

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЦ-350

*Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев, Б. Н. Гикал, С. Л. Богомолов,
О. Н. Борисов, В. А. Веревокин, А. А. Ефремов, И. А. Иваненко,
Г. Н. Иванов, Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача, И. В. Калагин, И. В. Колесов,
С. В. Пащенко, М. Н. Сазонов, А. В. Тихомиров, Й. Франко, М. В. Хабаров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

К. К. Кадыржанов, А. Ж. Тулеушев

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алма-Ата, Казахстан

Представлено описание и технические характеристики ускорительного комплекса ДЦ-350.

The description and technical characteristics of DC-350 accelerator facility are presented.

PACS: 29.20.Dg

ВВЕДЕНИЕ

Работы по синтезу новых элементов Периодической таблицы Д. И. Менделеева являются фундаментальным и приоритетным направлением современной ядерной физики и радиохимии. Долгосрочные программы работ в данном направлении приняты в Дубне (РФ), Беркли (США), Дармштадте (Германия), Орсе (Франция), РИКЕН (Япония) и в последние годы в Ланьчжоу (Китай). В настоящее время лидером в развитии работ является Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ (Дубна).

Постановка экспериментов по синтезу новых сверхтяжелых элементов с $Z = 120-124$ в реакциях с предельно низкими (на сегодня недостижимыми) сечениями 0,1–0,2 пб требует создания нового ускорительного комплекса, позволяющего получать пучки ионов железа, никеля, кобальта с рекордными интенсивностями.

Базовым компонентом такого комплекса является циклический ускоритель тяжелых ионов с параметрами, значительно превосходящими параметры всех существующих в мире аналогичных установок:

- ускорение ионов ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{58}Fe , ^{64}Ni до энергии ≈ 5 МэВ/нуклон;
- интенсивность пучка на мишени до $2-3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$;
- бесступенчатая вариация энергии частиц пучка в пределах 4,5–5,5 МэВ/нуклон;
- моноэнергетичность пучка $\pm 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ в зависимости от интенсивности;
- нестабильность энергии пучка $2 \cdot 10^{-3}$;
- размер пятна пучка на мишени с максимальным диаметром 10 мм;
- разводка пучка к 3–5 экспериментальным установкам;

- системы диагностики должны обеспечивать проводку пучка с минимальной интенсивностью от 10^9 с⁻¹;
- длительность непрерывной работы 2–3 месяца.

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (Дубна) в сотрудничестве с Институтом ядерной физики (Алма-Ата, Казахстан) проведено эскизное проектирование ускорительного комплекса ДЦ-350, отвечающего поставленным выше задачам. Основой ускорительного комплекса является изохронный циклотрон ДЦ-350, способный производить интенсивные пучки тяжелых ионов от лития (Li) до висмута (Bi) с энергией 3–12 МэВ/нуклон. В состав комплекса также входит источник ионов на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-источник), позволяющий получить пучки ионов низких энергий до 25 кэВ на единичный заряд и с токами до 400 мкА.

Научная программа нового комплекса главным образом направлена на фундаментальные исследования в области ядерной физики, такие как синтез и изучение ядерно-физических свойств сверхтяжелых элементов, радиохимическая идентификация и изучение химических свойств синтезированных элементов.

Расширение диапазона масс ускоряемых ионов как в сторону более легких (C, O), так и более тяжелых (Xe, Bi), а также увеличение диапазона энергий получаемых ионных пучков исключительно важно для проведения тестовых экспериментов и расширения функциональных возможностей комплекса. К их числу относятся, например, изучение других классов ядерных реакций, производство изотопов для радиомедицины и экологии, исследования по физике конденсированных сред. Расширенные возможности комплекса позволят проводить и прикладные исследования, такие как изготовление и применение трековых мембран, модификация поверхности материалов, ионно-имплантационная нанотехнология, тестирование электронных компонент космического и авиационного оборудования.

1. СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ДЦ-350

В основу проекта ДЦ-350 положены новые разработки и технологии, полученные в ходе создания и эксплуатации созданных в ЛЯР ОИЯИ циклотронов, таких как У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-60 (Республика Казахстан). Схема комплекса ДЦ-350 показана на рис. 1.

В состав комплекса входят:

- источник ионов типа ЭЦР;
- система аксиальной инжекции пучка;
- изохронный циклотрон ДЦ-350;
- 5 каналов пучков ускоренных ионов;
- физические установки;
- технологическое оборудование.

Многозарядные ионы, получаемые в ЭЦР-источнике, транспортируются по каналу инжекции в центр циклотрона, где происходит ускорение пучка до финальной энергии. Магнитное поле циклотрона имеет четырехсекторную структуру. Высокочастотная ускоряющая система состоит из двух четвертьволновых резонаторов. Питание ВЧ-системы осуществляется от двух генераторов, работающих на частоте от 6,45 до 13 МГц. Система

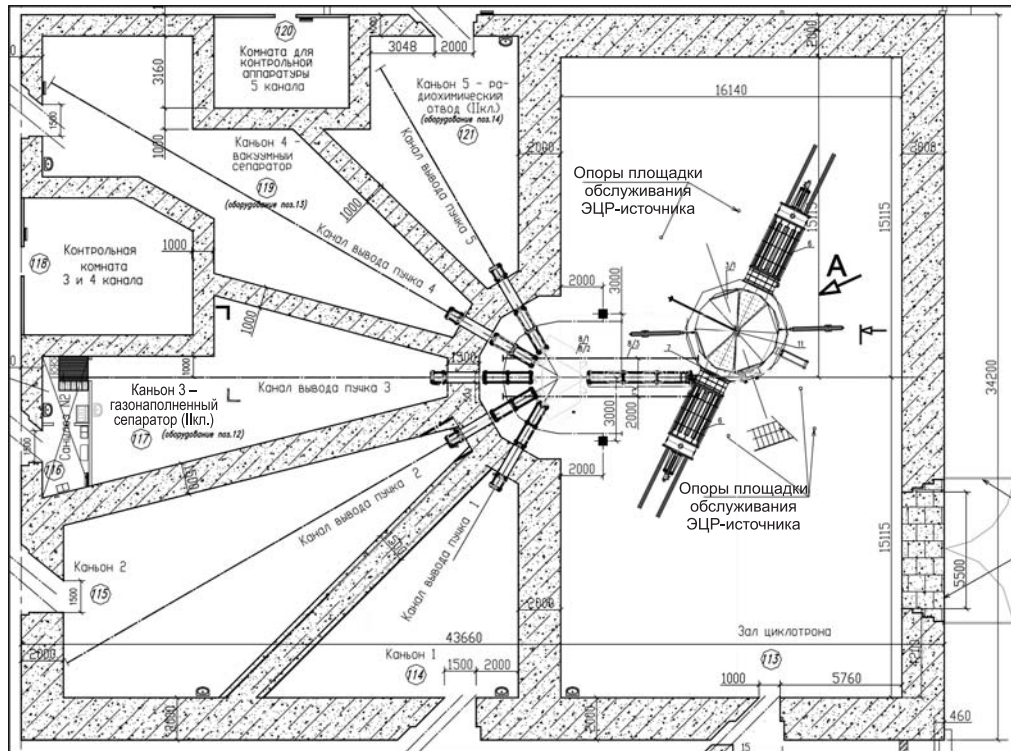


Рис. 1. Схема комплекса ДЦ-350

вывода из циклотрона состоит из электростатического дефлектора и фокусирующего магнитного канала. Система транспортировки ускоренных пучков имеет четыре канала для проведения научных исследований и специализированный канал для прикладных задач.

2. ЭЦР-ИСТОЧНИК ИОНОВ

Ионный источник должен обеспечивать получение как относительно высоких интенсивностей ионных пучков (токи пучка до 400 мкА для ионов ${}^7\text{Li}^{1+}$, ${}^{16}\text{O}^{2+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$), так и пучков ионов с достаточно высоким зарядом (например, ${}^{132}\text{Xe}^{22+}$, ${}^{209}\text{Bi}^{43+}$). Исходя из этого, основные требования к различным подсистемам ионного источника можно сформулировать следующим образом:

- Система СВЧ-питания ионного источника должна обеспечивать создание достаточно плотной плазмы, содержащей многозарядные ионы, с целью получения требуемых интенсивностей ионных пучков.
- Магнитная система ионного источника должна обеспечивать время удержания заряженных частиц, необходимое для получения ионов с требуемым зарядом. Кроме этого, уровень магнитного поля должен быть достаточен для создания замкнутой резонансной зоны для выбранной частоты СВЧ-накачки.

• Вакуумная система ионного источника должна обеспечивать остаточный вакуум в области плазменной камеры ионного источника не хуже $1 \cdot 10^{-7}$ Торр, а во время работы источника — в диапазоне $(2-7) \cdot 10^{-7}$ в области экстракции.

