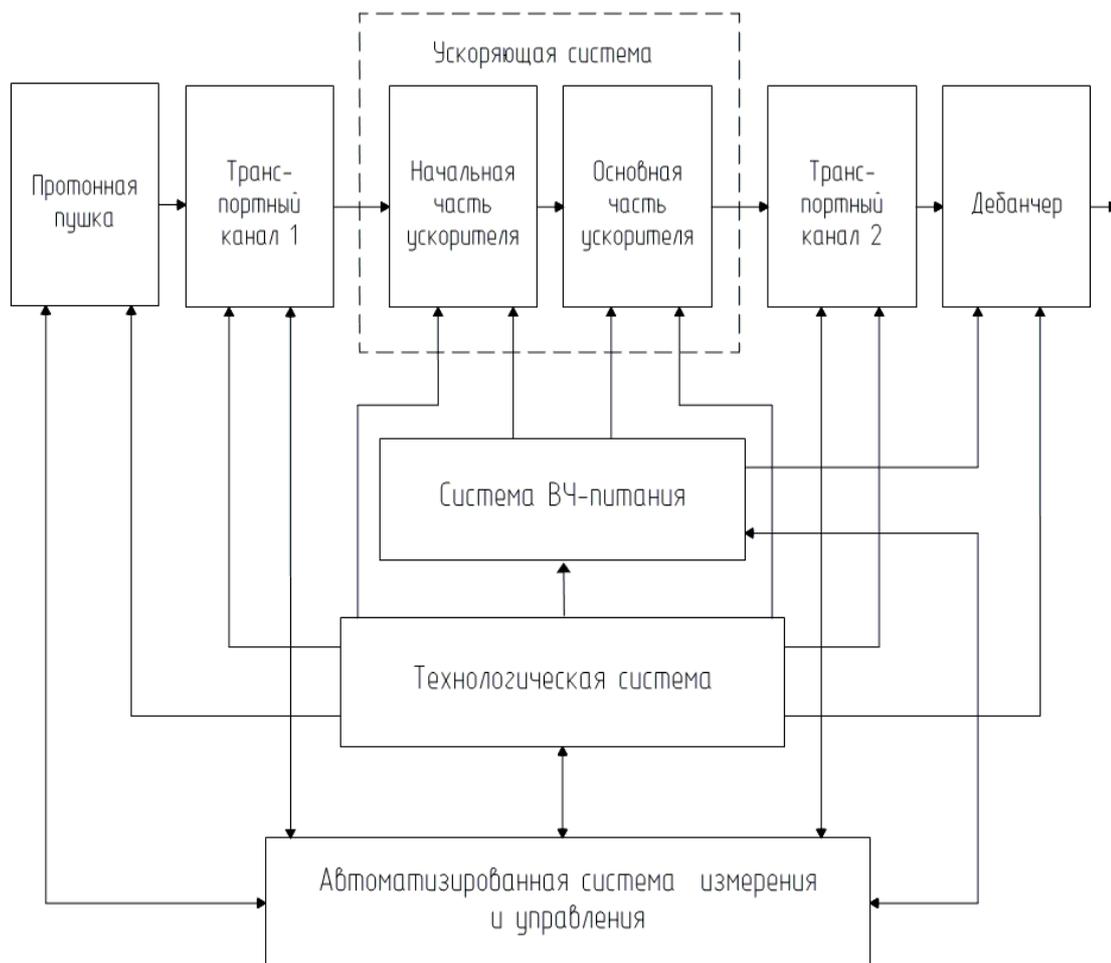


Рис. 1. Структурная схема ускорителя.

Технологическая система предназначена для получения и поддержания рабочего вакуума, съема выделяющегося тепла и термостатирования резонаторов, подачи электропитания с заданными параметрами на системы ускорителя.

Автоматизированная система измерения и управления осуществляет контроль и синхронизацию работы всех систем ускорителя, измерение рабочих параметров и выработку рабочих команд.

3. Выбор типа ускоряющей структуры

Параметры и конструкция отдельных систем в составе ускорителя в значительной степени определяются выбором типа ускоряющей структуры.

В линейном ускорителе-инжекторе предполагается применение ускоряющей структуры с высокочастотной квадрупольной (ВЧК) фокусировкой. Ускоритель состоит из начальной части (НЧУ) и основной части (ОЧУ) с различными типами ускоряющих структур.

Начальная часть ускорителя (НЧУ) – это структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, зарубежная аббревиатура RFQ). Применение в НЧУ структуры с ПОКФ обусловлено тем, что она может обеспечить высокий коэффициент захвата пучка при низкой энергии инжекции, его группировку и дальнейшее ускорение с требуемыми параметрами. Электроды НЧУ представляют собой четырехпроводную линию с изменяющимся по длине расстоянием от оси до поверхности электродов (**рис. 2**) и имеющую квадрупольное распределение потенциалов электродов.

Для основной части ускорителя (ОЧУ) предлагается структура с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ). Альтернативой структуре с ППКФ может быть структура Альвареца. Однако, принимая во внимание большое эффективное шунтовое сопротивление структуры с ППКФ при низких скоростях ионов, ее технологическую простоту, малые габариты и меньшую стоимость, можно сделать вывод о предпочтительности структуры с ППКФ.

Период ускорения структуры с ППКФ состоит из ускоряющего и фокусирующего зазоров, разделенных промежуточным электродом (**рис. 3**).



Рис. 2 . Электроды структуры с ПОКФ.

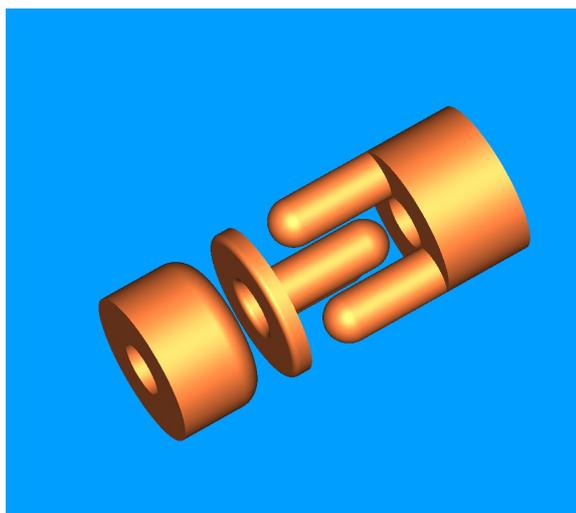


Рис. 3. Электроды структуры с ППКФ.

Ускоряющий зазор образован торцом бортового электрода (трубки дрейфа) и плоской частью промежуточного электрода. Фокусирующий зазор образован «рогами» на промежуточном электроде и торце бортового электрода. Потенциалы бортовых электродов противоположны по знаку. Потенциал промежуточного электрода задается требованиями динамики частиц и определяется соотношением емкостей ускоряющего и фокусирующего зазоров. Равенство этих емкостей приводит к равенству напряжений на ускоряющем и фокусирующем зазорах и нулевому потенциалу промежуточного электрода.

ВЧ-напряжение на электродах ускоряющих структур создается с помощью резонаторов, для которых система электродов является емкостной нагрузкой. В структурах с ВЧК-фокуси-

ровкой с рабочей частотой $\geq 10^2$ МГц применяются резонаторы с продольным магнитным полем.

