

P9-2007-87

О. Н. Борисов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбежян, И. А. Иваненко,
В. Н. Мельников, В. И. Миронов, А. В. Тихомиров,
Е. В. Самсонов, В. В. Селезнев, А. И. Сидоров

СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

Направлено в «Журнал технической физики»

Борисов О. Н. и др.
Система вывода пучка циклотрона ДЦ-60

P9-2007-87

Представлены результаты численного моделирования системы вывода пучков тяжелых ионов ($A/Z = 6-12$, $W = 0,35-1,77$ МэВ/нукл) из циклотрона ДЦ-60. Выбраны параметры элементов системы вывода и диагностики. Экспериментальная эффективность вывода пучков ионов $^{14}\text{Ne}^{2+}$ и $^{84}\text{Kr}^{12+}$ в процессе физического пуска составила 60–65 % при интенсивности 1,5–2,5 мкА.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Borisov O. N. et al.
Beam Extraction System for the DC-60 Cyclotron

P9-2007-87

The results of numerical simulation of the heavy ions beam extraction system ($A/Z = 6-12$, $W = 0.35-1.77$ MeV/amu) from the DC-60 cyclotron are presented. The parameters of the extraction system elements (electrostatic deflector and focusing magnetic channel) and diagnostic elements are chosen. The experimental extraction efficiency of $^{14}\text{Ne}^{2+}$ and $^{84}\text{Kr}^{12+}$ beams is equal to 60–65 % with intensity 1.5–2.5 μA .

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

Изохронный циклотрон ДЦ-60, разработанный в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, является базовой установкой междисциплинарного научно-исследовательского центра в Астане (Казахстан) [1]. Ускоритель предназначен для решения широкого круга ядерно-физических и прикладных задач.

В данной работе представлены численные расчеты системы вывода пучка из циклотрона ДЦ-60 и первые экспериментальные результаты.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

Ускоритель ДЦ-60 представляет собой изохронный четырехсекторный циклотрон, ускоряющий пучки тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 6-12$ до энергий $W = 0,35-1,77$ МэВ/нукл. Вариация энергии ускоренных пучков осуществляется как за счет изменения уровня среднего магнитного поля в диапазоне $B_0 = 1,25-1,65$ Тл, так и величины заряда ускоряемых ионов. Основные параметры циклотрона приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры циклотрона ДЦ-60

Диаметр полюса, мм	1620
Число секторов	4
Угловой размер сектора, град	52
Зазор между полюсами, мм	176
Зазор между секторами, мм	33
Магнитное поле в центре, Тл	1,25–1,65
Число дуантов	2
Угловой размер дуанта, град	35
Напряжение на дуантах, кВ	50
Частота обращения иона, МГц	1,83–4,35
Номер гармоники ускорения	4-я, 6-я
Частота ВЧ, МГц	11,0–17,4

КОМПОНОВКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

Система вывода позволяет отклонить пучок из зоны ускорения и направить в ионопровод. При этом необходимо обеспечить хорошее качество пучка на выходе из ускорителя для его эффективной транспортировки до физических установок.

После анализа отклоненных траекторий для различных ионов был выбран вывод пучка в направлении $\approx 26^\circ$ по отношению к оси сектора. Выбор данного направления вывода определяется как требованиями системы вывода, так и компоновкой основных систем ускорителя. На рис. 1 приведены схема циклотрона и выводные траектории для тестовых ионов.

Система вывода состоит из следующих устройств:

- *электростатический дефлектор (ESD)*, отклоняющий пучок из камеры циклотрона;
- *фокусирующий магнитный канал (МС)*, формирующий выводимый пучок при его движении до входа в систему транспортировки;
- *диагностические элементы*:
 - *пробник вывода*, расположенный между дефлектором и магнитным каналом (PE1) и позволяющий оптимизировать положение дефлектора и магнитного канала;
 - *профиломер (PME2) и люминофор*, расположенные в выводном патрубке на выходе из вакуумной камеры и позволяющие определять форму и интенсивность выведенного пучка.

