

P9-2006-37

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбежян, Г. Н. Иванов,
И. Б. Иванова, Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача,
И. В. Калагин, И. В. Колесов, Н. И. Лебедев,
В. Н. Мельников, А. П. Серобаба, А. А. Фатеев

СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ, ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ
ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

Гикал Б. Н. и др.

P9-2006-37

Система транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60

Выполнены расчеты каналов транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60, на основе чего спроектированы и изготовлены каналы транспортировки. Канал 1 имеет длину $\sim 14,4$ м от его начала до мишени и предназначен для облучения пленок различными тяжелыми ионами. В этом канале фокусировка выведенного пучка ионов осуществляется с помощью двух квадрупольей. Система сканирования пучка (вертикальный и горизонтальный магнитные сканеры) располагается после поворотного магнита. Каналы 2 и 3 работают при включенном поворотном магните, который осуществляет поворот пучка на угол $\pm 30^\circ$. В каналах 2 и 3 за поворотным магнитом расположены дублеты квадрупольей. Приводятся таблицы рассчитанных градиентов в фокусирующих квадрупольях всех каналов и графики зависимостей полуразмеров ионных пучков вдоль каналов для различных точек рабочей диаграммы циклотрона. Приводятся также измеренные характеристики основных оптических элементов каналов.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Gikal B. N. et al.

P9-2006-37

Transportation System for Heavy Ion Beams Extracted from Cyclotron DC-60

Calculations of the extraction channels of the heavy ion beams extracted from the DC-60 cyclotron were carried out. On the basis of these calculations the extraction channels were designed and manufactured. Channel 1 has the length of about 14.4 m from its beginning to the target and is intended for film irradiation by different types of heavy ions. Focusing of the extracted ion beams on channel 1 is carried out by two quadrupoles. The ion beam scanning system (vertical and horizontal magnetic scanners) is situated after the bending magnet. Channels 2 and 3 work when the bending magnet is switched on. It deflects the ion beams at the angle $\pm 30^\circ$. The quadrupole doublets are situated after the bending magnet in channels 2 and 3. The tables of calculated gradients in all quadrupoles and dependences of the beam semidimensions along the channels for different points of the cyclotron operating diagram are given. The characteristics of the basic optical elements of the channels are also given here.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Разработанный циклотрон ДЦ-60 предназначен для проведения фундаментальных и прикладных исследований с использованием ECR-источника ионов от углерода до ксенона. Энергия выведенных из циклотрона ионов может варьироваться от 0,9 до 1,66 МэВ/нуклон в случае использования четвертой гармоники и от 0,4 до 0,8 МэВ/нуклон — в случае использования шестой гармоники. Это позволит реализовать широкую программу фундаментальных и прикладных исследований, таких как исследования в физике твердого тела, изучение радиационных повреждений, модификация поверхностей металлов, нанотехнология имплантации ионов, производство и использование ядерных фильтров. Эффективность использования ускорителя во многом определяется качеством системы транспортировки выведенных пучков. Широко разветвленная система каналов позволяет проводить многоплановые исследования. Настоящая работа посвящена разработке каналов транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60, от циклотрона до мишени.

Общий вид каналов транспортировки ионов показан на рис. 1.

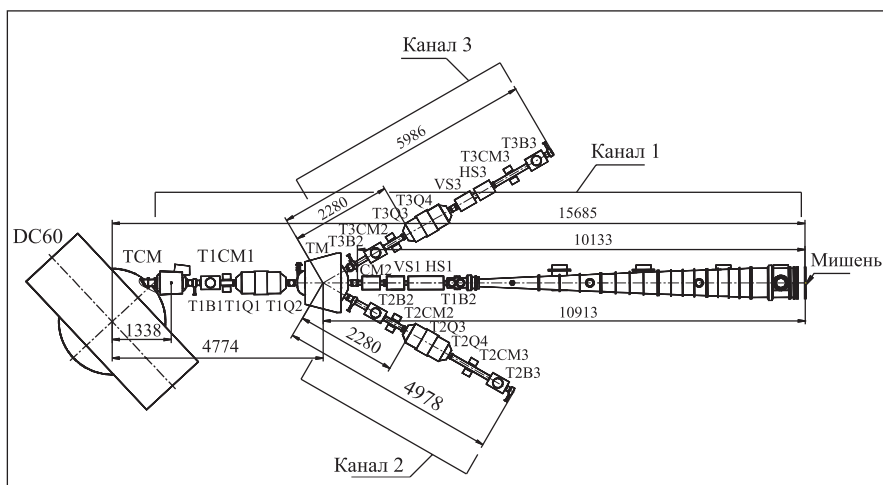


Рис. 1. Схема каналов вывода ионов из циклотрона ДЦ-60: ТСМ — выводной магнит; Т1В1–Т3В3 — блоки диагностики; Т1СМ1–Т3СМ3 — корректирующие магниты; Т1Q1–Т3Q4 — квадруполи; VS1 и VS3 — вертикальные магнитные сканеры; HS1 и HS3 — горизонтальные магнитные сканеры