На **рис. 4а** показано поперечное сечение 2Н-резонатора, обеспечивающего квадрупольное распределение потенциалов на электродах структуры с ПОКФ в НЧУ. Применение 2Н-резонатора обусловлено отсутствием в его спектре близко расположенных мешающих дипольных колебаний, что имеет место в часто применяемых четырехкамерных (4К-) резонаторах и требует принятия специальных мер для их устранения. Такие меры усложняют конструкцию 4К-резонаторов и увеличивают диссипативные потери.

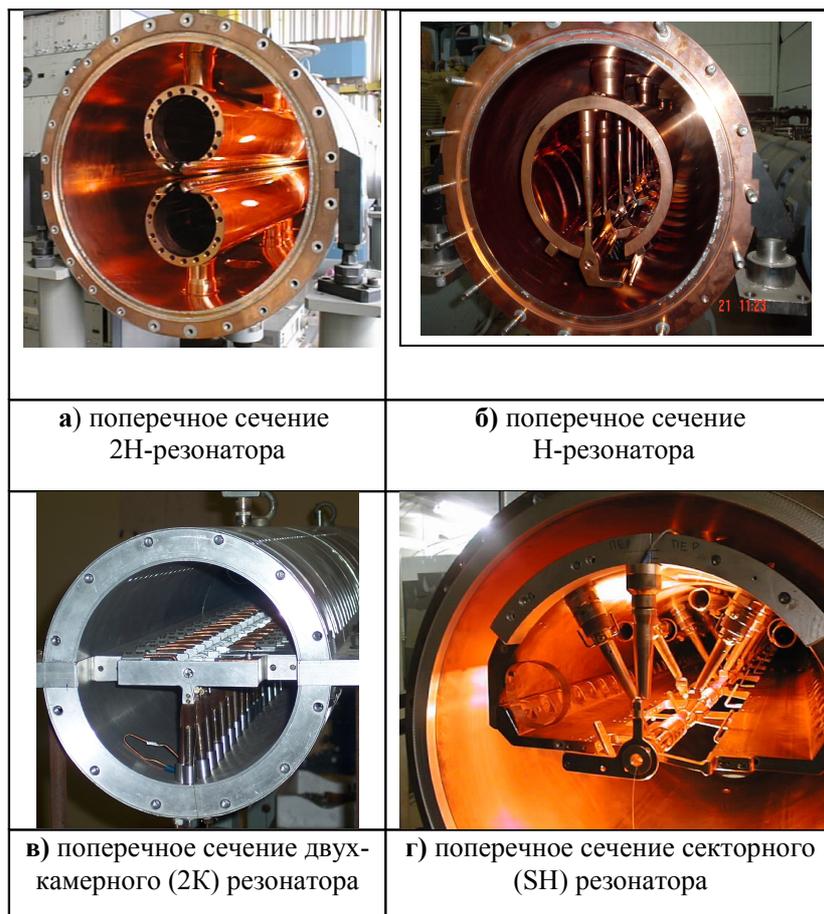


Рис. 4. Поперечные сечения резонаторов с продольным магнитным полем.

В ОЧУ возможно применение трех видов резонаторов: Н-резонатор (рис. 4б), двухкамерный резонатор (2К-) (рис. 4в) и секторный Н-резонатор (SH) (рис. 4г). Максимальными потерями и минимальной добротностью обладает Н-резонатор, поэтому его применение энергетически не выгодно. Минимальные потери и максимальная добротность у 2К-резонатора, но его конструктивные особенности приводят к сложности обеспечения надежного вакуумного уплотнения. Таким образом, в ОЧУ предлагается применение SH-резонатора.

4. Расчет основных физических параметров

Выбор типа ускоряющей структуры и резонаторов позволяет рассчитать основные физические параметры линейного ускорителя-инжектора и задать требования к параметрам систем ускорителя.

В приведенной табл. 1 показаны результаты оценки параметров предлагаемого линейного ускорителя.

Таблица 1. Основные физические параметры линейного ускорителя-инжектора для центра ПЛТ.

№ п/п	Параметры, обозначение, единицы измерения	Величина	
		НЧУ	ОЧУ
1.	Ускоряемые частицы	протоны	протоны
2.	Энергия инжекции, W_{in} , МэВ	0,1	1,77
3.	Выходная энергия, W_{out} , МэВ	1,77	5,0
4.	Импульсный ток, I, мА	1÷10	1÷10
5.	Нормализованный эмиттанс пучка (при входном эмиттансе $\sim 0,7\pi$ мм·мрад и токе 10 мА), E_n , мм·мрад	-	1π
6.	Ширина спектра импульсов после дебанчера, $\pm\Delta p/p$, %	-	$\pm 0,17$
7.	Рабочая частота ВЧ поля, f, МГц	148,5	148,5
8.	Тип резонатора	2Н	SH
9.	Напряжение на резонаторе, U, кВ	140	172÷195
10.	Напряжение на ускоряющем зазоре, U_a , кВ	-	86÷97,5
11.	Напряжение на квадрупольном зазоре, U_q , кВ	-	86÷97,5
12.	Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, E_{max} , кВ/см	250	300
13.	Равновесная фаза, ϕ_s , град	-90÷-30	-30
14.	Коэффициент захвата, к, %	95	100
15.	Эффективность ускорения, ϑ	0,058±0,657	0,675±0,829
16.	Число периодов ускорения, N_a	91	27
17.	Структура фокусировки	ФД	ФД
18.	Набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки, μ	1,0÷1,2	0,7
19.	Нормализованный аксептанс, A_n , мм·мрад	7,5π	8,5π
20.	Средний радиус канала НЧУ, R_0 , мм	7,59	-
21.	Глубина модуляции электродов, m	1,15÷2,62	-
22.	Минимальный диаметр апертуры, $2R_a$, мм	11,5	12
23.	Длина бортового электрода, l_e , мм	-	15,24÷48,17
24.	Длина промежуточного электрода, l_{ic} , мм	-	7
25.	Длина рога, l_h , мм	-	28,13÷34,97
26.	Диаметр рога, d_h , мм	-	9
27.	Длина ускоряющего зазора, l_a , мм	-	7
28.	Длина зазора между рогом и торцом электрода, l_q , мм	-	6÷7
29.	Внешний диаметр ускоряющих электродов, D_e , мм	-	30
30.	Радиус скругления кромок электродов, ρ , мм	1,5	1,5
31.	Длина секции (расстояние между фланцами резонатора), L_s , мм	2461,4	2373,8
32.	Допустимая среднеквадратичная погрешность (ДСКП) продольных размеров элементов периода ускорения в долях $\beta\lambda$, %	0,06	0,06
33.	ДСКП поперечных размеров элементов фокусирующего канала, s, мкм	50	50