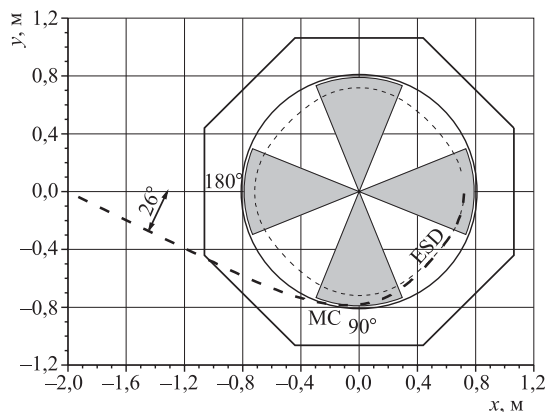


Рис. 1. Схема ускорителя с расположением секторов и выбранным направлением выводной траектории. Азимут траектории отсчитывается по часовой стрелке

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫВОДА ПУЧКА

Для определения параметров элементов системы вывода было проведено численное моделирование для нескольких тестовых ионов, выбранных из рабочей диаграммы циклотрона. В табл. 2 приведено расчетное напряжение на дефлекторе при разных уровнях магнитного поля в циклотроне для пяти тестовых ионов с отношением массы к заряду от 6 до 12.

Таблица 2. Требуемое напряжение на дефлекторе для пяти тестовых ионов при разных энергиях и уровнях магнитного поля

N	Отношение массы иона к заряду иона A/Z	Энергия ионов W , МэВ/нукл	Напряжение на дефлекторе $U_{\text{дефл.}}$, кВ	Магнитное поле B_0 , Тл
1	6	1,07	30,8	1,25
2	10	0,38	18,6	
3	8	0,79	29,4	1,45
4	6	1,80	51,9	1,65
5	12	0,46	25,6	

В расчетах динамики использовались как расчетные, так и измеренные карты магнитного поля. Анализ динамики пучка в данных магнитных полях показал, что максимальный средний радиус ускоренной орбиты составляет ≈ 70 см. На рис.2 приведена в качестве примера статическая равновесная орбита для иона с $A/Z = 8$ и энергией $W = 0,79$ МэВ/нукл на максимальном радиусе. Можно отметить, что орбита достигает радиуса ≈ 72 см на азимуте середины сектора и проходит на радиусе ≈ 68 см в середине долины.

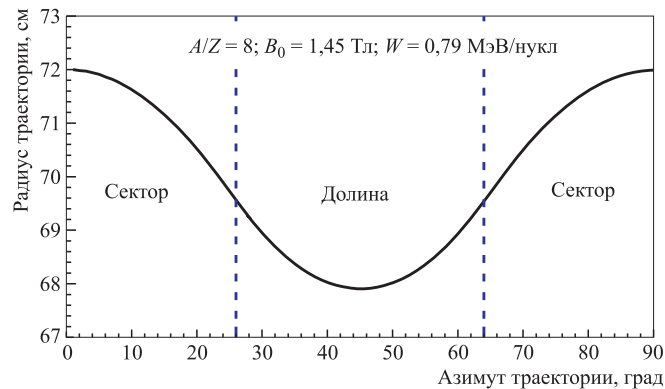


Рис. 2. Пример статической равновесной орбиты для максимального радиуса (ион с $A/Z = 8$ и энергией $W = 0,79$ МэВ/нукл)