• Система экстракции ионного источника должна обеспечивать извлечение и формирование ионных пучков с суммарной интенсивностью до 5 мА и эмиттансом пучка с требуемым зарядом не более $200\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Использование в ЭЦР-источнике циклотрона ДЦ-350 рабочей частоты 18 ГГц позволяет получить требуемые интенсивности. При такой частоте накачки уровень резонансного магнитного поля составляет $B_{\text{рез}} = 0,64$ Тл, при этом уровень максимального магнитного поля достигает 2,0 Тл. Величина радиального магнитного поля должна составлять $B_{\text{рад}} \approx 2B_{\text{рез}} \approx 1,3$ Тл.

Создание аксиальных магнитных полей такого уровня в «теплых» магнитных системах представляет собой определенные трудности в связи с тем, что «магнитомягкое» железо, используемое для формирования магнитного поля в источнике, работает в области насыщения. Эти магнитные поля могут быть достаточно легко достигнуты в сверхпроводящей магнитной системе, а требуемый уровень радиального магнитного поля достигается при использовании современных постоянных магнитов. Сравнение параметров «теплого» и сверхпроводящего ЭЦР-источников произведено в табл. 1.

Таблица 1. Параметры ЭЦР-источников

Основные параметры	ECR «теплый»	ECR сверхпроводящий
Частота СВЧ-генератора, ГГц	18	18
Количество соленоидов	3	4
Осевое магнитное поле, Тл	1,4	2,1
Радиальное магнитное поле, Тл	1,3	1,3
Потребляемая мощность, кВт	170	30
Давление воды в системе охлаждения, атм	15	4
Габаритные размеры, мм	$\varnothing 500 \times 550$	$\varnothing 690 \times 570$
Криосистема	Отсутствует	Криокулер 40 К (35 Вт) 4 К (1 Вт)

За основу конструкции сверхпроводящей магнитной системы источника для ДЦ-350 были взяты разработки, использованные при создании магнитных систем источников DECRIS-SC (18 ГГц) [1] и DECRIS-SC2 (14 ГГц) [2].

Главной особенностью магнитных систем этих источников является использование компактного криокулера Гиффорда–Мак-Магона мощностью 1 Вт для охлаждения сверхпроводящих обмоток. Общий вид сверхпроводящей магнитной системы источника DECRIS-SC3 показан на рис. 2.

И «теплый», и сверхпроводящий варианты ЭЦР-источника имеют свои преимущества и недостатки. Преимуществом «теплого» варианта является относительная простота в изготовлении и эксплуатации, недостатком — большое энергопотребление при меньшем уровне магнитного поля. Преимуществом сверхпроводящего варианта является существенно меньшее энергопотребление, его недостатком — эксплуатационные расходы,

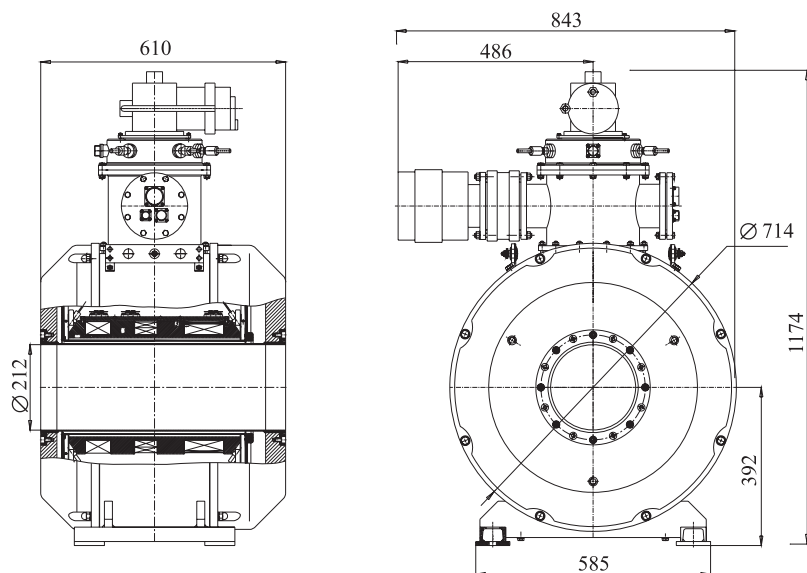


Рис. 2. ЭЦР-источник DECRIS-SC3

связанные с необходимостью периодической (через 10–15 тыс. ч) профилактики холодной головки, что требует отепления криостата магнитной системы и наличия резервной холодной головки. В настоящее время выпускаются криокулеры на пульсирующих трубах, имеющие срок службы более 30 тыс. ч.

3. СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Система аксиальной инжекции, показанная на рис. 3, предназначена для транспортировки ионов из сверхпроводящего ЭЦР-источника (SECR) в центр циклотрона. Канал позволяет эффективно инжектировать ионы элементов от лития до висмута с отношением массы к заряду 4,8–9,6 [3].

Основными оптическими элементами канала являются анализирующий магнит IM90, три соленоиды IS1–IS3 и корректирующие дипольные магниты. Значительное сокращение расстояния между SECR и анализирующим магнитом, а также увеличение напряжения экстракции из SECR до 25 кВ позволяет отказаться от размещения фокусирующего соленоида между источником и магнитом. Это ослабляет отрицательное влияние собственного поля пучка на его эмиттанс [4]. Фокусировка пучка в канале осуществляется краевым полем магнита и соленоидами IS1, IS3. Соленоид IS2 используется как корректирующий.

Анализирующий магнит IM90 имеет радиус поворота 350 мм и междуполюсный зазор 120 мм. Апертура вакуумной камеры в магните равна 110 мм. На входе и выходе магнита установлены экраны, уменьшающие протяженность его краевого поля. 3D-моделирование распределения магнитного поля магнита [5] позволило корректно определить краевые углы полюсов ($29,5^\circ$), обеспечивающие аксиальную симметрию пучка после поворота.

Инжектируемый пучок ионов поворачивается в медианную плоскость ДЦ-350 с помощью спирального инфлектора I. Для обеспечения оптимальных условий инъекции пучка во всем диапазоне ускоряемых частиц используются два варианта инфлектора с магнитными радиусами 35 и 45 мм.

Линейный (IBN1) и синусоидальный (IBN2) банчеры используются для повышения эффективности ускорения. Линейный банчер расположен на расстоянии 275 см и синусоидальный — 85 см от медианной плоскости циклотрона. Оба банчера изготовлены в виде двух металлических сеток, на которые подается в антифазах ВЧ-напряжение. Амплитуда напряжения на линейном банчере меняется от 600 до 900 В приблизительно линейно при увеличении тока пучка от 0 до 200 мкА. Амплитуда напряжения на синусоидальном банчере при этом меняется от 400 до 650 В. Эффективность группирования равна 20 % при максимальных токах пучка.

Изменение огибающих пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{6+}$ с током 190 мкА вдоль канала показано на рис. 4, а их поведение вблизи инфлектора на рис. 5.

Система диагностики пучка состоит из цилиндра Фарадея и игольчатого сканера. Щелевой коллиматор и устройство реррег-рот используются для варьирования тока пучка.

Система вакуумной откачки на горизонтальном участке состоит из трех турбонасосов с производительностью 150 л/с каждый. Насосы расположены по обеим сторонам SECR и на вакуумной камере магнита. На выходе SECR установлен также крионасос с производительностью 800 л/с. На вертикальном участке откачка осуществляется одним турбонасосом с производительностью 500 л/с и одним крионасосом с производительностью 800 л/с, установленными в блоке диагностики. Расчетное среднее давление в ионопроводе канала составляет $1 \cdot 10^{-7}$ Торр, и возможные потери частиц не превышают 10 %.

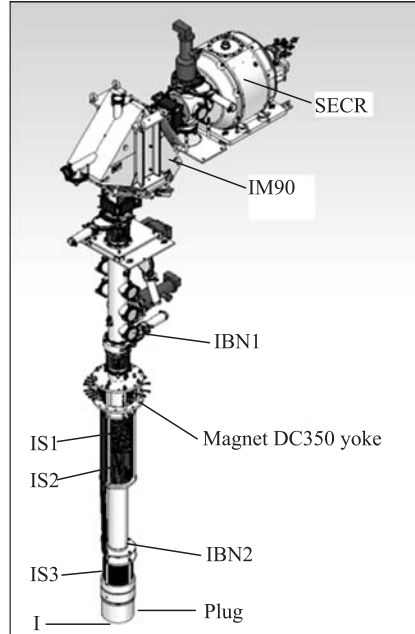


Рис. 3. Схема канала

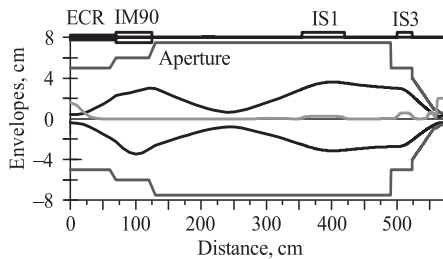


Рис. 4. Огибающие пучка $^{48}\text{Ca}^{6+}$

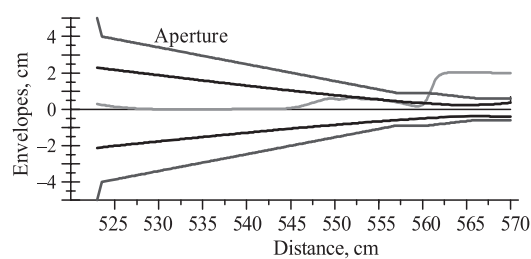


Рис. 5. Огибающие пучка $^{48}\text{Ca}^{6+}$ вблизи инфлектора

4. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ЦИКЛОТРОНА

Спроектированная магнитная структура позволяет формировать изохронное магнитное поле для рабочих режимов циклотронов ДЦ-350, приведенных на рис. 6.