34.	ДСКП разворота вокруг оси ускорителя плоскостей симметрии электродов канала, χ	30'	30'
35.	ДСКП напряжения на периоде ускорения, $\Delta U/U$, %	1	1
36.	ДСКП коэффициента деления напряжений на двойном зазоре, Δq , %	1	1
37.	Погрешность установки номинального уровня ВЧ поля в секции $\Delta U_0/U_0$, %	± 1	± 1
38.	Допустимый спад напряжения в резонаторе под пучком (при токе 10 мА), $\Delta U_s/U_s$, %	1	1
39.	Погрешность разности фаз между секциями, $\Delta \varphi$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
40.	Смещение секций относительно общей оси ускорителя, S_s , мкм, не более	± 50	± 50
41.	Внутренний диаметр контейнера, D_k , мм	520	520
42.	Внутренний/внешний радиусы резонатора, мм	82/102	160/190
43.	Добротность резонатора, Q_0	16000	13000
44.	Мощность собственных потерь, P_{Mo} , кВт/м	64	34
45.	Мощность, потребляемая пучком (10 мА), P , кВт	16,7	32,3
46.	Расстояние от ОЧУ до дебанчера, L_d , м	5	
47.	Мощность, вводимая в дебанчер, P_d , кВт	5,5	

Для компенсации уменьшения темпа ускорения в ОЧУ предусмотрен рост напряжения на SH-резонаторе на 13% по длине. Максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов не превышает 300 кВ/см, что предотвращает появление электронной нагрузки. Малая относительная длина секций ускорителя ($L/\lambda < 1,5$) приводит к отсутствию мешающих колебаний рядом с рабочим колебанием в спектре резонаторов. Численные значения энергетических параметров резонаторов и требования к стабильности амплитуды и фазы определяют требования к системе ВЧ-питания и технологическим системам.

5. Описание систем ускорителя

Показанные на структурной схеме (рис. 1) системы ускорителя предлагается создавать на базе аналогичных существующих систем, входящих в состав ранее изготовленных ускорителей. При сохранении принципов построения систем, проверенных практикой, создаваемые системы при необходимости будут адаптированы к требованиям рассматриваемого ускорителя.

5.1 Протонная пушка

Протонная пушка предназначена для генерации и формирования пучка протонов. Структурная схема приведена на рис. 5.

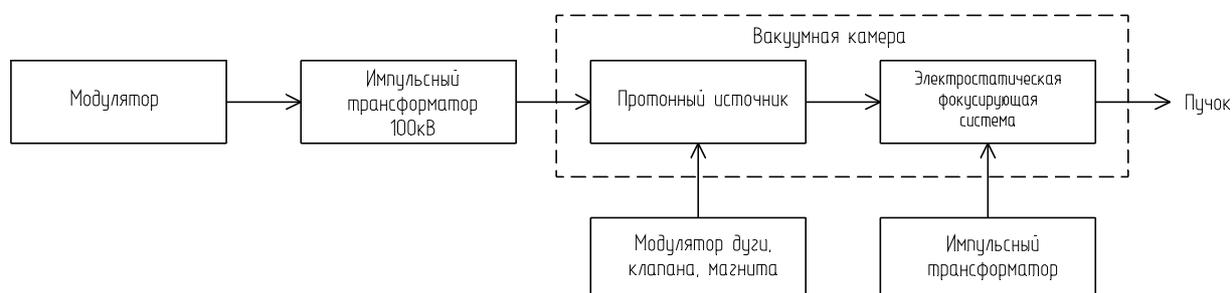


Рис. 5. Структурная схема протонной пушки.

Протонная пушка состоит из вакуумного объема, внутри которого расположен протонный источник и трехэлектродная электростатическая фокусирующая система. На источник и фокусирующую систему подаются импульсные напряжения, обеспечивающие их функционирование.

В качестве источника протонов предлагается использовать плазменный ускоритель ионов с полым холодным катодом. Источник протонов такого типа хорошо зарекомендовал себя, обеспечивая на протяжении трех с лишним десятилетий эксплуатацию линейного ускорителя протонного синхротрона ГНЦ ИФВЭ. Главными достоинствами источника положительных ионов водорода с безнакальным полым катодом являются надежность, длительный срок службы и настраиваемая высокая яркость пучка.

Для отбора ионов из источника и формирования пучка применяется электростатическая фокусирующая система (ЭФС), состоящая из трех электродов: экспандера (плазменный электрод), экстрактора (извлекающий электрод) и замедляющего электрода. Экспандер является как частью генератора плазмы, так и частью системы отбора и формирования пучка. В нем происходит согласование потока частиц, выходящих из плазменного генератора, с потоком частиц формирующегося пучка ионов в условиях нескомпенсированного пространственного заряда. На экстрактор подается отрицательный относительно земли потенциал. Изменяя его величину, можно влиять на положение и кривизну плазменной оболочки и формировать пучки с малой угловой расходимостью. Замедляющий электрод находится под нулевым потенциалом и служит выходным фланцем ионной пушки. В ЭФС создается потенциальный барьер для электронов пучковой плазмы, дрейфующей в направлении источника. Кроме того, положительный пространственный заряд ионов компенсируется зарядом электронов, захваченных пучком.

Блоки питания и управления протонной пушки располагаются на высоковольтной платформе, на которую подается от высоковольтного трансформатора электрическое напряжение положительной относительно земли полярности. Управляющие и информационные сигналы передаются на высоковольтную платформу от пульта управления (имеющего потенциал земли) с помощью стекловолоконной оптики.

На **рис. 6** и **7** показаны фотографии протонного источника и пушки.



Рис. 6. Протонный источник.



Рис. 7. Протонная пушка.

5.2 Транспортные каналы

Основное назначение транспортного канала 1, расположенного между источником и начальной частью ускорителя (НЧУ), состоит в преобразовании параметров пучка на выходе из пушки для захвата пучка в НЧУ.

Другой важной функцией транспортного канала 1 является сепарация паразитных масс, которые присутствуют в пучке протонной пушки. Обычно для очистки пучка от паразитных масс используется схема с поворотным магнитом и согласующими линзами. В такой схеме необходимо обеспечить бездисперсионность системы инжекции, либо выдержать жесткие допуски на стабильность энергии пучка.

Анализ вариантов бездисперсионной системы, в которых предполагалось использовать триплеты и корректоры (типа применяемых на трассе перевода пучка из линейного ускорителя в синхротрон), показал, что в поставленных условиях такие варианты не приемлемы, так как в ограниченном пространстве, отведенном для системы инжекции, имеющиеся длиннофокусные триплеты, корректоры и магниты не помещаются. Кроме того, такие триплеты не обеспечивают нужный угол сходимости пучка на входе в НЧУ ($\sim \pm 70$ мрад), а сложность схемы не позволяет гарантировать качественное согласование входного пучка с акцептансом ускорителя.

В ГНЦ ИФВЭ на протяжении многих лет применяется схема прямой инжекции, в которой отсутствуют проблемы, связанные с дисперсией.

На **рис. 8** показана оптическая схема транспортного канала, реализованная на ускорителе Урал-30М [2], которая обеспечивает точное согласование пучка по поперечному движению, а также позволяет эффективно сепарировать частицы примесей.

Пучок из протонной пушки, проходя через магнитную линзу 1, фокусируется на диафрагме. Диафрагма с отверстием диаметром 3 мм расположена между двумя магнитными линзами, примерно в районе кроссовера протонного пучка. На ней отсеивается значительная часть паразитных масс пучка. В области максимального размера пучка на середине второй магнитной линзы на оси пучка расположен цилиндр диаметром 3.5 мм ("пяточок"), закрепленный жестко на крестообразном держателе. Его функция состоит в перехвате тяжелых частиц пучка и значительной части легких паразитных масс (2 и 3 а.е.м.), прошедших сквозь отверстие в диафрагме. Общая длина канала транспортировки – около 600 мм.