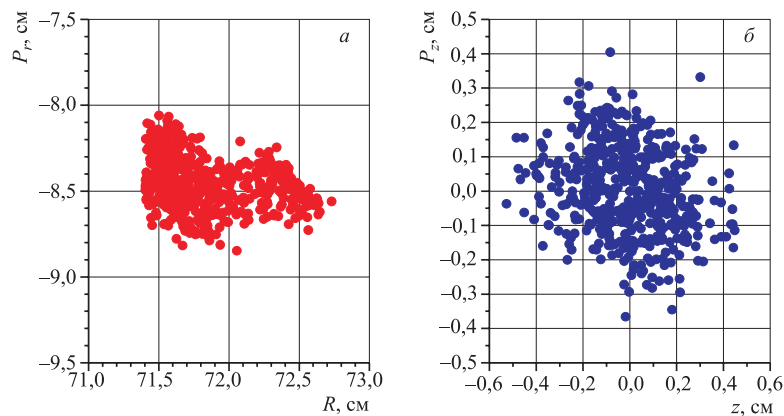


Рис. 3. Горизонтальный (а) и вертикальный (б) эмиттансы пучка ионов с $A/Z = 7$ на входе в электростатический дефлектор при среднем магнитном поле $B_0 = 1,45$ Тл

Были проведены расчеты динамики пучка для определения горизонтального и вертикального эмиттансов пучка на входе в электростатический дефлектор. На рис. 3 приведены горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в электростатический дефлектор для одной из тестовых частиц с $A/Z = 7$ при $B_0 = 1,45$ Тл. В расчетах использовалось 500 макрочастиц. Аналогичные расчеты проводились для всех тестовых ионов и использовались в дальнейшем для расчетов системы вывода.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР

Электростатический дефлектор располагается в свободной от дуантов долине циклотрона и имеет азимутальную длину $\Delta\Theta \approx 34^\circ$. Для обеспечения вывода в выбранном направлении необходима максимальная напряженность электрического поля между пластинами дефлектора ≈ 60 кВ/см.

Для фиксации положения потенциального электрода используются два керамических изолятора: «проходной» (для ввода высоковольтного напряжения) и «опорный» (для крепления потенциальной пластины).

Дефлектор представляет собой две пластины с заданной кривизной поверхностей («септумная» и «потенциальная»), между которыми создается электрическое поле, отклоняющее пучок. Дефлектор располагается в долине. Радиус входа в дефлектор ≈ 700 мм, а радиус выхода ≈ 720 мм. Радиус кривизны пластин дефлектора выбран 1800 мм, что наилучшим образом соответствует радиусам кривизны выводных траекторий различных ионов. При

этом обеспечиваются минимальные потери пучка в процессе вывода. Расстояние между пластинами 10 мм.

Основные потери пучка происходят на начальной части «септумной» пластины, поэтому в качестве материала для нее использован молибден. Молибден тугоплавкий материал с большой теплотой агрегатного превращения, обладающий большой эрозионной стойкостью. Для охлаждения септума применены медные шины квадратного сечения $8,5 \times 8,5$ мм с отверстием по центру диаметром 5,5 мм для протока охлаждающей воды. В качестве материала для «потенциального» электрода использован титан.

Выводимые ионы, попадая на поверхность «потенциального» электрода, выбивают вторичные электроны, которые вызывают высоковольтный разряд. Для подавления данного эффекта в плоскости «потенциального» электрода сделано углубление глубиной 1 мм на высоту ± 10 мм относительно медианной плоскости, что позволяет улавливать вторичные электроны. Выбиваемые вторичные электроны двигаются вдоль силовых магнитных линий и вновь попадают на «потенциальный» электрод. Для дополнительной защиты по вертикали (сверху и снизу) от «потенциального» электрода установлены молибденовые пластины, уменьшающие вероятность возникновения высоковольтного пробоя.

Конструкция дефлектора предусматривает возможность независимого перемещения входа и выхода дефлектора для настройки на «ядро» пучка и согласования выводной траектории с положением дефлекторных пластин.