Электромагнит циклотрона, показанный на рис. 7, имеет Ш-образную форму и состоит из яра, полюсных сборок, обмоток возбуждения и корректирующих катушек.

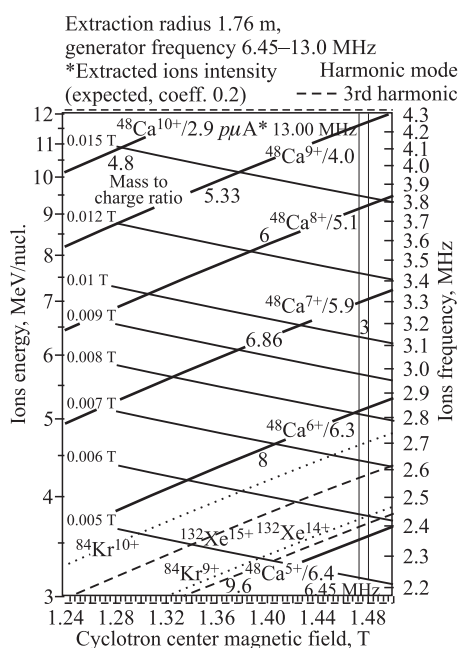


Рис. 6. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-350

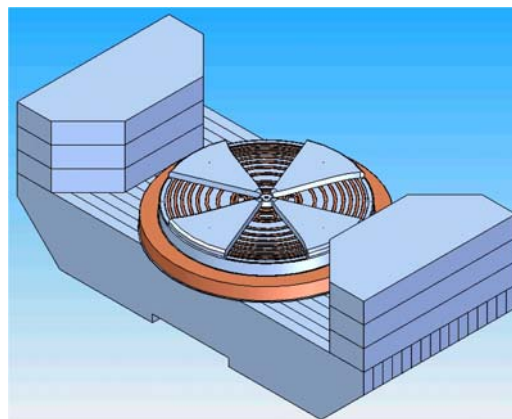


Рис. 7. Электромагнит циклотрона ДЦ-350 (показана 1/2 часть)

В рабочем зазоре магнита размещены четыре пары секторов с нулевой спиральностью. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шимами, которые являются частью секторной сборки. Азимутальная или аксиальная обработка боковых секторных шимов позволяет вносить необходимую коррекцию в распределение магнитного поля в процессе окончательного формирования изохронных условий ускорения.

В рабочем зазоре электромагнита циклотрона между секторами и полюсом расположены две сборки азимутальных корректирующих катушек и девять пар радиальных корректирующих катушек, позволяющих при изменении режима ускорения циклотрона оперативно подстраивать магнитное поле.

Основные параметры магнита циклотрона приведены в табл. 2. Среднее магнитное поле для нескольких уровней возбуждения основной катушки магнита показано на рис. 8. Вклады корректирующих радиальных катушек при номинальном токе возбуждения показаны на рис. 9.

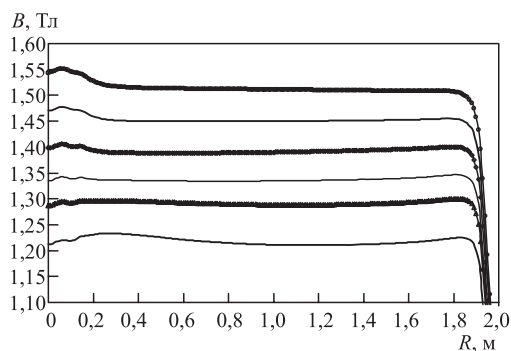


Рис. 8. Среднее магнитное поле циклотрона ДЦ-350

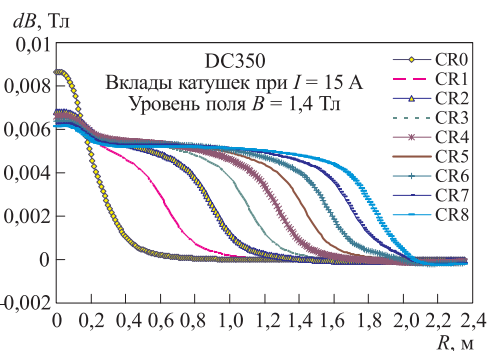


Рис. 9. Вклады корректирующих радиальных катушек

Таблица 2. Основные параметры магнита циклотрона ДЦ-350

Габаритные размеры магнита (длина / ширина / высота), м	9,13 / 4,92 / 4,0
Диаметр полюса, мм	4000
Количество секторов	4
Зазор между полюсами, мм	400
Зазор полюс–сектор, мм	25
Зазор между (плоскими) секторами, мм	80
Зазор между пробками центра, мм	190
Внешний диаметр секторов, мм	3960
Внутренний диаметр секторов, мм	258
Среднее магнитное поле на радиусе вывода, Тл	1,24–1,5
Вес магнита, т	1195
Вес наиболее тяжелой части, т	30
Максимальное число ампер-витков в обмотке	340480
Максимальный ток источника питания, А	760
Мощность системы питания обмотки, кВт	265
Вес обмотки, т	20,1
Число радиальных корректирующих катушек	9
Число азимутальных корректирующих катушек	4
Номинальный рабочий ток, А	15
Мощность системы питания корректирующих катушек, кВт	5

5. ИНФЛЕКТОР И ЦЕНТРАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ ЦИКЛОТРОНА

Инжектируемый пучок ионов поворачивается из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона с помощью спирального инфлектора и захватывается в ускорение на специально сформированных ускоряющих зазорах центральной области.

Для обеспечения оптимальных условий инжекции пучка в широком диапазоне изменения A/Z и уровня магнитного поля в циклотроне ДЦ-350 используются два варианта инфлектора с магнитными радиусами $\rho_m = 35$ и $\rho_m = 43$ мм. Электрический радиус

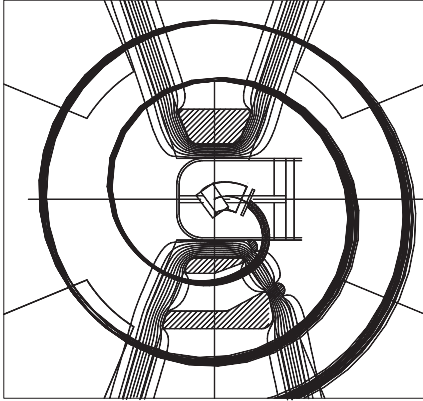


Рис. 10. Схема центральной области циклотрона ДЦ-350

инфлектора A_e в обоих вариантах равен 45 мм, при этом напряжение на электродах инфлекторов не превышает ± 7 кВ. Радиальный механизм позиционирования используется для установки и оперативной подстройки положения инфлектора в центре циклотрона. Центральная область циклотрона формирует условия захвата в ускорение инжектируемого пучка с разных стартовых радиусов 65–81 мм в зависимости от используемого инфлектора. Ускоряющее электрическое поле обеспечивает вертикальную фокусировку пучка на первых оборотах в области малых значений флаттера магнитного поля. Схема центральной области и траектории пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{7+}$ на первых оборотах показаны на рис. 10.

6. СИСТЕМА ВЫВОДА УСКОРЕННОГО ПУЧКА ИОНОВ

Для отклонения внутреннего пучка и вывода его из ускорителя предполагается использовать электростатический дефлектор. Дефлектор представляет собой две изогнутые параллельные пластины («септумная» и «потенциальная»), между которыми создается электрическое поле, отклоняющее пучок из камеры циклотрона.

Численное моделирование вывода проводилось для пучков ионов с $A/Z = 4,8-9,6$ и энергиями $W \approx 3,0-11,0$ МэВ/нукл. в соответствии с рабочей диаграммой. Для расчетов использовались расчетные карты магнитного поля. Анализ динамики пучка в данных магнитных полях показал, что максимальный средний радиус орбиты составляет ≈ 176 см.

При численных расчетах рассматривались ионы ^{48}Ca с зарядами $Z = 5^+, 6^+, 7^+, 8^+$ и 9^+ . Напряжение на дефлекторе подбиралось с учетом согласования выведенного пучка с системой транспортировки.

Дефлектор располагается в долине, и его азимутальная протяженность — 42° . Радиус входа и выхода дефлектора соответствует $R \approx 1750-1810$ мм. Радиус кривизны пластин дефлектора соответствует выводной траектории. Радиальный зазор между «септумной» и «потенциальной» пластинами — 10 мм. Максимальное напряжение на потенциальном электроде — 100 кВ.

Дефлектор состоит из двух секций (по ≈ 650 мм). Максимальная мощность выводимого пучка составляет ≈ 2 кВт. Поэтому начальная часть септумной пластины изготавливается из вольфрама (W) или тантала (Ta), толщина $\approx 0,1-0,2$ мм, высота — 40 мм. Остальная часть септума изготавливается из меди (Cu). Высота 40 мм, толщина 1–20 мм.