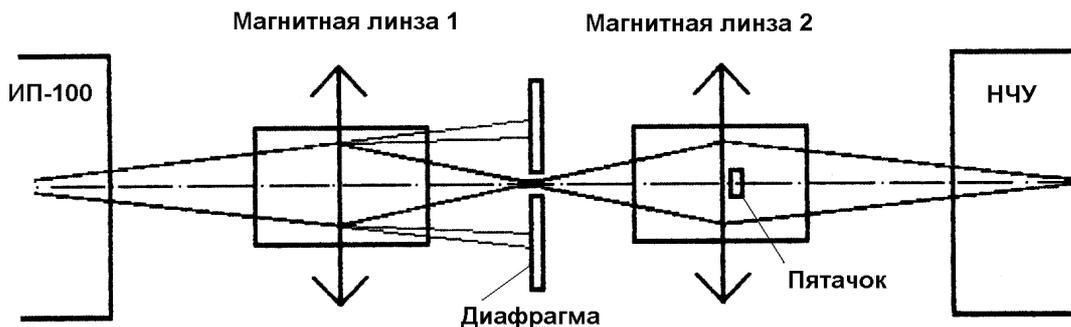


Рис. 8. Оптическая схема транспортного канала 1.

На **рис. 9** показаны фазовые портреты пучка, измеренные на выходе первой линзы и в сечении входных электродов НЧУ. Сравнивая оба портрета, можно отметить улучшение портрета пучка за счет фильтрации фазового объема. Видна также эффективная фильтрация паразитных масс, которые зафиксированы на первом портрете в виде горизонтальных полос. Здесь же проводится сравнение расчетного среднеквадратического эллипса, полученного на этапе моделирования динамики НЧУ, и эллипса, соответствующего измеренным распределениям частиц. Данная оптическая схема позволяет транспортировать пучки протонов от 2 до 200 мА. Для пучка протонов объемный заряд в значительной степени скомпенсирован. Формирование импульсов тока с длительностью тока 1–2 мкс и крутизной фронта ~ 100 нс в такой системе может быть обеспечено путем углового отклонения пучка от оси канала.

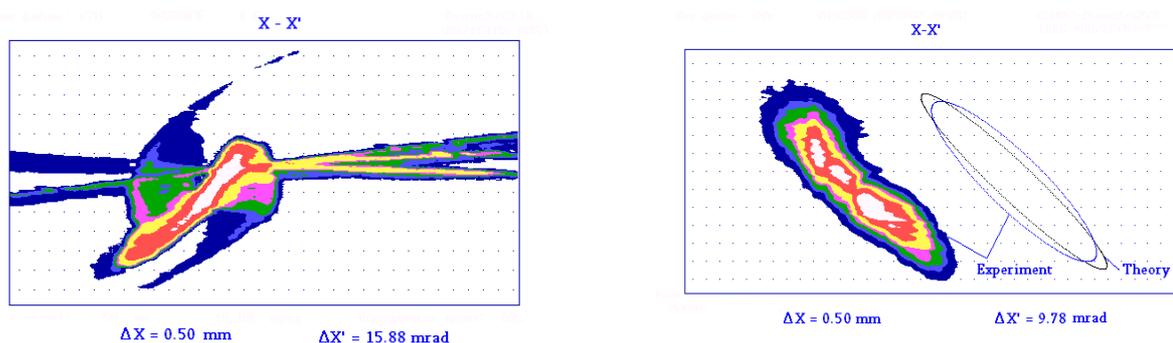


Рис. 9. Фазовые портреты пучка после первой и второй магнитных линз транспортного канала.

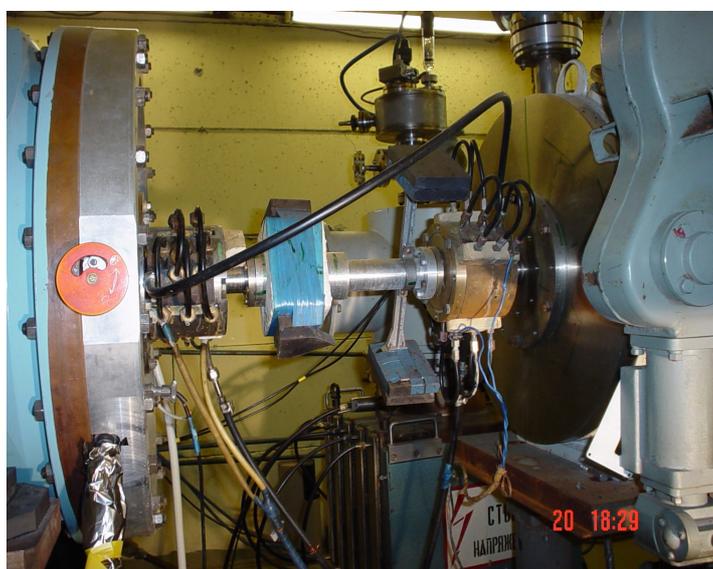


Рис. 10. Вид транспортного канала с прямой инъекцией между протонной пушкой и НЧУ.

На рис. 10 представлена система прямой инжекции, содержащая основные элементы транспортного канала 1. Корпус протонной пушки показан справа, вакуумная камера НЧУ – слева. На аксиальных магнитных линзах находятся трубки водяного охлаждения. Здесь показаны также корректирующие диполи, выполненные на постоянных магнитах и предназначенные для компенсации небольших возмущений траекторий частиц.

Транспортный канал 2 предназначен для перевода пучка с выхода ОЧУ в дебанчер с необходимым для согласования преобразованием параметров. Исследования транспортного канала 2 от ОЧУ до дебанчера включительно показали, что расстановка квадруполь триплета и заданный максимум напряженности магнитного поля в квадрупольях вполне достаточны для фокусировки пучка в апертуру дебанчера. Наибольшего размера пучок достигает в фокусирующих линзах триплета, предлагаемые линзы с радиусом апертуры ≈ 50 мм обеспечивают прохождение пучка.

Оптимизация триплета проводилась в два этапа. На первом этапе рассматривался симметричный триплет, что понижает размерность задачи оптимизации. На втором этапе, при тонкой настройке параметров триплета, улучшенные характеристики динамики пучка достигаются за счет нарушения симметрии триплета. В конечном итоге, триплет работает как фокусирующая линза по обеим плоскостям. При расстоянии 5 метров от выхода ОЧУ до дебанчера с помощью дебанчера удастся уменьшить ширину импульсного спектра примерно в 2,8 раза и уложиться в предъявляемые требования по ширине спектра пучка по импульсам. Диаметр апертуры дебанчера в 25 мм вполне достаточен для прохождения пучка.