1. РАСЧЕТ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Система транспортировки выведенных ионных пучков, представленная на рис.1, состоит из трех каналов. В качестве стартовой точки выбрана середина выводного магнита ТСМ. На общем участке для всех каналов с помощью дублета квадрупольных линз Т1Q1, Т1Q2 проводится фокусировка пучка на вход разводящего магнита ТМ. Канал 1 имеет длину 14,4 м от его начала до мишени и работает при отключенном магните ТМ. Этот канал предназначен для облучения полимерных пленок различными ионами. В канале 1 фокусировка выведенного пучка ионов осуществляется с помощью двух квадрупольных линз Т1Q1 и Т1Q2, расположенных перед магнитом ТМ. Система сканирования пучка (вертикальный VS1 и горизонтальный HS1 магнитные сканеры) [1] располагается после поворотного магнита ТМ. В канале 1 располагаются также блоки диагностики Т1В1 и Т1В2 и корректирующие магниты Т1СМ1 и Т1СМ2.

Каналы 2 и 3 работают при включенном поворотном магните ТМ. Магнит ТМ осуществляет поворот пучка на угол $\pm 30^\circ$. В канале 2 магнитное поле поворотного магнита имеет такое же направление, как и магнитное поле в циклотроне, а в канале 3 — противоположное ему. Фокусировка в канале 2 осуществляется дублетом квадрупольных линз Т2Q3 и Т2Q4. Предусмотрены блоки диагностики Т2В2 и Т2В3 и корректирующие магниты Т2СМ2 и Т2СМ3. В канале 3 установлены квадрупольные линзы Т3Q3 и Т3Q4, осуществляющие фокусировку пучка, блоки диагностики Т3В2, Т3В3 и корректирующие магниты Т3СМ2, Т3СМ3.

В проведенных расчетах учитывалось влияние начального разброса ионов пучка по продольным импульсам $\Delta p/p$ [2]. Расчеты проводились для пяти вариантов выведенных из циклотрона ионных пучков, имеющих различные характеристики [3]. Их значения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры выведенных пучков ионов

A/Z	W , МэВ/нуклон	α_x	β_x , см	α_y	β_y , см	ε_x , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	ε_y , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	η_x , см	η'_x
6	1,84	-2,8	271	-0,32	136	2,5	4,1	174	1,34
6	1,07	-5,2	485	-0,16	159	4,2	4,4	158	1,24
7	1,03	-3,5	335	-0,30	151	6,6	4,8	167	1,30
10	0,39	-5,7	518	-0,15	166	6,3	4,8	151	1,22
12	0,46	-3,8	366	-0,30	142	4,6	4,4	174	1,33

Здесь A — атомный номер иона; Z — его заряд; W — кинетическая энергия; $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$ — элементы матрицы Твисса; $\varepsilon_{x,y}$ — среднеквадратичные горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка ионов, η_x и η'_x — горизонтальная дисперсионная функция и ее производная. В проведенных расчетах полагалось, что относительный разброс ионов по импульсам $\Delta p/p$

составляет $\pm 0,6\%$, ток пучка — 3 мкА. Значения вертикальной дисперсионной функции и ее производной считались равными нулю.

В канале 1 за поворотным магнитом ТМ располагаются вертикальный VS1 и горизонтальный HS1 магнитные сканеры, обеспечивающие равномерную засветку пучком мишени размером 220×600 мм. Как показали расчеты по облучению мишени ионами криптона $^{84}\text{Kr}^{+15}$ в имплантаторе ИЦ-100 [1], величина диаметра пучка ионов на мишени в канале 1 должна составлять 80 мм. Исходя из этого условия рассчитывались величины необходимых градиентов в квадрупольях T1Q1 и T1Q2.

Каналы 2 и 3 предназначены для проведения экспериментов в области ядерной физики.