Таблица 3. Параметры электростатического дефлектора

Азимутальное положение магнитного канала, град	84–112
Макс. напряжение на потенциальной пластине, кВ	65
Длина потенциальной пластины, мм	400
Длина септумной пластины, мм	440
Толщина септумной пластины, мм	0,3–1,0
Радиус кривизны пластин, мм	1800
Высота пластин, мм	50
Зазор между пластинами, мм	10
Перемещение входа и выхода дефлектора от номинального положения, мм	± 15
Точность установки дефлектора, мм	± 1
Материал «потенциальной» пластины	Ti
Материал «септумной» пластины	Mo

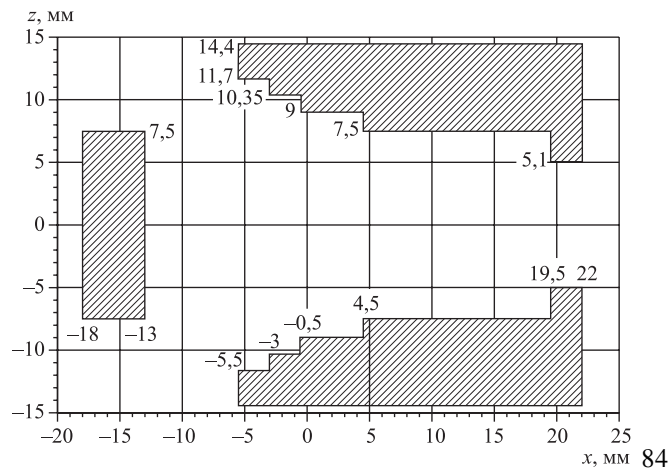


Рис. 4. Профиль канала в первой четверти длины (от 84 до 91°). В верхней части рисунка цифрами показаны координаты z , в нижней — координаты x

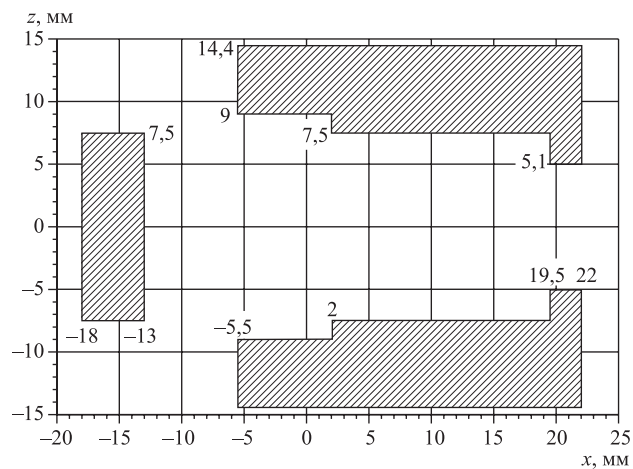


Рис. 5. Профиль канала в последних трех четвертях длины (от 91 до 112°). В верхней части рисунка цифрами показаны координаты z , в нижней — координаты x

Для согласования положения канала и выводной траектории предусмотрена возможность независимого радиального перемещения входа и выхода магнитного канала.

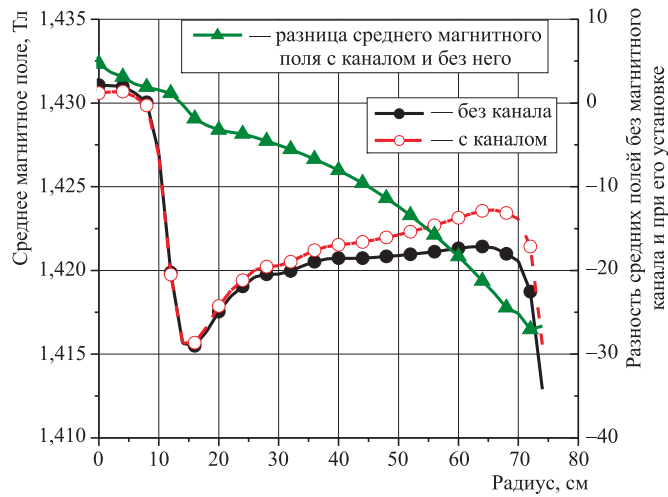


Рис. 6. Зависимости среднего магнитного поля вдоль радиуса без фокусирующего магнитного канала и после его установки. На правой оси представлена разность средних полей без магнитного канала и при его установке