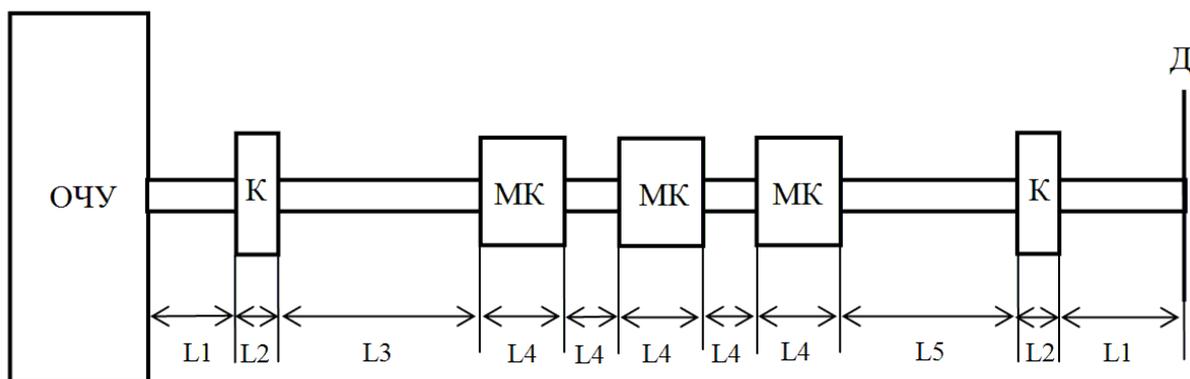


Рис. 11. Схема транспортного канала 2.

К – корректор, МК – квадруполь, Д – центр зазора дебанчера.

$L1=500$ mm, $L2=300$ mm, $L3=1100$ mm, $L4=200$ mm, $L5=1300$.

5.3 Начальная часть ускорителя

Начальная часть ускорителя (НЧУ) предназначена для группировки, фокусировки и ускорения пучка с энергией 0,1 МэВ до энергии 1,77 МэВ. Как было указано ранее, в НЧУ применяются 2Н-резонаторы, нагруженные на систему электродов в виде модулированной четырехпроводной линии. Технология создания таких структур отработана при изготовлении установок УРАЛ-30, ДУ, ЛУСИ, УРАЛ-30М.

Составленный из шести отдельных частей 2Н-резонатор с электродами закрепляется в вакуумном контейнере. Контейнер представляет собой металлическую трубу, закрытую с обоих концов крышками. Ось ускоряюще-фокусирующего канала, образованного электродами, совпадает с осью контейнера. На внешней восьмигранной поверхности контейнера располагаются два люка для узлов ввода ВЧ-мощности с керамическими вакуумноплотными радиопрозрачными колпаками, три вакуумных насоса типа НМД-0,16, а также монтажные люки, отверстия для индикаторных петель и т.д. Внутри граней контейнера расположены высверленные зигзагообразные каналы охлаждения. Охлаждающая вода в 2Н-резонатор подается через узлы крепления. Контейнер устанавливается на двух опорах, высота которых задается для каждого конкретного случая. В торцевых крышках контейнера размещены вакуумные затворы, необходимые для обеспечения вакуумной развязки между секциями ускорителя. Кроме того, в крышках располагаются индукционные датчики тока пучка, требующиеся для настройки ускорителя и контроля потерь тока пучка.

В создаваемом ускорителе ввод ВЧ-мощности предполагается осуществлять через один узел ввода, что приведет к незначительной доработке конструкции контейнера. Конструкции обеих крышек подлежат изменению, что связано с подключением НЧУ к протонному источнику через транспортный канал 1 и изменением, по сравнению с ускорителем УРАЛ-30М, конструкции секции, следующей за НЧУ.

Электроды ускоряющей структуры изготавливаются из бескислородной меди марки М0б, резонаторы и контейнер – из алюминиевого сплава АМг-6 с последующим гальваническим покрытием медью по имеющейся технологии.

5.4 Основная часть ускорителя

Основная часть ускорителя (ОЧУ) предназначена для ускорения пучка протонов с энергией 1,77 МэВ до энергии 5,0 МэВ. Ранее было указано, что ОЧУ строится на SH-резонаторах, нагруженных системой электродов ускоряющей структуры с пространственно-периодической ВЧ квадрупольной фокусировкой (ППКФ).

SH-резонаторы с системой электродов помещены в контейнер, аналогичный контейнеру НЧУ. Ось ускоряюще-фокусирующего канала совпадает с осью контейнера. На контейнере размещены люки с керамическими колпаками для узлов ввода ВЧ-мощности, монтажные люки, высоковакуумные насосы типа НМД-0.16, отверстия для измерительного оборудования. SH-резонаторы крепятся с помощью узлов крепления к внутренней поверхности контейнера. Система охлаждения организована как в НЧУ. Как и в НЧУ электроды ускоряющей структуры изготавливаются из бескислородной меди, а корпуса резонаторов и контейнер – из алюминиевого сплава АМг-6 с последующим меднением.

5.5 Дебанчер

Дебанчер предназначен для уменьшения ширины импульсного спектра пучка. В рассматриваемом линейном ускорителе–инжекторе предлагается двухзоровая схема.

Радиотехнически дебанчер представляет собой коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью, образованной установленной на конце коаксиала трубкой дрейфа. Пролетные зазоры образованы торцами этой трубки и стенками резонатора.

ВЧ-мощность в дебанчер подается через петлю связи узла ввода мощности, расположенного в области максимального магнитного поля. В этой же области устанавливается петля подстройки частоты.

Требуемый вакуум обеспечивается насосом НМД-0.16, расположенным на торце резонатора. Охлаждение дебанчера осуществляется обессоленной водой, циркулирующей в каналах внутри стенок резонатора и коаксиала.

Элементы резонатора изготавливаются из бескислородной меди М0б и алюминиевого сплава АМГ-6 с последующим гальваническим меднением.

5.6 Система ВЧ-питания

Система ВЧ-питания выполняет функции:

- генерации и усиления ВЧ-колебаний на заданной частоте до требуемого уровня мощности;
- транспортировки и ввода ВЧ-мощности в резонаторы ускорителя;
- поддержания амплитуд полей резонаторов и разности фаз между полями с требуемой точностью.

Основные характеристики предлагаемой системы ВЧ-питания приведены в **табл. 2**.

Таблица 2. Основные характеристики системы ВЧ-питания.

Наименование параметра	Значение параметра		
	НЧУ	ОЧУ	Дебанчер
1. Рабочая частота, МГц	148.5		
2. Нагруженная добротность резонатора, не менее	8000	6500	3000
3. Мощность собственных потерь в резонаторе (имп.), кВт, не более	320	160	20
4. Мощность, потребляемая пучком (имп.), кВт	17	32	-
5. Длительность тока пучка, мкс	1.2		
6. Суммарная мощность, потребляемая резонатором (имп.), кВт	340	200	20
7. Нестабильность амплитуды поля резонатора при включении тока пучка, %, не более	± 0.2	± 1	-
8. Нестабильность фазы поля резонатора при включении тока пучка, не более	$\pm 0.2^\circ$	$\pm 0.1^\circ$	-
9. Длительность ВЧ-импульса, мкс, не более	40		
10. Количество выходов ВЧ-мощности	3		
11. Суммарная выходная мощность системы (имп.), кВт	560		
12. Мощность, потребляемая от сети, кВт, не более	20		

Упрощенная структурная схема системы ВЧ-питания приведена на **рис. 12**. Стабилизированный кварцевым генератором сигнал задающего устройства ЗУ усиливается транзисторным услителем ТУ и поступает в двухкаскадный предвозбудитель на триодах ГИ-39Б. Дальнейшее усиление мощности сигнала осуществляется последовательно мощными ВЧ-усилителями – возбудителем и окончательным услителем, построенными на триодах ГИ-27АМ. Анодное напряжение на ламповые усилители подается с модулятора М.

