

P9-2006-39

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбежян, С. Л. Богомолов,
А. Н. Борисенко*, О. Н. Борисов, В. В. Бехтерев,
И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача,
И. В. Калагин, С. Н. Лысухин*, В. Н. Мельников,
С. В. Пашенко, А. В. Тихомиров, М. В. Хабаров

КАНАЛ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ
ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

* Институт ядерной физики Республики Казахстан, Алма-Ата

Гикал Б. Н. и др.

P9-2006-39

Канал аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60

В работе описаны проект и разработка канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60, созданного в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований. Канал предназначен для транспортировки и инжекции в циклотрон ионов с отношением массы A к зарядности Z , находящимся в интервале $A/Z = 6-12$, и кинетической энергией вплоть до $17 Z/A$ кэВ/нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Gikal B. N. et al.

P9-2006-39

Channel of Axial Injection of DC-60 Cyclotron

The design study and realization of the axial injection beam line of DC-60 cyclotron constructed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research are given. The channel allows one to transport and to inject into the cyclotron ions with mass-to-charge ratio A/Z being within interval $A/Z = 6-12$ and kinetic energy up to $17 Z/A$ keV/m.u.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

Данная работа посвящена разработке канала аксиальной инъекции циклотрона ДЦ-60 [1]. Канал предназначен для транспортировки ионов с отношением массы к зарядности A/Z , меняющимся от 6 до 12, и кинетической энергией вплоть до $17 Z/A$ кэВ/нуклон от источника до медианной плоскости циклотрона. Канал позволяет инжектировать в циклотрон широкий спектр ионов: от легких — лития и углерода — до тяжелых — криптона и ксенона — элементов. Это позволит решать большой круг ядерно-физических и прикладных задач на ускоренных в циклотроне ДЦ-60 пучках частиц, таких как: фундаментальные исследования по физике твердого тела, изучение проблем радиационного повреждения материалов, модификация поверхностей металлов и производство ядерных фильтров. В работе приводится описание систем канала.

1. СХЕМА КАНАЛА

Схема канала аксиальной инъекции показана на рис. 1. Общий вид начального участка канала — на рис. 2.

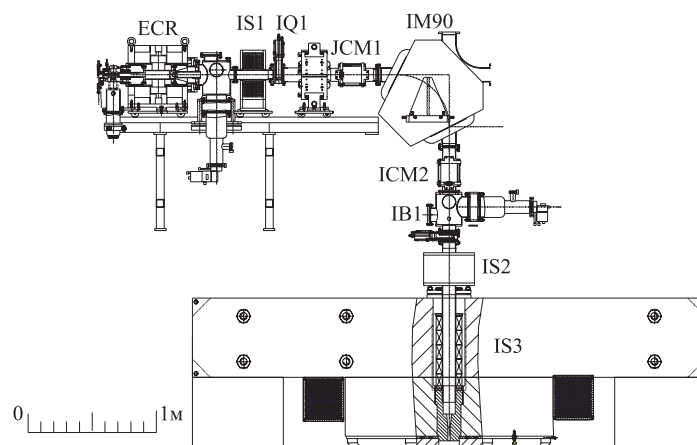


Рис. 1. Схема канала: ECR — ЭЦР-источник ионов; IS1-3 — фокусирующие соленоиды; IQ1 — квадрупольная линза; IM90 — 90° -й поворотный магнит; ICM1,2 — корректирующие магниты; IBE, IB1 — блоки диагностики



Рис. 2. Начальный участок канала

2. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ ИОНОВ

Пучки ионов получают в ЭЦР-источнике DECRIS-3M [2], показанном на рис. 3. Частота ВЧ-поля источника равняется 14 ГГц. Напряжение экс-