Потенциальные пластины обеих секций изготавливаются из Al или нержавеющей стали. Высота потенциального электрода ≈ 60 мм. Для уменьшения вероятности электрических пробоев в нем создается электронная ловушка (выборка в пластине потенциального электрода высотой 20 мм и глубиной 0,5 мм).

Оба потенциальных электрода крепятся на трех изоляторах (два опорных и один проходной). Длина изоляторов ~ 200 мм, материал — Al_2O_3 или макор (< 15 кВ/см). Вертикальный зазор между опорным изолятором и корпусом — не менее 60 мм.

Конструкция дефлектора располагается внутри дюралевого корпуса. Сверху и снизу — плакировка пластинами молибдена (Mo) толщиной 1 мм. Корпус охлаждается водой (2 л/мин).

Для компенсации влияния краевого магнитного поля циклотрона используется фокусирующий магнитный канал. Он представляет собой набор стальных элементов (сталь 10), расположенных во внешнем магнитном поле и формирующих необходимую форму магнитного поля для горизонтальной фокусировки пучка. Канал располагается между сек-

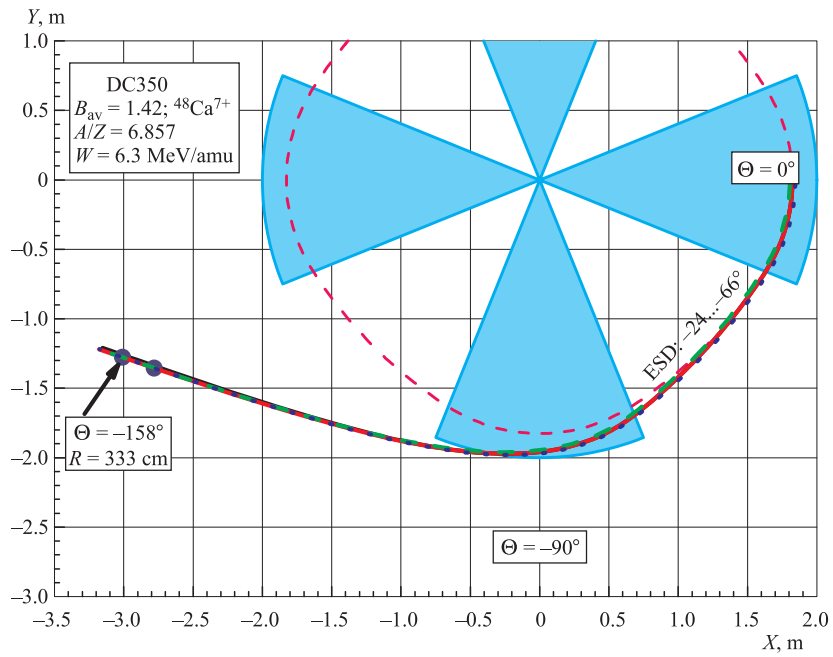


Рис. 11. Выводная траектория пучка

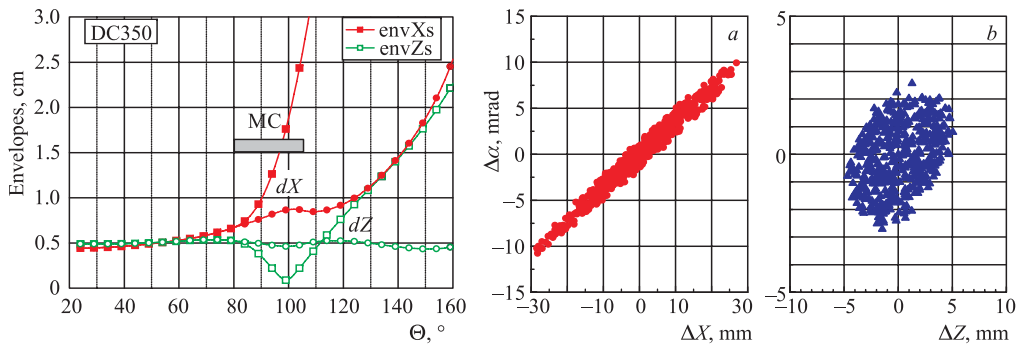


Рис. 12. Огибающие пучка без магнитных каналов и при использовании фокусирующего магнитного канала

Рис. 13. Эмиттансы выведенного пучка

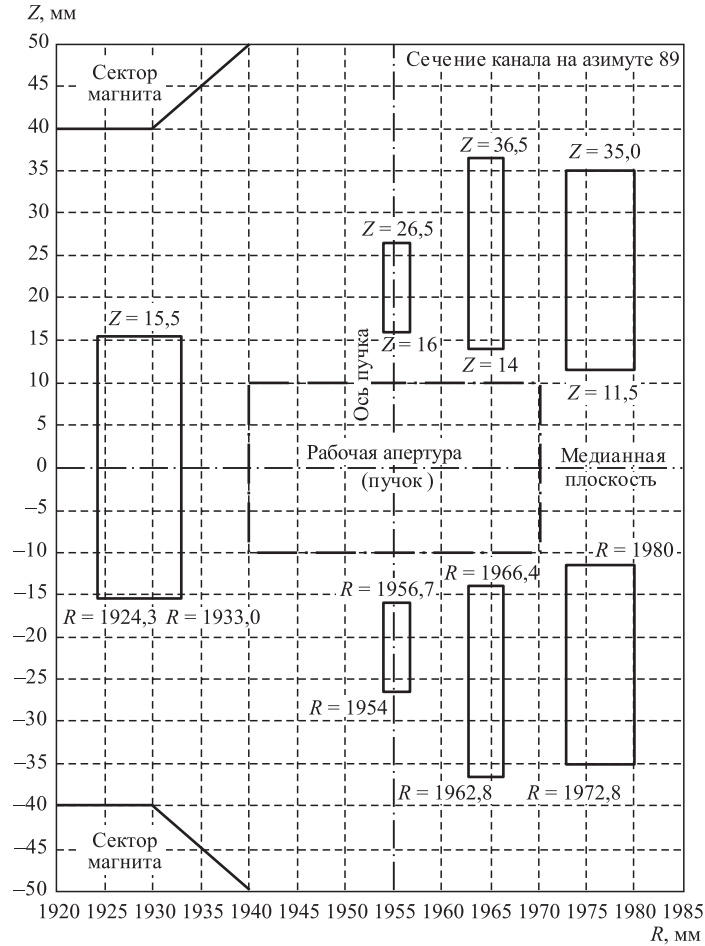


Рис. 14. Магнитный канал системы вывода

торами. Радиусы входа и выхода магнитного канала $R \approx 1915-2025$ мм. Общая протяженность канала ≈ 850 мм. На рис. 11 показана выводная траектория иона.

Радиальный эмиттанс на входе в дефлектор $E_r = 5 \text{ мм} \cdot 3 \text{ мрад} \cdot \pi = 15\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, а вертикальный $E_z = 5 \text{ мм} \cdot 2 \text{ мрад} \cdot \pi = 10\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Энергетический разброс $\delta W = \pm 1\%$. На рис. 12 приведен пример огибающих выводимого пучка, на рис. 13 изображены эмиттансы на входе в систему транспортировки и на рис. 14 показан магнитный канал системы вывода.

7. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Ускоряющая система циклотрона ДЦ-350 обеспечивает ускорение ионов с A/Z 4,8–9,6 до энергий в диапазоне 3–12 МэВ/нуклон. Пучок ионов на каждом обороте ускоряется в четырех зазорах, образуемых двумя $\sim 42^\circ$ -ми дуантами и антидуантами.

Дуанты располагаются в долинах диаметрально противоположно друг другу. Вместе с резонаторными баками дуанты и антидуанты образуют два резонансных контура. Высокочастотное напряжение от двух генераторов подводится к каждому резонансному контуру через петлю связи. Настройка резонансной системы на рабочую частоту производится при помощи закорачивающих пластин, точная подстройка резонансной частоты — вращением короткозамкнутой петли.