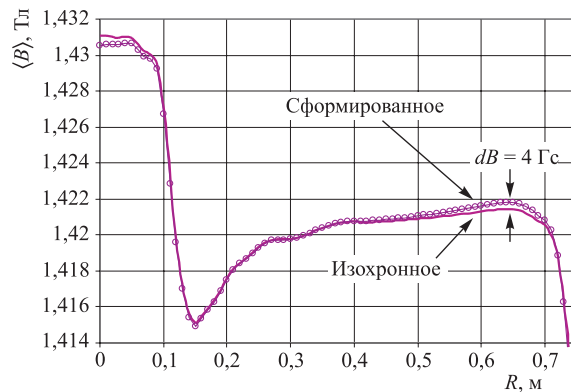


Рис. 7. Зависимость среднего магнитного поля вдоль радиуса циклотрона с установленным фокусирующим магнитным каналом и дополнительными комплексующими шиммами. Разница между изохронным и сформированным распределениями магнитного поля в ускоряющем зазоре не превышает 4 Гс

Установка магнитного канала приводит к уменьшению среднего магнитного поля и появлению первой гармоники. Для компенсации влияния магнитного канала на магнитное поле циклотрона были установлены дополнительные

ные шиммы на боковые поверхности секторов [2]. На рис.6 показано влияние установки фокусирующего магнитного канала на распределение среднего магнитного поля в ускоряющем зазоре вдоль радиуса, а на рис. 7 представлено среднее магнитное поле после установки дополнительных компенсирующих шимм.

На рис. 8 показана величина первой гармоники магнитного поля, возникающей после установки магнитного канала. Дополнительные шиммы позволили снизить амплитуду первой гармоники магнитного поля в рабочей зоне до величины менее 5 Гс.

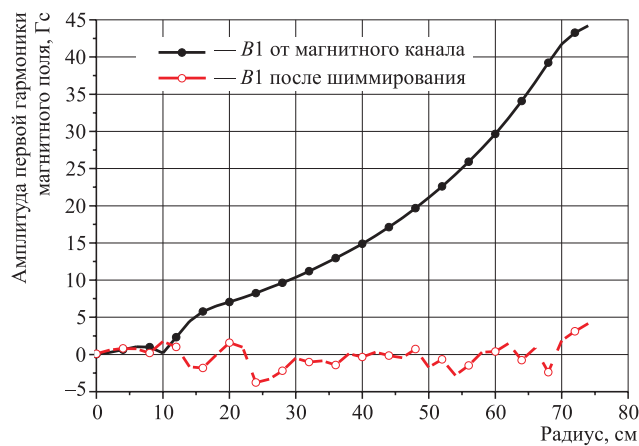


Рис. 8. Амплитуда первой гармоники магнитного поля, возникающая после установки магнитного канала и после шиммирования

На рис.9 показано измеренное радиальное распределение магнитного поля в рабочей апертуре фокусирующего канала для четырех азимутов при уровне магнитного поля $B_0 = 1,45$ Тл. Величина радиального градиента магнитного поля меняется по длине магнитного канала, но интегральный градиент соответствует требуемой величине.

При проведении численных расчетов первоначально определялось требуемое напряжение на дефлекторе для попадания выводной траектории на вход в канал транспортировки пучка, а также геометрическое положение фокусирующего магнитного канала.

При моделировании огибающих пучка в процессе вывода использовались следующие параметры пучка (полученные из численных расчетов динамики пучка в процессе ускорения): горизонтальный и вертикальный эмиттансы на входе в электростатический дефлектор: $\varepsilon_x = 10-15\pi$ мм · мрад; $\varepsilon_z = 18\pi$ мм · мрад; максимальный разброс энергии $\delta W = \pm 2\%$.