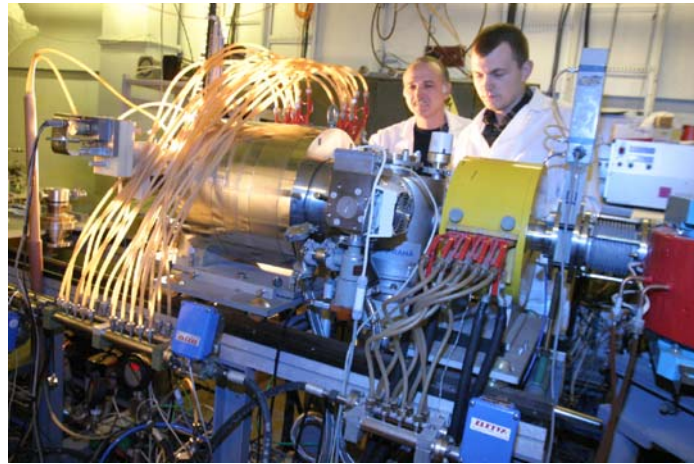


Рис. 3. Внешний вид ЭЦР-источника ионов

тракции – вплоть до 25 кВ. Экстракция пучка осуществляется с помощью перемещающегося пуллера. ЭЦР-источник изготовлен в Лаборатории ядер-

ных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Спектры пучков углерода и аргона, полученных в этом источнике, показаны на рис. 4, 5. Типичные параметры инжектируемых пучков ионов, использовавшихся при моделировании транспортировки частиц в канале, приведены в табл. 1.

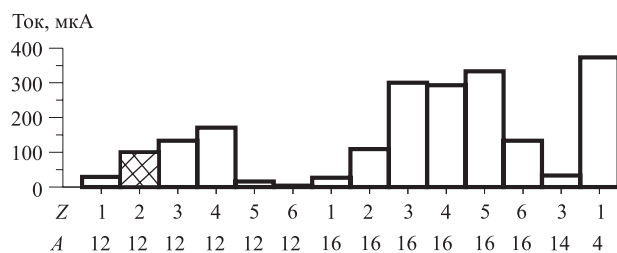


Рис. 4. Спектр пучка углерода по сортам ионов

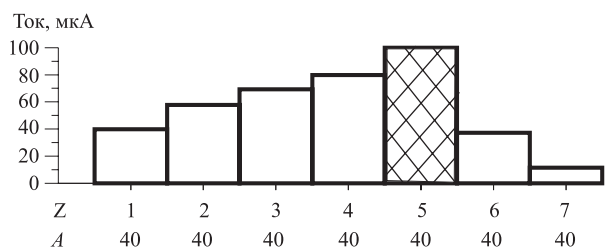


Рис. 5. Спектр пучка аргона по сортам ионов

Таблица 1. Параметры инжектируемых пучков

A/Z	6	6	8	8	10,5	10,5	12	12
Тип инжектируемого иона	$^{12}\text{C}^{2+}$	$^{12}\text{C}^{2+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{84}\text{Kr}^{8+}$	$^{84}\text{Kr}^{8+}$	$^{132}\text{Xe}^{11+}$	$^{132}\text{Xe}^{11+}$
Кинетическая энергия, кэВ	21,14	36,82	39,6	69,05	70,32	84,16	84,59	101,2
Эмиттанс, π мм \times мрад	140	120	140	120	140	120	140	120
Начальный диаметр, мм	8	8	8	8	8	8	8	8
Ток инжектируемого пучка, мкА	100	100	100	100	50	50	50	50

3. ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Ионно-оптическая система обеспечивает проводку пучков от источника ионов к ускорителю с минимальными потерями и согласование параметров пучков на входе в спиральный инфлектор с его акцептансом.

Соленоид IS1 (см. рис. 1) уменьшает расходимость пучка, выходящего из ЭЦР-источника. Корректирующая квадрупольная линза IQ1 формирует пучок с таким горизонтальным и вертикальным размерами на входе в поворотный магнит IM90, чтобы пучок на выходе из магнита являлся аксиально-симметричным. Затем соленоиды IS2 и IS3 осуществляют согласование пучка на входе в инфлектор.

При проектировании канала моделировалась транспортировка пучков с приведенными в табл. 1 параметрами. Моделирование проводилось методом крупных частиц с помощью библиотеки программ MSIB04 [3]. В расчетах учитывалось собственное поле пучка ионов.