Таблица 3. Основные параметры ВЧ-системы

Ускоряемые ионы, A/Z	4,8–9,6
Энергия ионов, МэВ/нуклон	3–12
Гармоника ускорения	3
Напряжение на дуантах, кВ	80
Частота ВЧ-системы, МГц	6,45–13
Мощность ВЧ-питания, кВт	$2 \cdot 20$
Точность фазировки напряжений на дуантах, °	1
Стабильность амплитуды	10^{-3}
Ускоряющий зазор, мм	20–40
Рабочий ход закорачивающих пластин, мм	1986
Поток охлаждающей воды, л/мин	$2 \cdot 27$

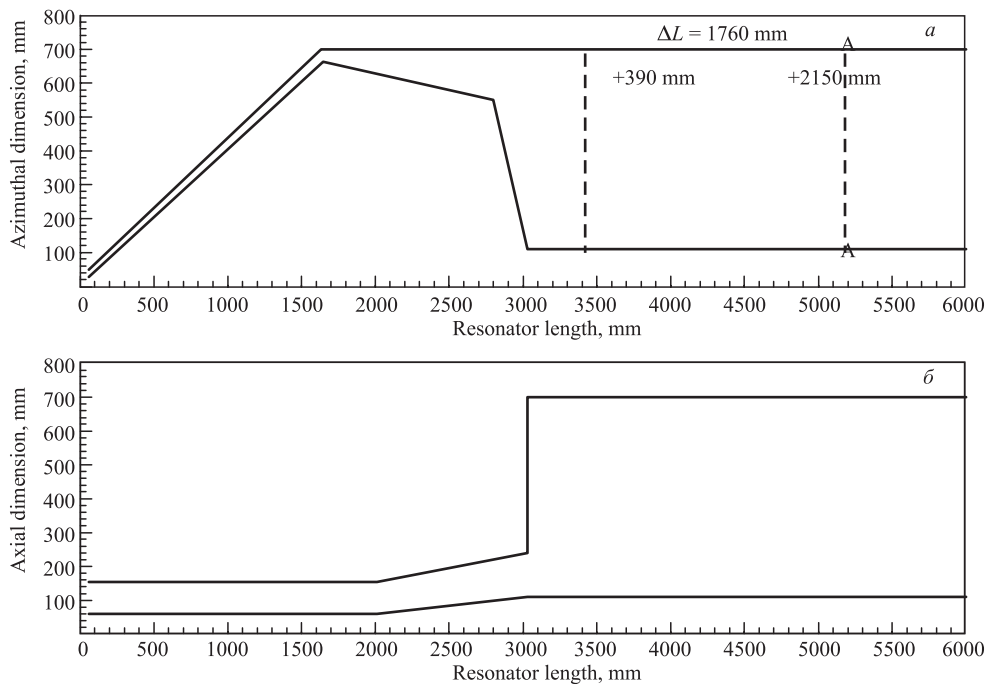


Рис. 15. Основные геометрические размеры ВЧ-системы ДЦ-350. Сечение резонансной системы: а) вид сверху; б) вид сбоку

Ускоряющая система циклотрона ДЦ-350 состоит из двух комплектов резонаторных баков и штоков, закорачивающих пластин, переходных патрубков, дуантов и антидуантов, юстировочных устройств, приводов закороток, триммеров АПЧ, петель связи, водоподводов, суппортов. Основные параметры ВЧ-системы циклотрона ДЦ-350 приведены в табл.3. Геометрические размеры ВЧ-системы циклотрона даны на рис. 15.

8. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Система вакуумной откачки ускорителя должна обеспечивать:

- откачку в области давлений $P \leq 5 \cdot 10^{-8}$ Торр;
- безмасляную откачку;
- высокое давление запуска $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$ Торр;
- нечувствительность к газовым нагрузкам в случае срыва вакуума;
- высокую скорость откачки при минимальных габаритах;
- возможность поиска течей;
- возможность дистанционного (компьютерного) управления.

Наиболее полно вышеуказанным требованиям удовлетворяет комбинация турбонасосов и крионасосов. Использование турбонасосов обусловлено необходимостью проведения работ по поиску течей и создания предварительного вакуума в камере ускорителя $P \leq 10^{-5}$ Торр, что обеспечит длительную работу крионасосов без регенерации.

Запорная арматура будет укомплектована шиберными затворами VAT Series 14 и VAT Series 12 (VAT, Швейцария). Данная серия выпускается в широком диапазоне типоразмеров, имеет модификации приводов (ручной и электропневматический).

Измерительная аппаратура будет укомплектована датчиками TPR017 типа Pirani (измерение форвакуума $1000-5 \cdot 10^{-4}$ Торр) и IKR050 типа Penning (измерение высокого вакуума $5 \cdot 10^{-3}-10^{-9}$ Торр). Использование этих датчиков обеспечит высокую надежность, нечувствительность к ухудшению вакуума (вплоть до атмосферы), измерение вакуума в пределах $P = 10^{-3}-1 \cdot 10^{-8}$ Торр (для высоковакуумных датчиков) и возможность работы в условиях сильного магнитного поля. В качестве вакуумметра для этих датчиков предполагается использовать TPG300, имеющие четыре канала измерения вакуума каждый. Такие измерительные системы хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации на комплексе аксиальной инжекции ускорителя У-400.

Для эксплуатации ускорителя будут использоваться следующие форвакуумные линии:

- Линия форвакуумной откачки ускорителя в диапазоне $760-2 \cdot 10^{-1}$ Торр. Предполагается использовать форнасос DUO 250 (PFEIFFER VACUUM, Германия) со скоростью ~ 70 л/с. Откачка ускорителя в диапазоне $2 \cdot 10^{-1}-1 \cdot 10^{-2}$ Торр осуществляется через эту же форлинию, но с использованием насоса типа Roots со скоростью откачки ~ 500 л/с. В качестве такого насоса рассматривается насос WKP 2000 AS (PFEIFFER VACUUM, Германия). Также предполагается использовать эту форлинию для регенерации криогенных насосов.

- Линия фороткачки турбонасосов. Предполагается использовать форнасос DUO 120 (PFEIFFER VACUUM, Германия) со скоростью ~ 33 л/с. Для обеспечения безаварийной

работы ускорителя предполагается установка на эту форлинию двух насосов с возможностью их коммутации.

- Линия фороткачки корректирующих катушек и шлюзов пробников и инфлектора. Предполагается использовать форнасос DUO 65 (PFEIFFER VACUUM, Германия) со скоростью ~ 18 л/с.

Откачка камеры ускорителя осуществляется в пять этапов в течение ~ 70 ч:

- 1-й этап — форвакуумная откачка камеры до давления $P \leq 2 \cdot 10^{-1}$ Торр форнасосом CFP1;
- 2-й этап — форвакуумная откачка камеры до давления $P \leq 1 \cdot 10^{-2}$ Торр насосом CRP1;
- 3-й этап — откачка камеры турбонасосами CP1–CP6. Параллельно осуществляется регенерация крионасосов CP7–CP12 и их запуск. К моменту выхода крионасосов на рабочий режим ($T = 16–18$ К) давление в камере составляет $P \leq 5 \cdot 10^{-5}$ Торр;
- 4-й этап — откачка камеры турбонасосами P7–P10 и крионасосами P1–P6;
- 5-й этап — после включения магнитного поля турбонасосы CP1 и CP3 выключаются.

Принципиальная схема системы вакуумной откачки циклотрона ДЦ-350 показана на рис. 16.

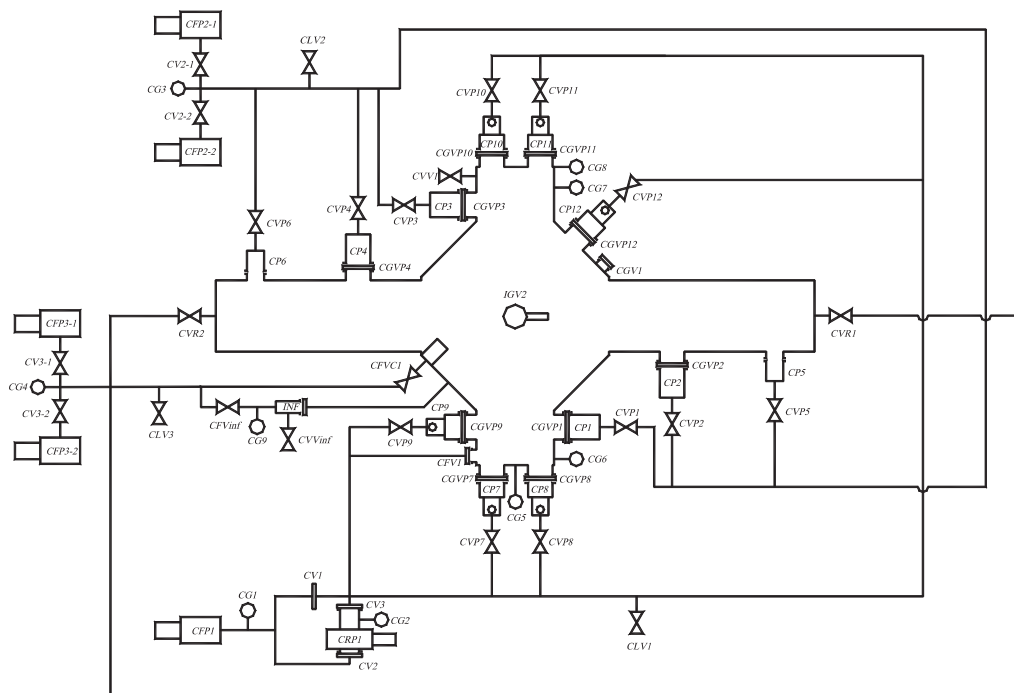


Рис. 16. Принципиальная схема системы вакуумной откачки

9. КОМПОНОВКА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-350

Расположение основных элементов циклотрона ДЦ-350 показано на рис. 17.