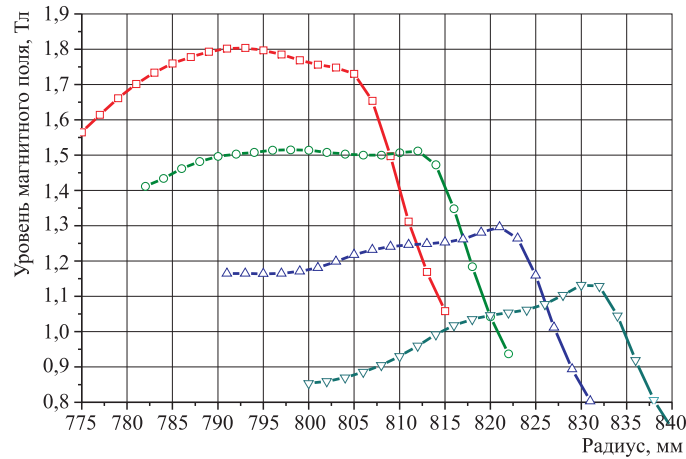


Рис. 9. Измеренное радиальное распределение магнитного поля в апертуре фокусирующего магнитного канала для четырех азимутов при уровне магнитного поля $B_0 = 1,45$ Тл

На рис. 10 показан пример огибающих пучка ионов с $A/Z = 6$ и $W = 1,8$ МэВ/нукл с магнитным каналом и без него. Фокусирующий магнитный канал позволяет получить выведенный пучок на выходе из вакуумной камеры циклотрона с горизонтальным размером $\Delta x \approx 30$ мм и вертикальным размером $\Delta z \approx 20$ мм.

На рис. 11 приведены горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в канал транспортировки. Данные эмиттансы использовались в дальнейшем для расчетов параметров элементов системы транспортировки.

Для настройки системы вывода пучка используются диагностические элементы: пробник вывода, профилометр и люминофор.

Пробник вывода располагается между дефлектором и магнитным каналом. Он предназначен для определения размера и положения выводимого пучка перед входом в магнитный канал, а также измерения интенсивности. В рабочем положении пробник полностью перекрывает пучок ионов по траектории движения между дефлектором и магнитным каналом. Измерительная головка состоит из 10 изолированных ламелей шириной 5 мм. Измерение тока пучка с каждой ламели дает информацию о положении и размерах пучка в радиальном направлении. Для отвода мощности пучка ламели пробника имеют косвенное охлаждение за счет прижима через изолятор к корпусу, охлаждаемому дистиллированной водой. На рис. 14 показан внешний вид измерительной головки пробника вывода.

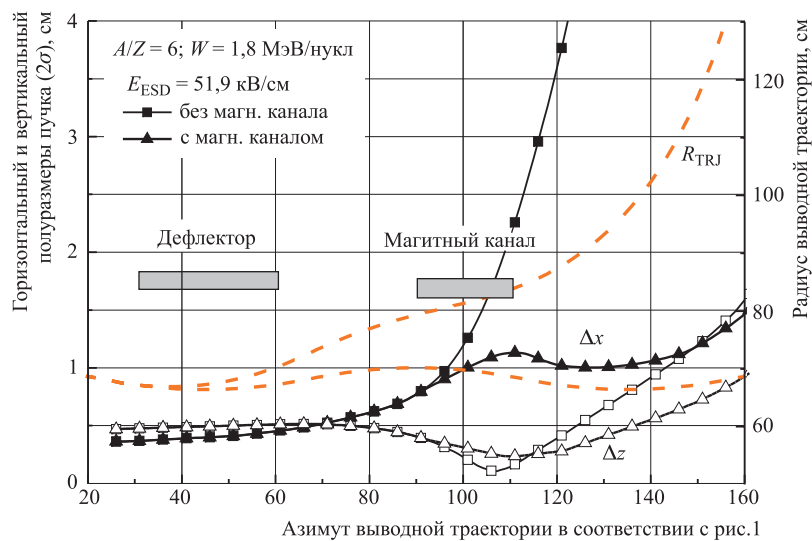


Рис. 10. Горизонтальная (Δx) и вертикальная (Δz) огибающие пучка (полуразмер) с фокусирующим магнитным каналом и без него. Пунктирной линией показаны радиусы равновесной орбиты и выводной траектории