В качестве примера на рис. 6, 7 показано изменение огибающих пучков ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{5+}$ и криптона $^{84}\text{Kr}^{8+}$ по тракту канала. Эффективность транспортировки в этих случаях равна 100 %.

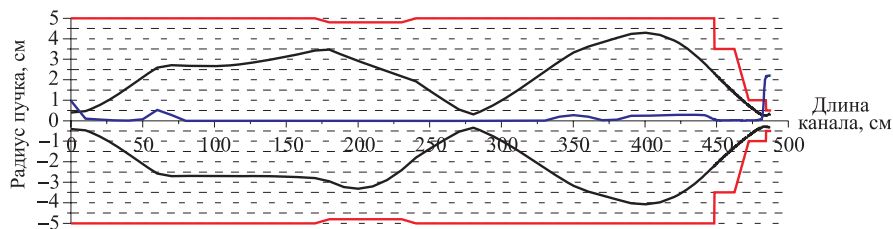


Рис. 6. Огибающие пучка ионов $^{40}\text{Ar}^{5+}$ и апертуры в канале

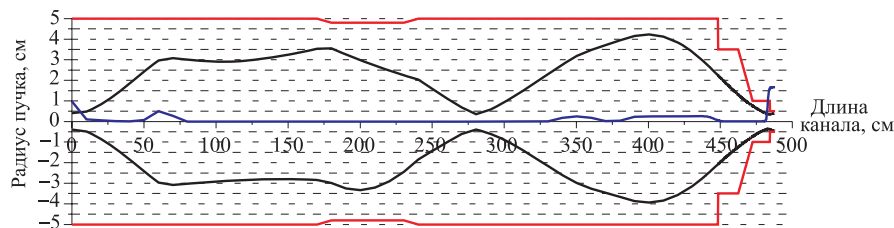


Рис. 7. Огибающие пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{8+}$ и апертуры в канале

Расчетные величины индукции поля B в магните IM90, максимального поля B_{\max} в соленоидах IS1-3 и градиента G в квадрупольной линзе IQ1 при транспортировке ионов различных элементов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные параметры магнитных элементов

Инжектируемый ион	$^{12}\text{C}^{2+}$	$^{12}\text{C}^{2+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{84}\text{Kr}^{8+}$	$^{84}\text{Kr}^{8+}$	$^{132}\text{Xe}^{11+}$	$^{132}\text{Xe}^{11+}$
Кинетическая энергия, кэВ	21,14	36,82	39,6	69,05	70,32	84,16	84,59	101,2
IM90, B , Гс	906	1196	906	1196	1094	1196	1094	1196
IS1, B_{\max} , кГс	3,5	4,4	3,3	4	3,8	4	3,8	3,8
IS2, B_{\max} , кГс	1,5	1,75	1,8	1,9	1,8	1,8	0	1,0
IS3, B_{\max} , кГс	1,8	1,2	1,55	1,95	1,875	2	2,1	2,1
IQ1, G , Гс/см	-3,0	-4,0	-3,0	-4,0	-3,6	-4,0	-3,6	-4,0

Расчетные значения находятся в допустимых диапазонах изменения параметров магнитных элементов.

4. СПИРАЛЬНЫЙ ИНФЛЕКТОР

Спиральный инфлектор осуществляет поворот пучка ионов, движущегося по вертикальному каналу, в медианную плоскость циклотрона. Поворот пучка происходит за счет действия электрического поля, создаваемого двумя электродами инфлектора. Форма этих электродов напоминает цилиндрический конденсатор с обкладками, закрученными в спираль так, чтобы отследить поворот центральной частицы пучка в магнитном поле циклотрона. При этом электрическое поле инфлектора всегда перпендикулярно скорости центральной частицы. В канале аксиальной инъекции циклотрона ДЦ-60 используются два варианта инфлектора с магнитными радиусами $\rho_m = 29$ и $\rho_m = 35$ мм. Электрический радиус инфлектора A_e в обоих вариантах равен 25 мм. Параметры спирального инфлектора приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры спирального инфлектора

Вариант	ρ_m , мм	A_e , мм	Зазор, мм	Максимальное напряжение, кВ
А	29	25	10	$\pm 7,5$
В	35	25	10	± 5

Внешний вид спирального инфлектора (вариант А) показан на рис. 8.