Контроль режимов высокочастотных трактов производится с помощью рефлектометров Р. Разветвление ВЧ-мощности по резонаторам ускоряющей системы осуществляется через регулируемые блоки связи БС окончательного усилителя. Требуемые соотношения между амплитудами ответвляемых сигналов устанавливаются настройкой блоков связи. Требуемые фазовые соотношения между сигналами возбуждения резонаторов НЧУ и ОЧУ (кратные π) обеспечиваются также настройкой соответствующих БС. Фаза возбуждения дебанчера подбирается с помощью фазосдвигающего устройства ФУ.

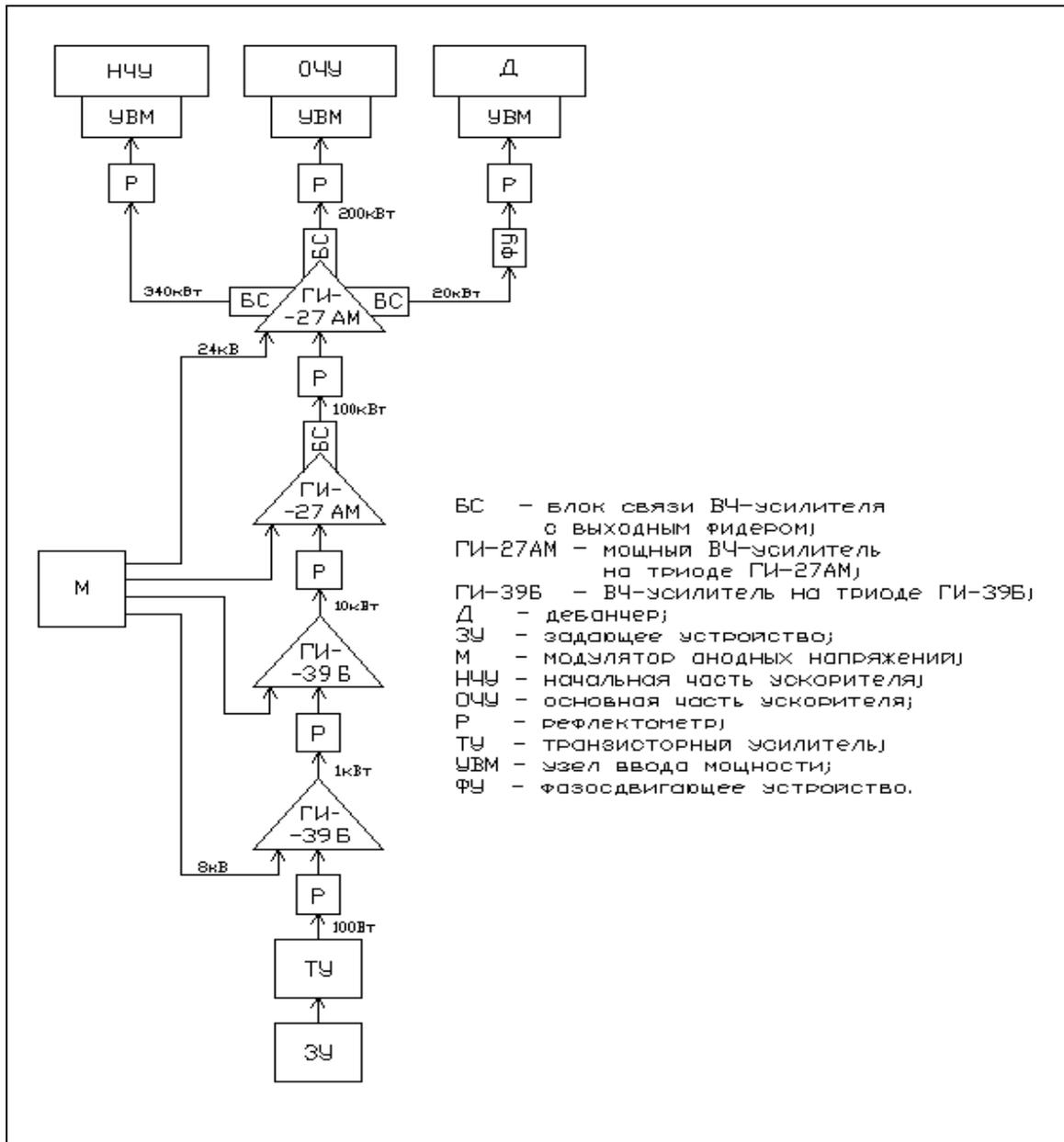


Рис. 12. Структурная схема системы ВЧ-питания.

На рис. 13-16 приведены фотографии общих видов оборудования системы ВЧ-питания, созданного и эксплуатируемого в ГНЦ ИФВЭ.

Аналогичное оборудование системы ВЧ-питания для линейного ускорителя-инжектора будет создаваться на базе отработанных на действующих установках ГНЦ ИФВЭ схемных и конструкторских решений. Возможные изменения в создаваемой аппаратуре могут касаться применения стандартных покупных узлов (синтезатор частот, транзисторный усилитель) и замены триодов GI-39Б близкими к ним по характеристикам зарубежными лампами.



Рис. 13.
Двухкаскадный предвозбудитель
на триодах ГИ-39Б.



Рис. 14.
Мощный ВЧ-усилитель
на триоде ГИ-27АМ.



Рис. 15.
Узел ввода мощности.



Рис. 16.
Модулятор.

5.7 Технологические системы

Технологические системы ускорителя обеспечивают электропитание, создание и поддержание вакуума, температурный режим, функционирование электрофизического оборудования, что необходимо для работы ускорителя.

В состав технологических систем входят:

- система электропитания;
- вакуумная система;
- система водяного охлаждения и система термостатирования;
- система управления, блокировок и сигнализации

В табл. 3 приведены значения параметров систем ускорителя, которые обеспечиваются и поддерживаются технологическими системами.

Таблица 3

Система	Потребляемая мощность (кВт) Питание (В)	Давление (Торр) Насосы	Температура воды
Протонная пушка	30 380/220±1%; 50 Гц	10 ⁻⁵ НМД-1,0; 4 шт.	20±1°С
Ускоряющая система	-	10 ⁻⁸ НМД-0,16; 6 шт.	20±0,1°С
Транспортные каналы	15 380/220±1%; 50 Гц	10 ⁻⁸ НМД-0,16; 1 шт.	20±1°С
Система ВЧ-питания	20 380/220±1%; 50 Гц	-	20±1°С
Вакуумная система	25 380/220±5%; 50 Гц	-	20±1°С
Система охлаждения и термостабилизации	20 380/220±5%; 50 Гц	-	-
Дебанчер	-	10 ⁻⁸ НМД-0,16; 1 шт.	20±0,1°С
Управление, блокировка, сигнализация	3 380/220±1%; 50 Гц	-	-
Автоматизированная система измерения и управления	3 380/220±1%; 50 Гц	-	-

Для обеспечения требуемой стабильности электропитания ($\pm 1\%$) для отдельных систем ускорителя применяются стабилизаторы типа СТС. Указанные в табл. 3 значения давления в объемах ускорителя получаются в результате поэтапной откачки.