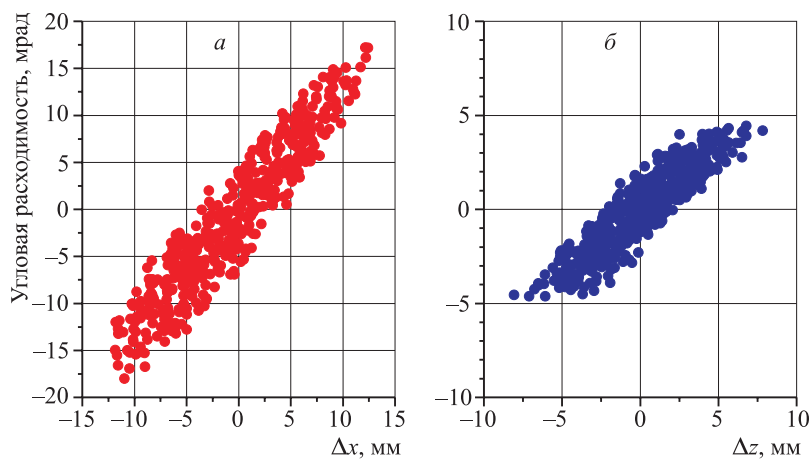


Рис. 11. Горизонтальный (а) и вертикальный (б) эмиттансы пучка на входе в систему транспортировки для иона с отношением массы к заряду $A/Z = 6$ и энергией $W = 1,8 \text{ МэВ/нукл}$



Рис. 12. Внешний вид электростатического дефлектора

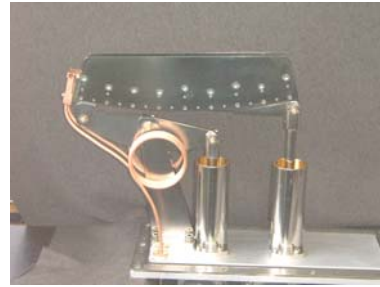


Рис. 13. Внешний вид фокусирующего магнитного канала



Рис. 14. Измерительная головка пробника вывода



Рис. 15. Выводной патрубок с профилометром и люминофором

Профилометр и люминофор располагаются в выводном патрубке, соединяющем вакуумную камеру и канал транспортировки. На рис. 15 показан внешний вид выводного патрубка с профилометром и люминофором.

Профилометр состоит из 15 вертикальных и 15 горизонтальных ламелей, изготовленных из вольфрамовой проволоки диаметром 1,6 мм. Шаг установки вертикальных и горизонтальных ламелей 5 мм. Профилометр позволяет определить положение пучка и его горизонтальный и вертикальный размеры.

Люминофор предназначен для качественного определения формы выводимого пучка. В качестве люминофора используется кварцевая пластина с размерами: горизонтальным 120 мм и вертикальным 80 мм. Пластина люминофора располагается под углом 45° к пучку относительно вертикальной