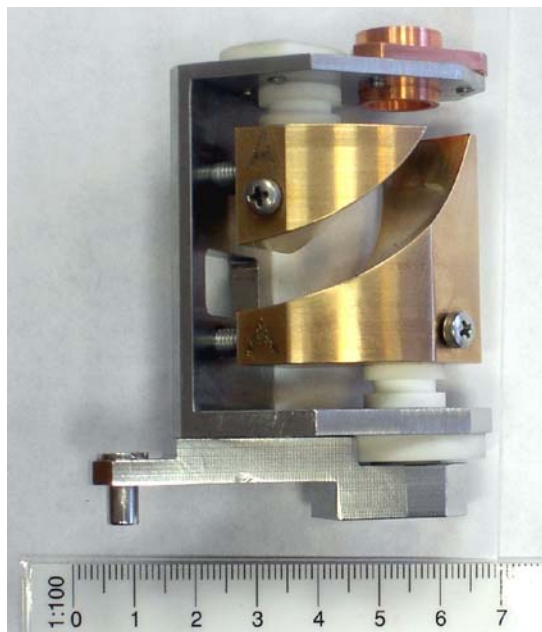


Рис. 8. Спиральный инфлектор (вариант А)

5. ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

5.1. Анализирующий магнит IM90. Основные данные магнита:

угол поворота осевой траектории, °	90
радиус осевой траектории, мм	400
междуполосный зазор, мм	100
номинальная индукция магнитного поля, Тл	0,14
неоднородность индукции поля в рабочей зоне ± 50 мм	$\leq \pm 1 \cdot 10^{-3}$
углы торцевого скоса полюсов, °	+27,1
номинальный ток, А	21,13
напряжение обмотки при номинальном токе, В	55,9
нестабильность тока, не хуже	$1 \cdot 10^{-4}$
номинальная мощность питания, кВт	1,2

Кривая возбуждения магнита показана на рис. 9, внешний вид магнита — на рис. 10.

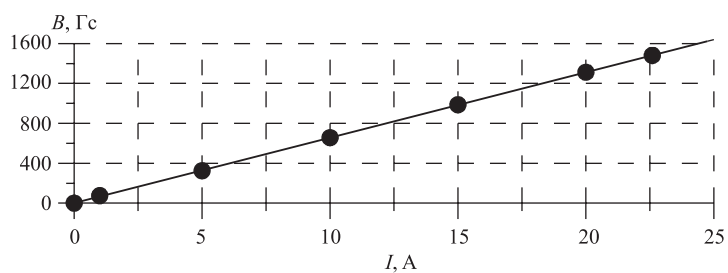


Рис. 9. Кривая возбуждения магнита IM90



Рис. 10. Внешний вид магнита IM90

5.2. Квадрупольная линза IQ1. Основные параметры:

максимальный градиент индукции магнитного поля, Тл/м	0,6
диаметр апертуры, мм	110
длина полюсного наконечника, мм	200
номинальный ток, А	5
номинальное напряжение на обмотке, В	16
мощность питания обмотки, Вт	80

Линзы изготовлены и испытаны. Измеренная кривая возбуждения линзы показана на рис. 11, внешний вид линзы — на рис. 12.