Система предварительного разряжения осуществляет первичную откачку ускорителя до давления 10^{-1} Торр. Откачка производится либо автономно с помощью передвижных откачных постов на базе форвакуумных насосов типа НВР, либо централизованно с помощью форвакуумной магистрали. Также система используется при проведении предварительной проверки на герметичность (при поиске грубых течей).

Система промежуточной откачки осуществляет откачку ускорителя в диапазоне давлений $10-10^{-2}$ Па ($10^{-1}-10^{-4}$ Торр) и представляет собой агрегаты, собранные на базе турбомолекулярных насосов ТМН-500, форвакуумных насосов НВР, системы клапанов и трубопроводов. Данная система обеспечивает запуск высоковакуумных насосов и дальнейшую откачку ускорителя с помощью высоковакуумных насосов типа НМД. Кроме того, эта система используется при проведении обезгаживания вакуумных объемов ускорителя и поиске течей. Проведение обезгаживания ускоряет достижения рабочего вакуума в ускорителе.

В качестве рабочего теплоносителя в системе водоохлаждения используется обессоленная вода с удельным сопротивлением не менее 500 кОм/см. Давление обессоленной воды на входе охлаждаемого оборудования 4 кгс/см^2 . Максимальный расход воды не превосходит 50 л/мин.

5.8 Автоматизированная система измерения и управления

Автоматизированная система измерения и управления (АСИУ) предназначена для контроля основных параметров ускорителя во всех режимах эксплуатации.

На рис. 17 показана структура АСИУ, отражающая основные компоненты системы и их взаимосвязи с другими системами ускорителя. На схеме выделены группы каналов измерения, регулирования и стабилизации основных систем ускорителя: системы протонной пушки (ПП),

высокочастотной (ВЧ) системы питания резонаторов ускорителя, системы диагностики пучка и технологических систем ускорителя, включая вакуумную систему, систему охлаждения и электропитания.

Архитектура верхнего уровня АСИУ должна обеспечивать интеграцию всех интеллектуальных устройств нижнего уровня в единую систему: компьютеров, встроенных контроллеров и терминалов. В данном проекте предлагается вариант, создаваемый на базе коммерческого продукта компании Microsoft Co: Windows Server 2003 Standart Edition R2. Это недорогая, надежная сетевая операционная система (ОС), позволяющая быстро создавать решения на ее основе. Она поддерживает централизованное развертывание приложений, предоставляет стандартные средства доступа к каналам управления, к файлам и принтерам. Эта ОС обеспечивает необходимый уровень масштабируемости. Она позволяет интегрировать различные продукты компании Microsoft Co и другие свободно распространяемые системы, например, Linux. Операционная система Windows Server 2003 Standart Edition R2 обеспечивает высокий уровень безопасности, что даёт существенные преимущества по сравнению с другими ОС при создании системы управления такого радиационноопасного объекта, как ускоритель.

Сетевые средства, которые предусмотрены при создании АСИУ, включают как проводные каналы Ethernet 10/100 Мбит/с, так и беспроводные каналы 802.11 11/22 Мбит/с. В качестве основной базы данных АСИУ целесообразно использовать коммерческий продукт компании Microsoft Co: SQL Server 2005 Standart Edition. Высокая надежность и эффективность управления, возможность автоматической оптимизации базы данных в соответствии с нагрузкой и имеющимися аппаратными ресурсами, высокая степень защиты – все это соответствует требованиям, которые предъявляются к системам ускорителя.

6. Размещение оборудования ускорителя

Линейный ускоритель-инжектор устанавливается в специальном взрывобезопасном помещении, оборудованном системами радиационной и пожарной безопасности. Температура воздуха в помещении должна поддерживаться на уровне $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

На **рис. 18** показано расположение протонной пушки, транспортных каналов, ускоряющей системы и дебанчера. Перечисленные системы должны устанавливаться на платформе не связанной с полом основного помещения. Установка ускорителя на «ось» производится с помощью юстировочных элементов, соединяющих контейнеры секций с опорами. Контроль положения проводится оптическими методами с помощью микротелескопа. Вдоль платформы располагаются кабельные каналы для размещения в них трасс технологических систем.

Система ВЧ-питания связывается с ускоряющей структурой жесткими фидерами, длина которых определяется местом расположения аппаратуры ВЧ-питания и ограничена величиной затухания. Низковольтная часть аппаратуры может располагаться в помещении пульта управления ускорителем.

Элементы технологических систем располагаются как в экспериментальном зале, так и вне него. На минимальном расстоянии от ускоряющей структуры должны устанавливаться блоки, обеспечивающие температуру охлаждающей воды $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. При размещении блоков питания вакуумных насосов необходимо учитывать значительную величину напряжения (7 кВ), подаваемого на насосы.