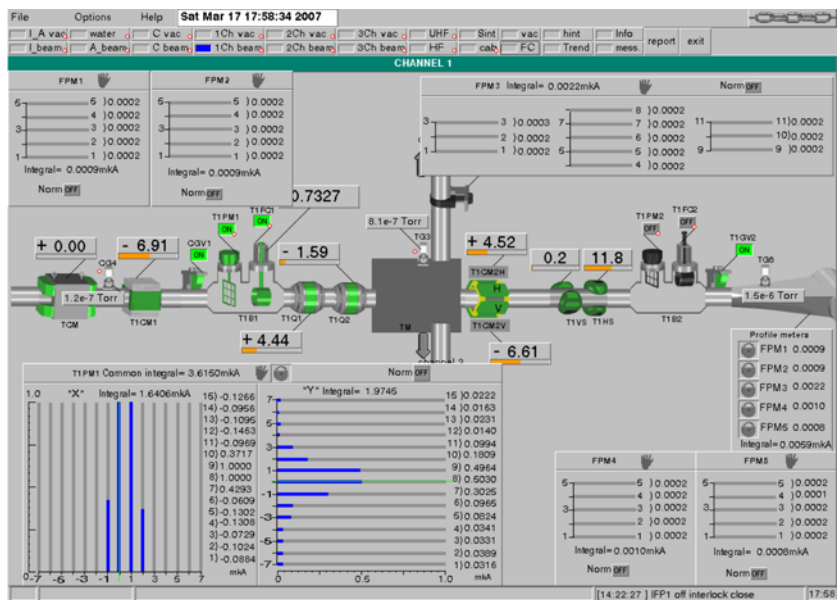


Рис. 16. Мнемосхема канала вывода пучка и его профиль на выходе из ускорителя в первом блоке диагностики ионопровода. Полный размер пучка, измеренный сеточным профилометром, ≈ 20 мм по горизонтали и ≈ 30 мм по вертикали

оси. Вывод визуального профиля пучка осуществляется через видеокамеру на пульт управления. Ввод люминофора осуществляется ручным приводом с нижнего фланца выводного патрубка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В декабре 2006 г. были ускорены и выведены пучки ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Эффективность вывода составила более 60%. В табл.5 приведены результаты экспериментов по выводу пучка.

Вывод ускоренных ионов на циклотроне ДЦ-60 осуществляется при помощи электростатического дефлектора и пассивного магнитного канала. Выведенный из вакуумной камеры циклотрона ионный пучок был адаптирован ионно-оптическими элементами канала транспортировки и с эффективностью, близкой к 100%, проведен по трем каналам пучков ионов высокой энергии. Ток пучка, его профиль и положение в сечении канала измеряются подвижными цилиндрами Фарадея и профилометрами. Получен и сформирован пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$ с интенсивностью 1,65 мкА в канале для облучения

Таблица 5. Основные параметры магнитного канала

Ион	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{14}\text{N}^{2+}$
A/Z	7	7
B_0 , Тл	1,42	1,64
RF , МГц	12,67	14,42
Гармоника RF	4	4
Банчер	да	нет
Ток ускоренного пучка, мкА	2,5	1,46
Ток выведенного пучка, мкА	1,65	0,9
Коэффициент вывода, %	66	61,6

полимерной пленки. Проведено облучение и получены тестовые образцы трековых мембран хорошего качества с высокой однородностью плотности пор.

ВЫВОДЫ

- Разработана и реализована система вывода пучка из циклотрона ДЦ-60 на основе электростатического дефлектора и магнитного канала, позволяющая выводить пучки тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 6-12$ и энергий от 0,35 до 1,77 МэВ/нукл.
- На основе проведенных численных расчетов определены параметры каждого элемента системы вывода пучка.
- Сконструированы и изготовлены электростатический дефлектор, магнитный фокусирующий канал, а также устройства диагностики пучка. Проведены предварительные испытания и наладка данных элементов на стендах ЛЯР.
- В ходе пусконаладочных работ на циклотроне ДЦ-60 были получены выведенные пучки тяжелых ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{84}\text{Kr}^{12+}$ с эффективностью более 60 %. Интенсивность выведенного пучка составила 1,5–2,5 мкА. Экспериментальные исследования показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.
- Полный размер выведенного пучка на входе в канал транспортировки составил по горизонтали — 15–25 мм, по вертикали — 20–30 мм.

Выведенный пучок был успешно адаптирован ионно-оптической системой каналов транспортировки и доставлен к физическим установкам без заметных потерь интенсивности.

- Представленные в публикации данные были получены в ходе пуско-наладочных работ, дальнейшие исследования и оптимизация режимов работы элементов циклотрона позволяют ожидать улучшения эффективности вывода и повышения интенсивности пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gikal B. N. et al.* Project of the DC-60 Cyclotron with Smoothly Ion Energy Variation for Research Center at Gumilev L. N. EuroAsia State University in Astana (Kazakhstan) // Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, 2004. P. 205–207.
2. *Гикал Б. Н. и др.* Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2006-151, Дубна, 2006.

Получено 13 июня 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 18.10.2007.

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

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,39. Тираж 290 экз. Заказ № 55926.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/