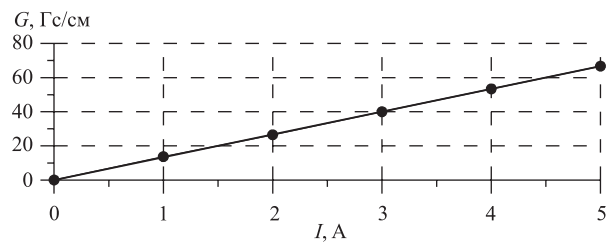


Рис. 11. Кривая возбуждения линзы IQ1



Рис. 12. Внешний вид квадрупольной линзы

5.3. Соленоид IS1. Основные параметры соленоида:

максимальное магнитное поле B_{\max} , Тл	0,68
эффективная длина линзы, мм	133,7
габаритная длина соленоида, мм	198
внутренний диаметр, мм	106
внешний диаметр с экраном, мм	340
неоднородность магнитного поля в рабочей зоне ± 40 мм	<1%
номинальный ток, А	525
номинальное напряжение на обмотке, В	29
мощность источника питания, кВт	15,2

Соленоиды изготовлены и испытаны. Измеренная кривая возбуждения соленоида IS1 и его внешний вид показаны на рис. 13, 14.

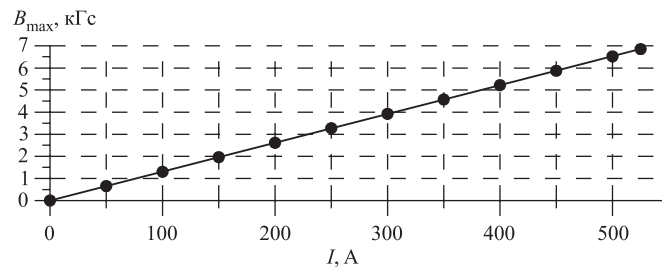


Рис. 13. Кривая возбуждения соленоида IS1



Рис. 14. Внешний вид соленоида IS1

5.4. Соленоид IS2. Основные параметры соленоида:

максимальное магнитное поле B_{\max} , Тл	0,279
эффективная длина, мм	192,9
габаритная длина, мм	250
внутренний диаметр, мм	106
наружный диаметр с экраном, мм	376
неоднородность магнитного поля в рабочей зоне ± 40 мм, %	<1
номинальный ток, А	24
номинальное напряжение на обмотке, В	71,7
мощность питания обмотки, кВт	1,73

Соленоид изготовлен и испытан. Измеренная кривая возбуждения соленоида IS2 и его внешний вид даны на рис. 15, 16.

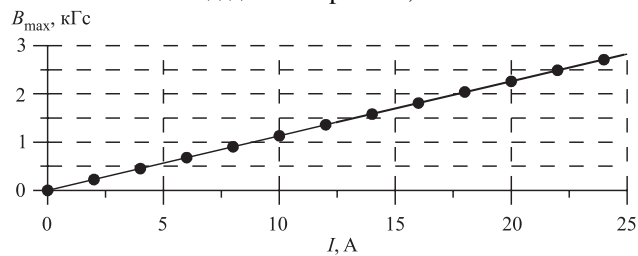


Рис. 15. Кривая возбуждения соленоида IS2



Рис. 16. Внешний вид соленоида IS2

5.5. Соленоид IS3. Соленоид IS3 находится внутри ярма магнита циклотрона. Основные параметры внутреннего соленоида IS3:

максимальное магнитное поле B_{\max} , Тл	0,22
эффективная длина, мм	572
габаритная длина, мм	650
внутренний диаметр, мм	106
наружный диаметр обмотки, мм	225
внутренний диаметр отверстия в ярме магнита, мм	250
неоднородность магнитного поля в рабочей зоне ± 40 мм, %	<1
номинальный ток, А	299,1
номинальное напряжение на обмотке, В	12
мощность питания обмотки, кВт	3,6
число источников питания	2

Соленоид IS3 изготовлен и испытан. Измеренная кривая возбуждения соленоида IS3 и его внешний вид показаны на рис. 17, 18.