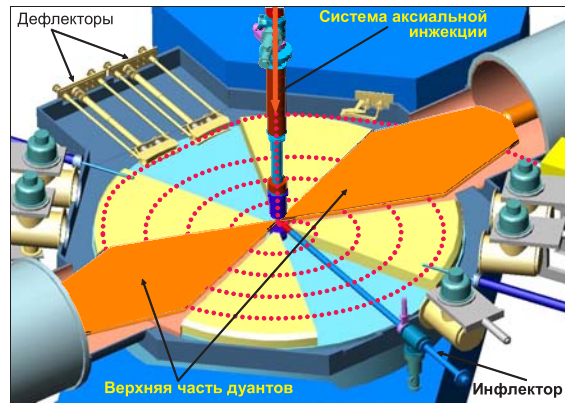


Рис. 17. Компонировка циклотрона ДЦ-350

10. КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Схема каналов транспортировки ионов, ускоренных в циклотроне ДЦ-350, представлена на рис. 18.

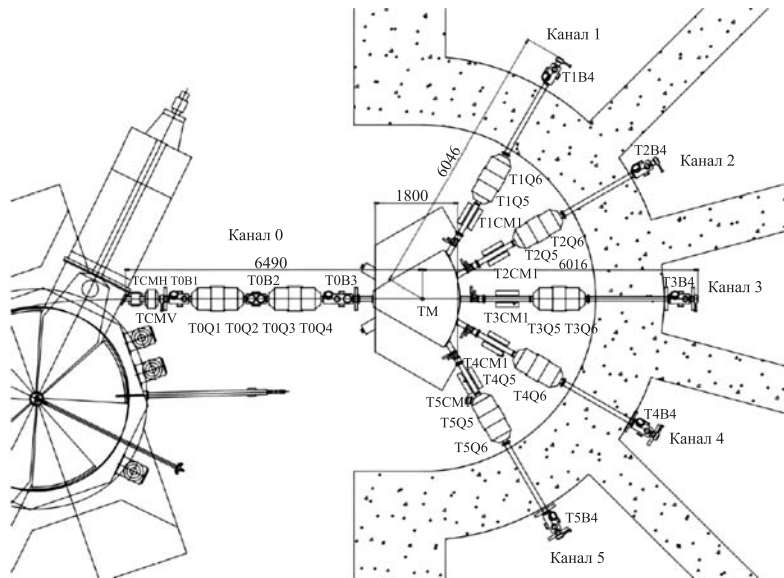


Рис. 18. Схема каналов транспортировки

Система транспортировки ионных пучков состоит из пяти каналов, которые используются для проведения научно-прикладных исследований. Выводной магнит ТСМ позволяет корректировать ось пучка в пределах $\pm 2,5^\circ$. Два дублета квадрупольных линз Т0Q1–Т0Q4 формируют параллельный пучок на входе коммутирующего магнита ТМ. Далее пучок транспортируется оптическими элементами каждого канала и формируется на мишени в соответствии с требованием физического эксперимента. Магнит ТМ обеспечивает поворот ионных пучков на углы $\pm 60^\circ$ (канал 1 и канал 5), а также на углы $\pm 30^\circ$ (канал 2 и канал 4). При отключенном магните ТМ ионный пучок транспортируется по каналу 3.

На рис. 19 приведен пример рассчитанных зависимостей горизонтального (Н) и вертикального (V) полуразмеров пучка ионов от длины в каналах 1 и 4 [6].

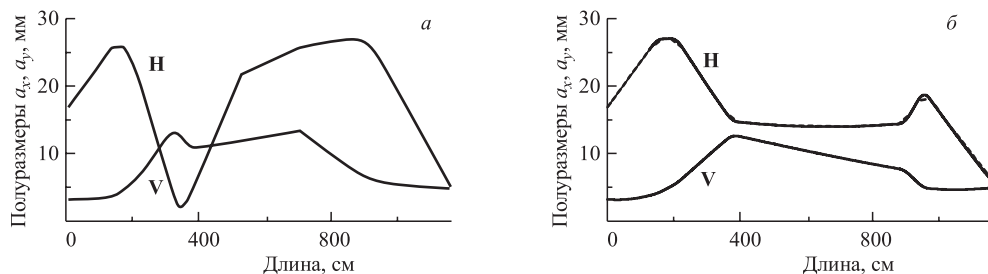


Рис. 19. Огибающие пучка в канале 1 (а) и канале 4 (б)

Устройства для измерения параметров пучка будут располагаться в восьми диагностических блоках Т0В1–3, Т1–5В4. Цилиндры Фарадея будут применяться для измерения тока пучка. Подвижные люминофоры с ТВ-камерами и игольчатые сканеры будут использоваться для измерения профиля пучка и измерения распределения плотности частиц в поперечном сечении пучка. Апертурные диафрагмы будут постоянно находиться перед разводящим магнитом ТМ и в конце каждого канала для настройки транспортировки пучков вдоль каналов. Щелевые коллиматоры будут использоваться для изменения интенсивности пучка и поперечного распределения его плотности.

11. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электроснабжение циклотрона ДЦ-350 и экспериментальных установок осуществляется от сети переменного тока $3 \times 380/220$ В, 50 Гц с системой заземления TN-S.

Таблица 4. Краткие технические характеристики

Установка	Полная установленная мощность, кВт · А	Полная потребляемая мощность, кВт · А	Активная потребляемая мощность, кВт
Циклотрон ДЦ-350	1497	1350	1150
Экспериментальные установки	850	590	480
Итого	2347	1940	1630

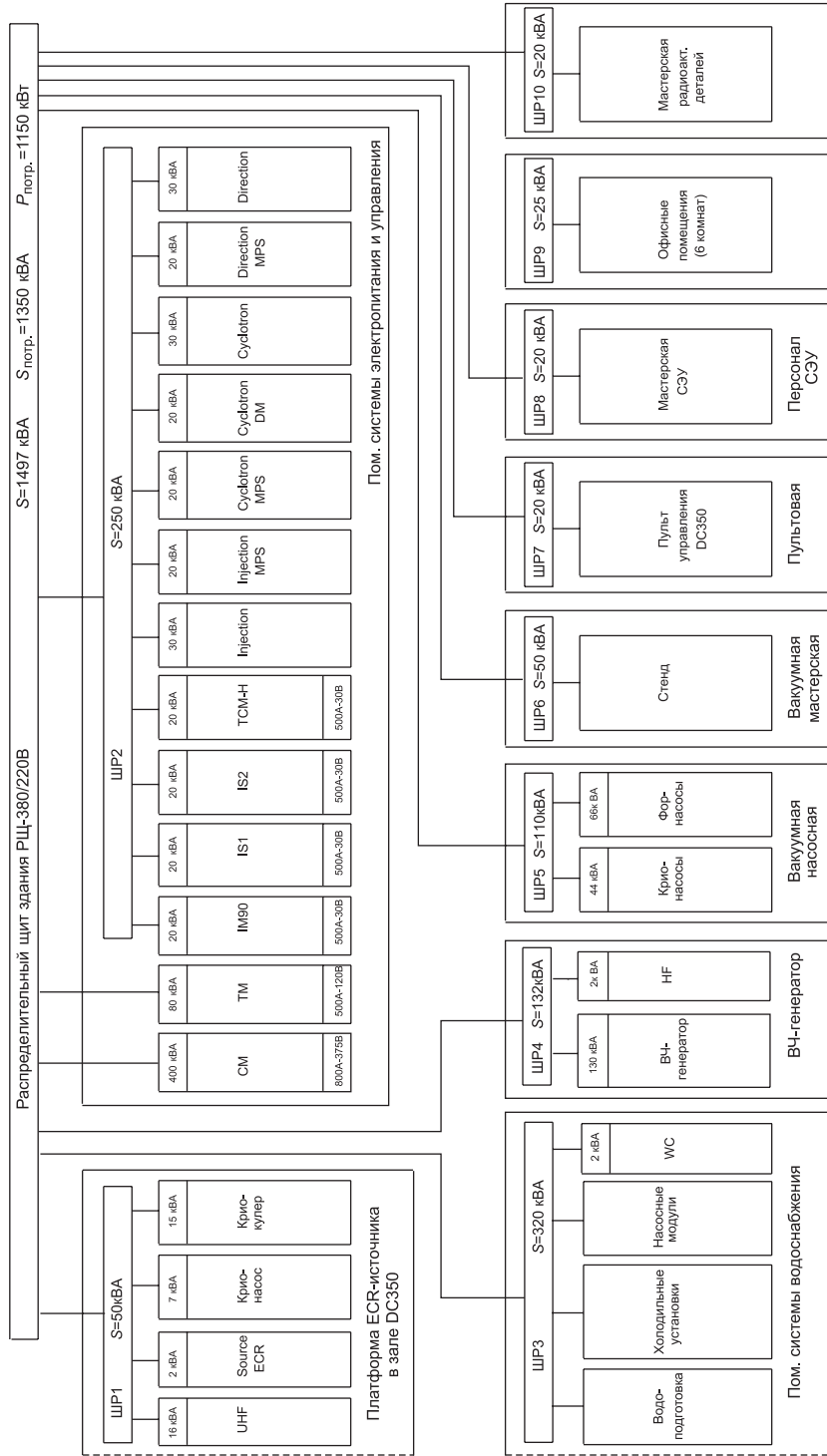


Рис. 20. Структурная схема электроснабжения циклотрона ДЦ-350. S — полная установленная мощность (кВ · А); $S_{\text{погр}}$ — полная потребляемая мощность (кВ · А); $P_{\text{погр}}$ — активная потребляемая мощность (кВт); ШПР — шкаф распределительный

Краткие технические характеристики приведены в табл. 4. Структурные схемы электроснабжения приведены на рис. 20, 21.