В канале 2 требуется, чтобы диаметр пучка на облучаемой мишени был ~ 10 мм. Для выполнения этого требования находились градиенты в дублетах T1Q1, 2; T2Q3, 4 и определялась длина канала.

В канале 3 после второго дублета квадрупольей располагаются вертикальный VS3 и горизонтальный HS3 магнитные сканеры, обеспечивающие равномерную засветку пучком мишени размером 50×50 мм. При этом требуется, чтобы диаметр пучка составлял 20 мм. Градиенты линз в дублете T3Q3, 4 определялись исходя из этого условия.

Как показали проведенные расчеты, в канале 1 транспортируются ионы во всех выбранных точках рабочей диаграммы циклотрона. На рис. 2 приведен пример рассчитанных зависимостей размеров пучка от продольной координаты z вертикальной (нижняя кривая, V) и горизонтальной (верхняя кривая,

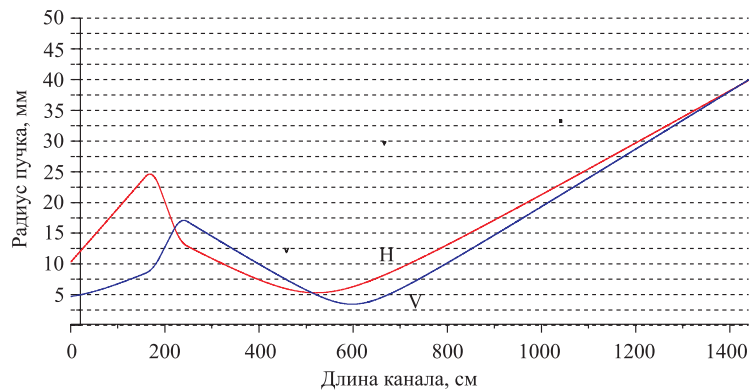


Рис. 2. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) огибающие пучка в канале 1. $A/Z = 6$; $W = 1,835$ МэВ/нуклон

H) огибающих пучка для пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 6$ и кинетической энергией $W = 1,835$ МэВ/нуклон.

Из рис. 2 также можно видеть, что диаметр пучка при его пролете через отключенный поворотный магнит ТМ ($\sim 2,8-3,6$ м) не превышает 35 мм.

При пролете пучка через сканирующие магниты ($\sim 4,9\text{--}6$ м) горизонтальный размер пучка не превышает 25 мм, а его вертикальный размер не превышает 20 мм. Это обеспечивает 100 %-е прохождение пучка по тракту канала.

В табл. 2 приведены величины градиентов квадрупольных линз T1Q1 и T1Q2 для всех выбранных пучков ионов в канале 1.

Таблица 2

A/Z	W , МэВ/нуклон	Величина градиента, Тл/м	
		T1Q1	T1Q2
6	1,835	4,84	-4,628
6	1,07	3,70	-3,534
7	1,03	4,14	-3,96
10	0,385	3,66	-3,492
12	0,46	4,76	-4,582

Как видно из табл. 2, во всех рассмотренных случаях градиенты линз находятся в допустимом диапазоне изменения.

На рис. 3 показан рассчитанный вариант транспортировки пучков в канале 2 для пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 6$ и кинетической энергией $W = 1,835$ МэВ/нуклон. Как видно из рис. 3, диаметр пучка при его пролете через поворотный магнит ТМ ($\sim 2,8\text{--}3,6$ м) не превышает 65 мм.

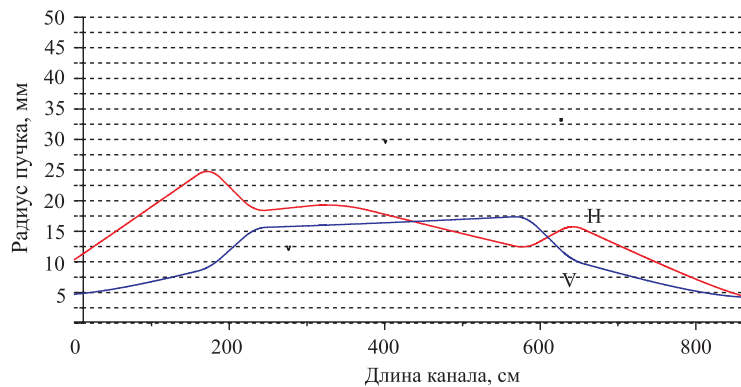


Рис. 3. Огибающие пучка. $A/Z = 6$, $W = 1,835$ МэВ/нуклон, $B = 1,65$ Тл

В табл. 3 приведены результаты расчета величин градиентов в квадрупольных T1Q1, 2 и T2Q3, 4 для пяти выбранных типов пучков ионов в канале 2, при которых диаметр пучка на мишени равен ~ 10 мм. Общая длина канала 2 равна 867 см.