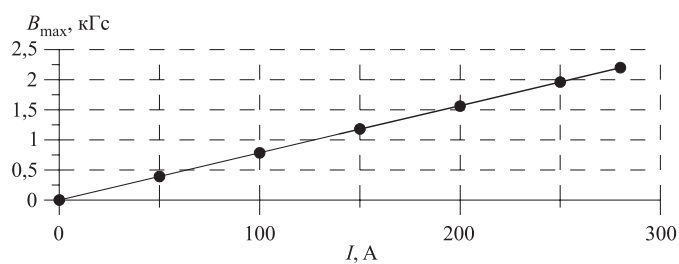


Рис. 17. Кривая возбуждения соленоида IS3

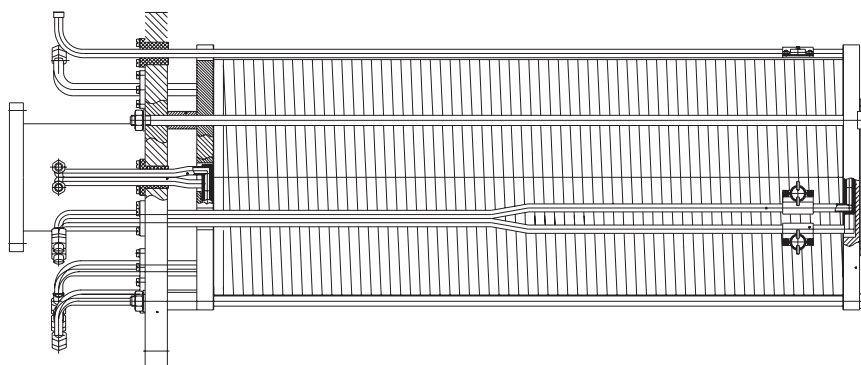


Рис. 18. Внешний вид соленоида IS3

5.6. Магнит коррекции ИСМ1-2. Основные параметры магнита коррекции:

максимальная индукция магнитного поля, Гс	90
максимальный угол коррекции, °	22
нелинейность индукции поля в магните в зоне ± 40 мм, %	$< \pm 1,5$
апертура, мм	136
толщина магнитопровода, мм	12
эффективная длина, мм	336
габаритная длина, мм	200
номинальный ток, А	5,0
номинальное напряжение, В	6,4
мощность, Вт	32

Магниты коррекции изготовлены и испытаны. Кривая возбуждения и внешний вид магнита коррекции даны на рис. 19, 20.

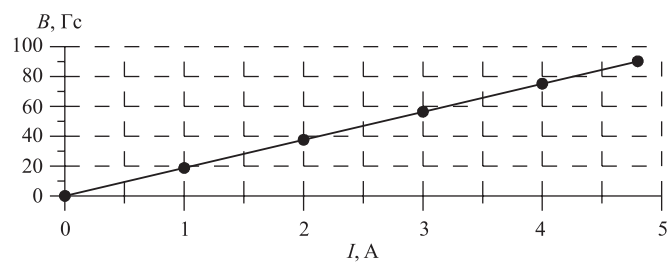


Рис. 19. Кривая возбуждения магнита коррекции



Рис. 20. Внешний вид магнита коррекции

6. СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ПУЧКА

Для коррекции положения центра пучка используются магниты ИСМ1, 2. Проектные параметры магнитов (п. 3.6) дают возможность обеспечить величину смещения центра пучка на входе в инфлектор менее 0,5 мм.

7. СИСТЕМА ГРУППИРОВАНИЯ ПУЧКА

С целью увеличения интенсивности ускоренного пучка ионов в канале аксиальной инжекции установлен синусоидальный банчер — устройство для группирования пучка по фазам ускоряющего поля. Банчер расположен в блоке диагностики ИВ1 (см. рис. 1).

В банчере поток частиц с равномерным распределением по фазам превращается в сгустки после прохождения зазора с небольшим переменным напряжением и пространства дрейфа. В зазоре происходит модуляция частиц по скоростям, переходящая в пространстве дрейфа в модуляцию по плотности.

Банчер (см. рис. 21) представляет собой две параллельные сетки, натянутые на прямоугольных рамках размером 80×80 мм. В зазоре между сетками создается группирующее электрическое поле. Временная зависимость напря-



Рис. 21. Внешний вид банчера

женности этого поля — синусоидальная. Амплитудное значение напряжения в зазоре — до 240 В. Частота ускоряющего поля 12,6–17,4 МГц. Импульсный разброс в пучке после банчера не превышает 1,5 %.

8. СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Для диагностики пучка используется цилиндр Фарадея, расположенный в блоке В1(см. рис. 1). Цилиндр Фарадея (ЦФ) — устройство, измеряющее величину ионного тока в канале. Внешний вид цилиндра Фарадея показан на рис. 22.



Рис. 22. Внешний вид цилиндра Фарадея

Рабочее положение привода ЦФ — вертикальное. Ход перемещения ЦФ составляет 100 мм. Привод движения — пневматический.

Информация о величине ионного тока выдается на монитор на пульте управления ускорителем.

Поскольку мощность пучка ионов в канале невелика (меньше 10 Вт), то ЦФ не охлаждается водой. Для уменьшения коэффициента распыления материала пучком ионов чашка и диафрагма ЦФ изготовлены из алюминия.

Для устранения ошибки измерения тока, за счет вторичной электронной эмиссии, в конструкции ЦФ предусмотрено специальное устройство, резко уменьшающее влияние этого эффекта на результаты измерений за счет возврата эмитированных электронов на чашку цилиндра поперечным магнитным полем (так называемый механизм подавления вторичной электронной эмиссии).

Цилиндр Фарадея будет использоваться при настройке канала аксиальной инъекции для анализа спектра пучка ионов. Анализ спектра пучка ионов осуществляется сканированием пучка, с помощью изменения тока в обмотке анализирующего магнита ИМ90. При варьировании тока на чашку ЦФ попадают ионы с различным отношением A/Z , для которых радиус поворота в магните совпадает с равновесным значением 400 мм. Положение максимумов зарегистрированного тока с ЦФ определяет значения поля (тока в обмотке) магнита ИМ90, необходимые для инъекции данного сорта иона. Величины поля магнита и кинетическая энергия пучка (напряжение экстракции ЭЦР-источника) определяют отношение A/Z .

Система анализа обеспечивает изменение тока магнита IM90 от 8 до 24 А с одновременным изменением тока в обмотке соленоида IS1 от 180 до 450 А (прямо пропорционально току магнита), что необходимо для обеспечения достаточной фокусировки анализируемого пучка ионов. Разрешение системы анализа равно 20, что позволяет разделять ионы вплоть до зарядности $Z = 10$.

9. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Вакуумная откачка канала аксиальной инжекции осуществляется двумя форвакуумными насосами со скоростью откачки $65 \text{ м}^3/\text{ч}$ четырьмя турбо-насосами со скоростью откачки 150 л/с и двумя крионасосами со скоростью откачки 800 л/с . Расчетное рабочее давление в канале не превышает $1,5 \cdot 10^{-7}$ торр. На рис. 23 показана зависимость эффективности трансмиссии через канал аксиальной инжекции от среднего давления остаточного газа. Как видно из рисунка, при проектном значении давления остаточного газа величина максимальных потерь частиц (для пучка ионов $^{132}\text{Xe}^{18+}$) не превышает 5 %.

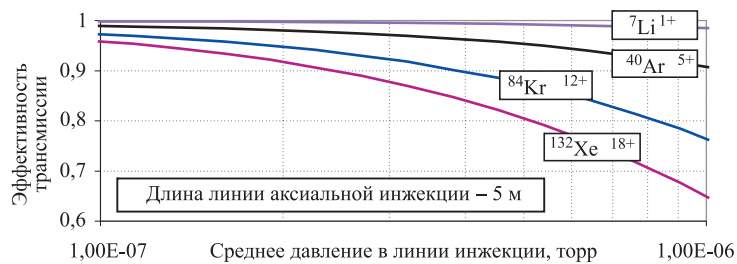


Рис. 23. Эффективности трансмиссии пучков ионов различных элементов

10. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Автоматизированная система управления (АСУ) канала аксиальной инжекции является частью общей системы управления ускорителя. АСУ обеспечивает контроль и управление всеми элементами канала. Управление каналом осуществляется с компьютера. Для управления создано две панели управления. Одна панель обеспечивает управление вакуумной системой, вторая предназначена для обеспечения получения, транспортировки и инжекции пучка в циклотрон. Вторая панель представлена на рис. 24.