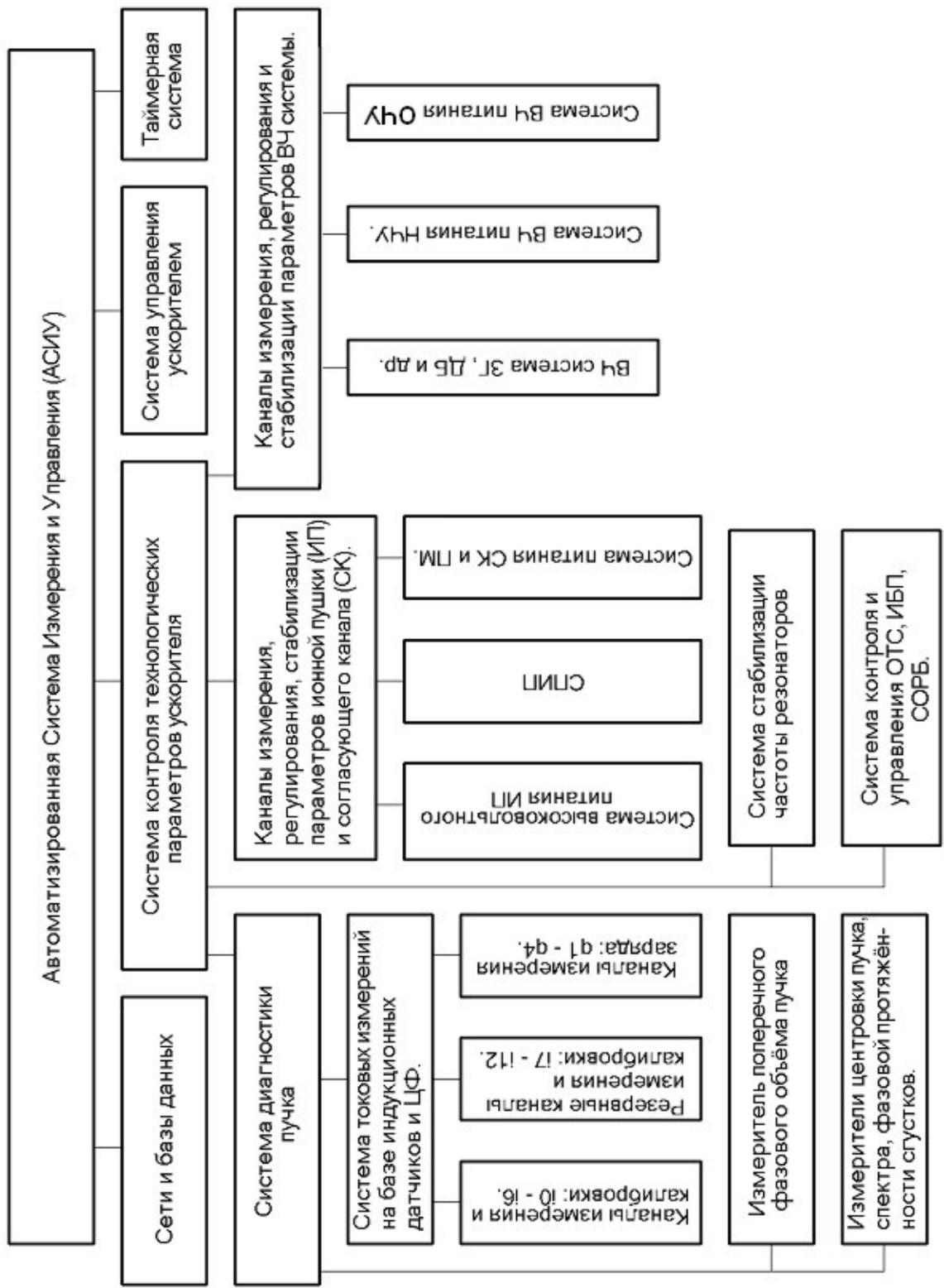


Рис. 17. Структурная схема АСИУ.

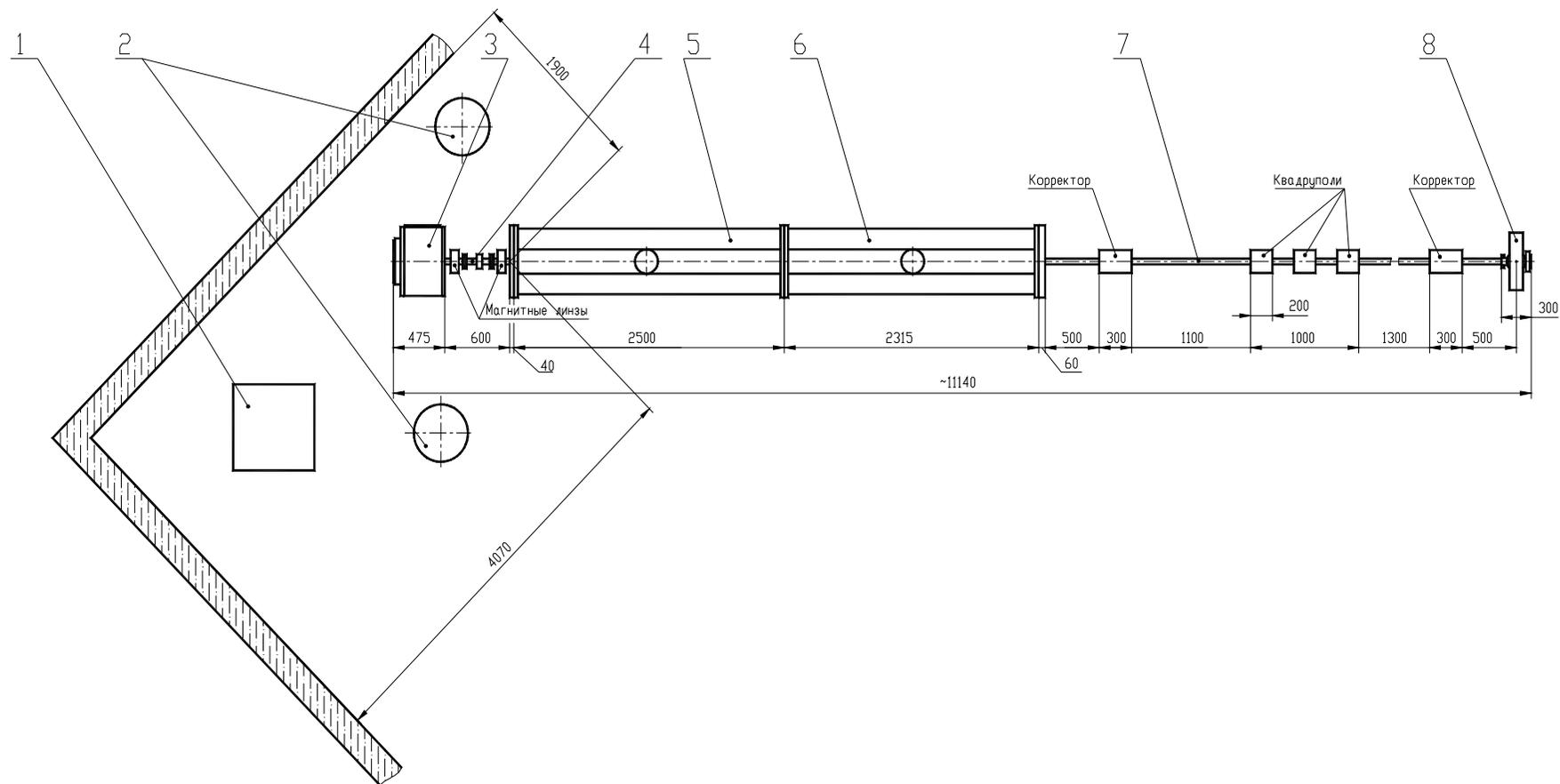


Рис. 18.

Размещение линейного ускорителя-инжектора в помещении. 1 — стойка питания; 2 — импульсные трансформаторы; 3 — источник протонный; 4 — ионопровод; 5 — НЧУ; 6 — ЩЧУ; 7 — ионопровод; 8 — дебанчер.

Заключение

В настоящей работе изложены принципы построения систем линейного ускорителя-инжектора для Центра протонно-лучевой терапии в г. Москве. Обоснован выбор технических и конструкторских решений. Представлены аналоги, на базе которых планируется создание ускорителя.

Работа выполнена в рамках договора между ГНЦ ИФВЭ и ФГУП «МРТИ РАН» 204-1/2007 ОТ 01.07.07 «Разработка предпроектной документации на линейный ускоритель-инжектор Центра протонно-лучевой терапии».

Литература

1. А.В.Жеребцов, А.П.Мальцев, В.А.Тепляков. Расчетные физические параметры ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой – инжектора в бустер протонного синхротрона ИФВЭ. Препринт ИФВЭ, 90-29, Протвино, 1990 .
2. Yu.Budanov, O.Belyaev, I.Zvonarev, A.Maltsev, E.Mazurov, V.Stepanov, S.Strekalovskiyh, V.Teplyakov, N.Tyurin. STATUS OF THE URAL30M LINAC – A NOVEL INJECTOR TO THE ACCELERATOR COMPLEX OF IHEP. Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, pp. 273-275.

Рукопись поступила 22 мая 2008 г.

О.К.Беляев, Ю.А.Буданов, И.А.Звонарев и др.
Линейный ускоритель-инжектор Центра протонно-лучевой терапии.
Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 22..05.2008. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 2,5 . Уч.– изд.л. 2.1. Тираж 90. Заказ 40. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