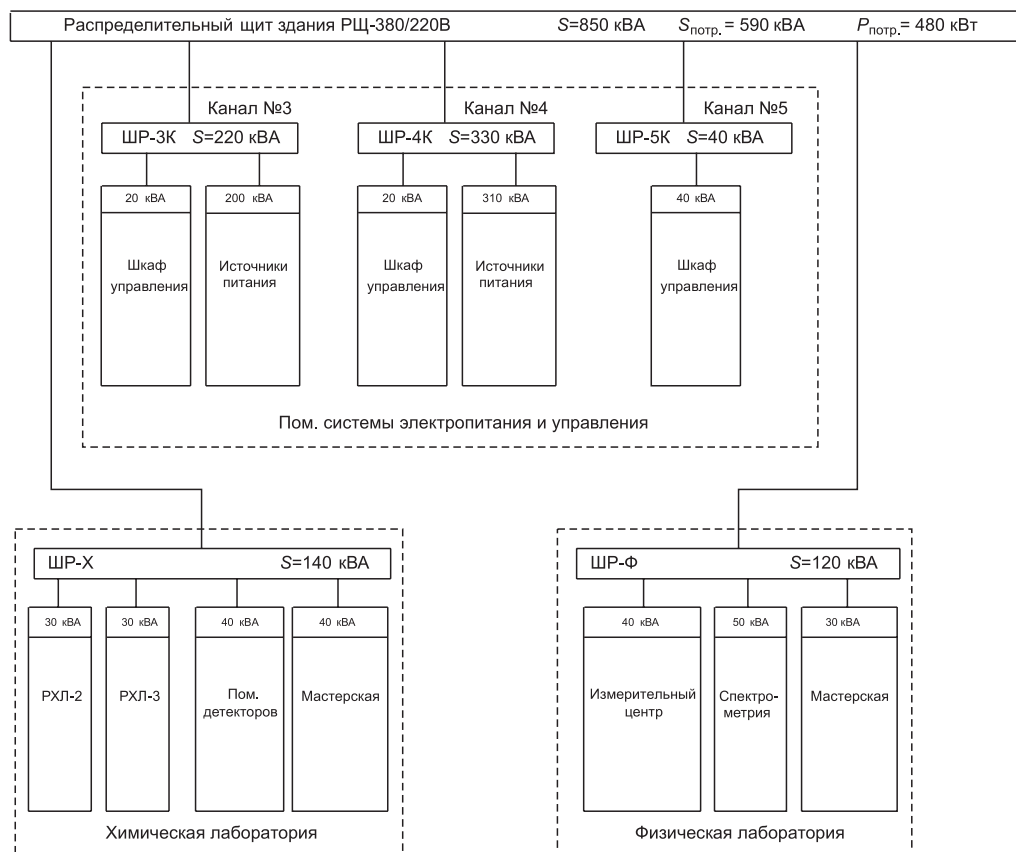


Рис. 21. Структурная схема электроснабжения экспериментальных установок. Обозначения те же, что и на рис. 20

12. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Система охлаждения ускорительного комплекса ДЦ-350 построена по двухконтурному принципу. Циркулирующий теплоноситель I контура (деионизированная вода с проводимостью 5,5 мкСм/см) связан с циркулирующим хладагентом II контура через теплообменник.

Технически I и II контуры системы охлаждения являются замкнутыми циркуляционными системами без разрыва струи. В летний период утилизация тепла производится через холодильную установку. В зимний период используется выносная сухая градирня (драйкулер). Все насосное оборудование имеет резервирование. Система контроля и управления обеспечивает автоматику работы устройств системы водоохлаждения и контроль температур и потоков теплоносителя через устройства ускорительного комплекса.

Схема системы охлаждения показана на рис. 22.

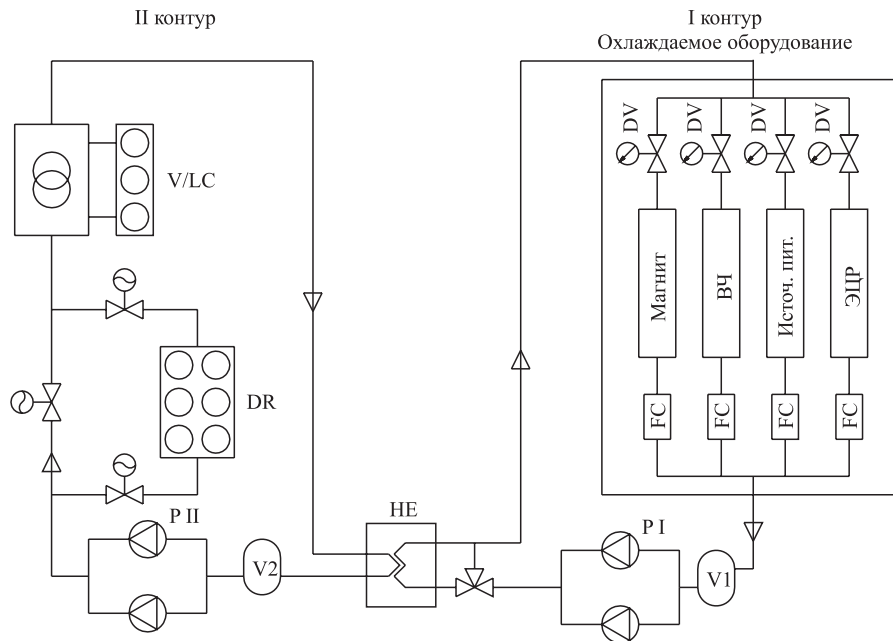


Рис. 22. Схема системы охлаждения комплекса ДЦ-350

13. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления ускорителя ДЦ-350 разрабатывается в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. АСУ ДЦ-350 обеспечивает выполнение следующих функций:

- сбор, обработку и выдачу технологическому персоналу оперативной информации о режиме работы ускорителя;
- обеспечение безаварийной работы всех систем ускорителя, автоматическое отключение систем в аварийной ситуации, звуковое предупреждение оператора о работе ускорителя;
- автоматическое включение/выключение отдельных систем ускорителя;
- протоколирование и архивирование режимов работы ускорителя;
- автоматическое задание режимов работы систем ускорителя исходя из архивных значений режимов ускорений;
- обеспечение управления и контроля работы ускорителя через внешнюю информационную сеть.

Конструктивно АСУ ДЦ-350 располагается в 20 шкафах, из них система источников питания ускорителя занимает 11 шкафов. Управление всех шкафов осуществляется при помощи унифицированных контроллеров SmartBox-6, разработанных в ЛЯР ОИЯИ. Все контроллеры объединены в единую сеть Ethernet. Более подробная информация о составе аппаратуры и ее характеристиках приведена на сайте <http://smartbox.jinr.ru>. Все

шкафы управления и источники питания размещены в непосредственной близости от контролируемого оборудования.

Источники питания спроектированы и разработаны на предприятии EVPU г. Нова-Дубница, Словакия. Источники унифицированы по схемным решениям, протоколу обмена и конструктивному исполнению.

На пульте управления установлены три компьютера. Базовый компьютер осуществляет связь с периферийным оборудованием и обеспечивает все необходимые функции по поддержке и хранению базы данных. Второй и третий компьютеры получают базу данных от первого компьютера по Ethernet и позволяют работать двум операторам, производя одновременный контроль нескольких систем ускорителя. Третий компьютер является мобильным и может обеспечивать функцию местного пульта при выполнении профилактических и ремонтных работ на ускорителе. В этом случае он подключается к Ethernet-розетке, установленной в зале ускорителя. Управление параметрами ускорителя может осуществляться при помощи клавиатуры, мыши и панели из восьми энкодеров.