Прикладное программное обеспечение формирует пользовательский интерфейс с аппаратными и программными средствами АСУ, осуществляет

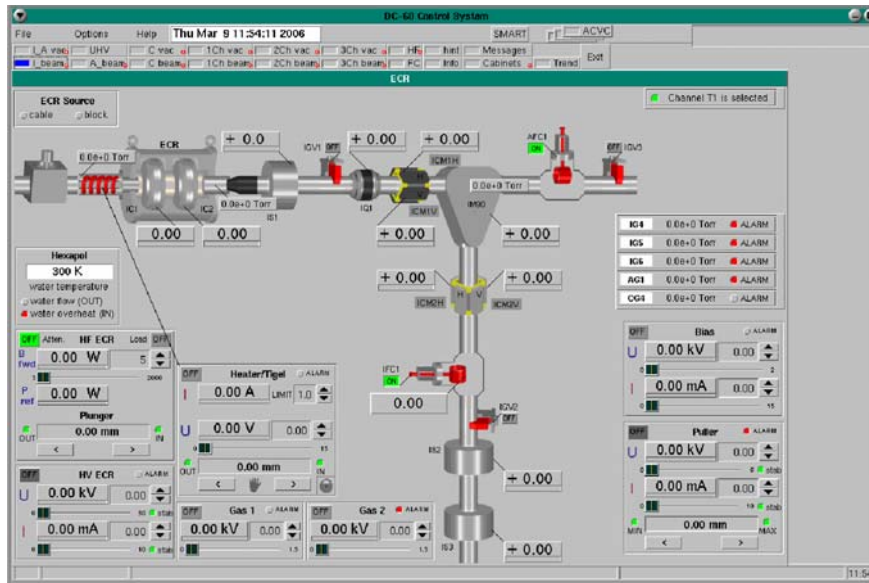


Рис. 24. Панель управления каналом инжекции

управление информационной базой и архивацию данных, связь с аппаратурой сбора и обработки информации, взаимодействие с программами на других компьютерах АСУ. Вывод и обновление информации на экране выполняется с заданной частотой — около 0,5 с. Ввод информации с пульта управления происходит по инициативе персонала с клавиатуры или через пульт управления энкодерного типа.

Аппаратура управления размещается в четырех стойках. В трех стойках установлены источники питания магнитных элементов, в четвертой размещается аппаратура управления вакуумной системы и системы диагностики. В качестве контроллеров управления используются унифицированные контроллеры типа Smartbox5.

Описание системы управления аксиальной инжекцией и всего ускорителя ДЦ-60 будет представлено отдельно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный канал позволяет осуществить инжекцию в циклотрон ДЦ-60 пучков ионов с отношением массы к зарядности $A/Z = 6-12$ и кинетической энергией вплоть до $17 Z/A$ кэВ/нуклон. Расчетная эффективность инжекции для большинства рассмотренных пучков ионов близка к 100 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gikal B.N. et al.* Project of the DC-60 cyclotron with smoothly ion energy variation for research center at L.N. Gumilev EuroAsia state university in Astana (Kazakhstan) // Proc. of the 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications — 2004, October 18–22, 2004, Tokyo, Japan.
2. *Kutner V.B. et al.* Status report on electron resonance ion source operation at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR) cyclotrons. Proc. of the 8th International Conference on Ion Sources, September 6–10, Dubna, 1999 // Review of Scientific Instruments, 2000. V. 71, No. 2. P. 774.
3. *Aleksandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V.* Multicomponent Ion Beam Code — MCIB04. Proc. of XIX Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC04, October 4–8, Dubna, 2004. P. 201.

Получено 28 марта 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 02.06.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 290 экз. Заказ № 55360.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/