Программные средства АСУ ускорительных комплексов состоят из прикладных программ пользователя и программ разработки проекта. Программное обеспечение создается на платформе операционной системы реального времени QNX и системы разработки АСУ ТП SCADA FlexControl. Для работы с QNX в графическом режиме используется графический оконный интерфейс Photon. Внешний вид окон управления отдельными

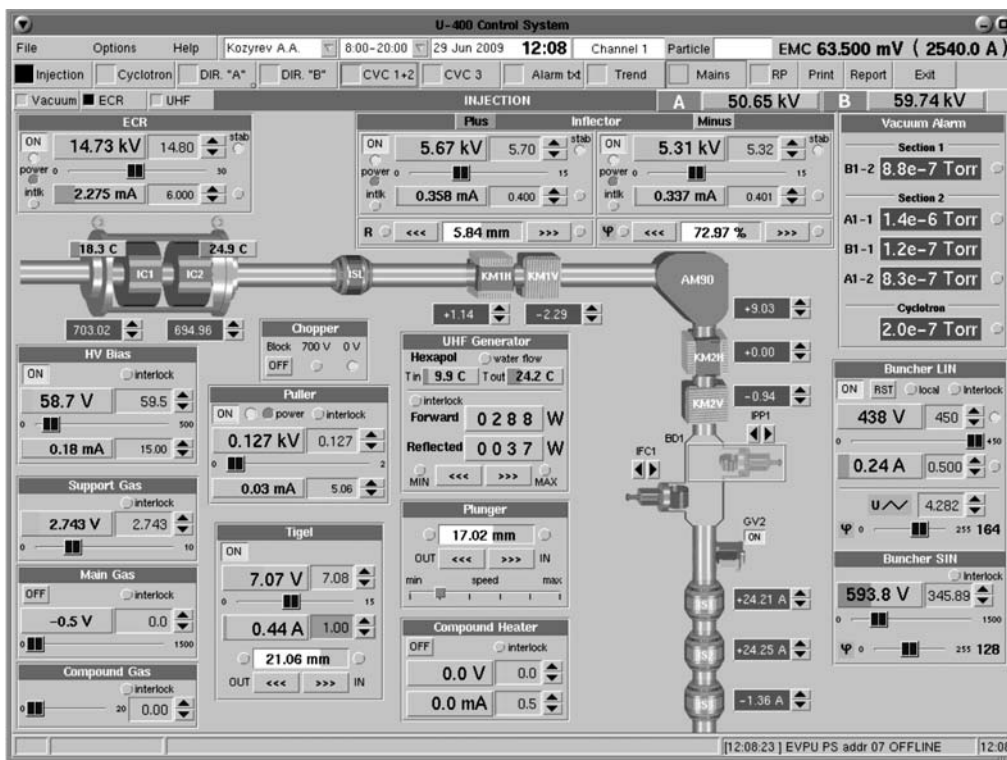


Рис. 23. Окно управления ускорителем

подсистемами ускорителя представлен на примере окна управления ускорителя У-400 ЛЯР на рис. 23.

14. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

Основные параметры пучков ионов, ускоренных в циклотроне ДЦ-350, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры пучков ионов

Ионы	Минимальная энергия ионов, МэВ/нукл.	Максимальная энергия ионов, МэВ/нукл.	Полная энергия ионов, МэВ	Интенсивность ионного источника, част. мкА	Интенсивность выведенного пучка, част. мкА	Мощность выведенного пучка, Вт
${}^7\text{Li}^{1+}$	4,67	6,82	47,7	400	40	1910
${}^{12}\text{C}^{2+}$	6,37	9,29	111,5	150	15	1672
${}^{14}\text{N}^{2+}$	4,68	6,83	95,6	150	20	1912
${}^{16}\text{O}^{2+}$	3,59	5,24	83,8	200	20	1677
${}^{16}\text{O}^{3+}$	8,05	11,75	188,0	100	10	1880
${}^{20}\text{Ne}^{3+}$	5,16	7,54	150,7	100	10	1507
${}^{20}\text{Ne}^{4+}$	9,16	12,00	240,0	80	8	1920
${}^{24}\text{Mg}^{3+}$	3,59	5,24	125,7	100	10	1257
${}^{24}\text{Mg}^{4+}$	6,37	9,29	223,0	50	5	1115
${}^{24}\text{Mg}^{5+}$	9,94	12,00	288,0	70	7	2016
${}^{27}\text{Al}^{3+}$	3,00	4,14	111,8	100	10	1118
${}^{27}\text{Al}^{4+}$	5,04	7,35	198,5	50	5	992
${}^{27}\text{Al}^{5+}$	7,85	11,46	309,4	30	3	928
${}^{32}\text{S}^{4+}$	3,59	5,24	167,7	70	7	1174
${}^{32}\text{S}^{5+}$	5,60	8,17	261,5	50	5	1308
${}^{32}\text{S}^{6+}$	8,06	11,75	376,0	50	5	1880
${}^{40}\text{Ar}^{4+}$	2,95	3,36	134,2	100	10	1342
${}^{40}\text{Ar}^{5+}$	3,59	5,24	209,6	70	7	1467
${}^{40}\text{Ar}^{6+}$	5,17	7,54	301,6	50	5	1508
${}^{40}\text{Ar}^{8+}$	9,16	12,00	480,0	40	4	1920
${}^{48}\text{Ca}^{5+}$	2,95	3,64	174,7	30	5	874
${}^{48}\text{Ca}^{6+}$	3,59	5,24	251,5	24	4	1006
${}^{48}\text{Ca}^{7+}$	5,17	7,54	361,9	24	4	1448
${}^{48}\text{Ca}^{8+}$	6,37	9,30	446,4	18	3	1339
${}^{48}\text{Ca}^{9+}$	8,06	11,75	564,0	12	2	1128
${}^{48}\text{Ca}^{10+}$	9,94	12,00	576,0	6	1	576
${}^{58}\text{Fe}^{7+}$	3,35	4,89	283,6	24	4	1134
${}^{58}\text{Fe}^{9+}$	5,53	8,07	468,1	18	3	1404
${}^{58}\text{Fe}^{11+}$	8,24	12,00	696,0	6	1	696
${}^{58}\text{Fe}^{13+}$	11,49	12,00	696,0	1,8	0,3	209
${}^{64}\text{Ni}^{7+}$	2,95	4,01	256,6	18	3	770
${}^{64}\text{Ni}^{9+}$	4,54	6,63	424,3	18	3	1273
${}^{64}\text{Ni}^{11+}$	6,78	9,88	632,3	15	2,5	1581
${}^{64}\text{Ni}^{13+}$	9,44	12,00	768,0	6	1	768

Продолжение табл. 5

Ионы	Минимальная энергия ионов, МэВ/нукл.	Максимальная энергия ионов, МэВ/нукл.	Полная энергия ионов, МэВ	Интенсивность ионного источника, част. мкА	Интенсивность выведенного пучка, част. мкА	Мощность выведенного пучка, Вт
$^{84}\text{Kr}^{9+}$	2,94	3,85	323,4	15	2,5	809
$^{84}\text{Kr}^{10+}$	3,26	4,75	399,3	15	2,5	998
$^{84}\text{Kr}^{11+}$	3,94	5,75	482,8	15	2,5	1207
$^{84}\text{Kr}^{12+}$	4,69	6,84	574,6	9	1,5	862
$^{84}\text{Kr}^{13+}$	5,49	8,02	673,6	6	1	674
$^{132}\text{Xe}^{14+}$	2,95	3,78	498,3	7,5	1,5	747
$^{132}\text{Xe}^{15+}$	2,97	4,33	571,8	6	1	572
$^{132}\text{Xe}^{16+}$	3,37	4,93	650,4	6	1	650
$^{132}\text{Xe}^{17+}$	3,81	5,56	733,9	5	0,8	587
$^{132}\text{Xe}^{18+}$	4,27	6,23	822,4	4	0,7	576
$^{132}\text{Xe}^{19+}$	4,75	6,94	916,1	3	0,5	458
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	5,27	7,69	1014,7	2,5	0,4	406
$^{132}\text{Xe}^{21+}$	5,81	8,47	1118,3	2	0,3	335
$^{132}\text{Xe}^{22+}$	6,37	9,29	1226,7	1,5	0,25	307
$^{209}\text{Bi}^{23+}$	2,95	4,06	849,2	3	0,5	425
$^{209}\text{Bi}^{30+}$	4,73	6,90	1442,5	0,25	0,025	36

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Efremov A. et al.* Status of the Ion Source DECRIS-SC // Rev. of Sci. Instr. 2006. V. 77. P. 03A320.
2. *Bekhterev V. V. et al.* The Project of the Superconducting ECR Ion Source DECRIS-SC2 // Proc. of the 17th Intern. Workshop on ECR Ion Sources and Their Appl., IMP, Lanzhou, China, Sept. 17–21, 2006. High Ener. Phys. and Nucl. Phys. A Ser. J. of the Chin. Phys. Soc. (C). 2007. V. 31. Supp.I. P. 23–26.
3. *Gulbekyan G. G. et al.* Axial Injection Channel of the DC-350 Cyclotron // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Cycl. and Their Appl., Giardini Naxos, Italy, Sept. 30–Oct. 5, 2007.
4. *Kazarinov N.* Non-linear Distortion of Multi-component Heavy Ion Beam Emittance Caused by Space Charge Fields // Rev. of Sci. Instr. 2004. V. 75. P. 1665.
5. *Kazarinov N. Yu., Sazonov M. N.* Magnet Design and Beam Dynamics in Computed Fields for DC-350 Cyclotron // Part. Nucl., Lett. 2008. V. 5, No. 7(149). P. 625–628.
6. *Kalagin I. et al.* Beam Lines for Physical Experiments of DC-350 Cyclotron // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Cycl. and Their Appl., Giardini Naxos, Italy, Sept. 30–Oct. 5, 2007. P. 355.

Получено 23 ноября 2009 г.