Таблица 3

A/Z	W, МэВ/нуклон	Величина градиента, Тл/м			
		T1Q1	T1Q2	T2Q3	T2Q4
6	1,835	3,44	-2,88	-3,06	3,25
6	1,07	2,66	-2,14	-2,94	3,24
7	1,03	3,10	-2,63	-2,94	3,16
10	0,385	2,66	-2,34	-2,62	3,09
12	0,46	3,44	-2,80	-3,18	3,53

На рис. 4 показан рассчитанный вариант транспортировки пучков в канале 3 для той же рабочей точки циклотрона.

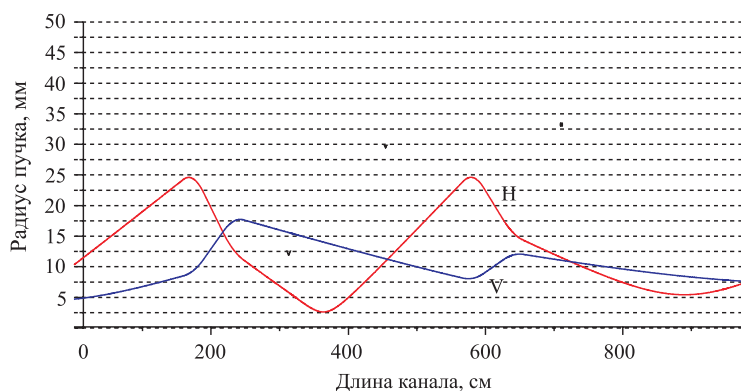


Рис. 4. Огибающие пучка. $A/Z = 6$, $W = 1,835$ МэВ/нуклон, $B = 1,65$ Тл

Как видно из рис. 4, диаметр пучка при его прохождении через поворотный магнит ТМ (~2,8–3,6 м) не превышает 40 мм. При прохождении пучка через сканирующие магниты (~6,5–7,5 м) горизонтальный размер пучка не превышает 45 мм, а его вертикальный размер не превышает 20 мм. Общая длина канала 3 составляет 983 см.

В табл. 4 приведены результаты расчета величин градиентов в квадрупольях T1Q1, 2 и T3Q3, 4 для пяти выбранных типов пучков ионов в канале 3, при которых диаметр пучка на мишени равен ~20 мм.

Таблица 4

A/Z	W, МэВ/нуклон	Величина градиента, Тл/м			
		T1Q1	T1Q2	T2Q3	T2Q4
6	1,835	5,18	-4,345	4,85	-3,22
6	1,07	4,265	-3,68	3,73	-3,33
7	1,03	4,94	-4,40	4,38	-4,09
10	0,385	4,31	-3,90	3,84	-3,49
12	0,46	5,60	-4,87	4,95	-4,58

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛОВ

2.1. Магнит вывода ТСМ. Пучки ионов будут выводиться электростатическим дефлектором в направлении $\sim 26^\circ$ по отношению к оси сектора циклотрона. Все выводные траектории приходят в точку с координатами $\theta = 180^\circ$ и $R = 200$ см, которая и является центром Ш-образного магнита вывода ТСМ, предназначенного для согласования направления выводных траекторий пучков ионов с осью выводного канала системы транспортировки внешних пучков циклотрона ДЦ-60.

Угол коррекции магнита ТСМ выбран в пределах $\pm 2,5^\circ$. Основные данные магнита:

максимальная магнитная индукция, Тл	0,11
радиус поворота центральной траектории R , м	1,46
межполюсный зазор d , мм	$70 \pm 0,1$
эффективная длина магнита, мм	570
угол торцевого скоса полюсов, $^\circ$:	
входной ε_1	0
выходной ε_2	0
номинальный ток, А	12,03
напряжение на обмотке при номинальном токе, В	27,7
мощность питания обмотки, кВт	$\leq 0,333$

На рис. 5 представлена измеренная кривая возбуждения магнита вывода ТСМ, а на рис. 6 показан внешний вид этого магнита.

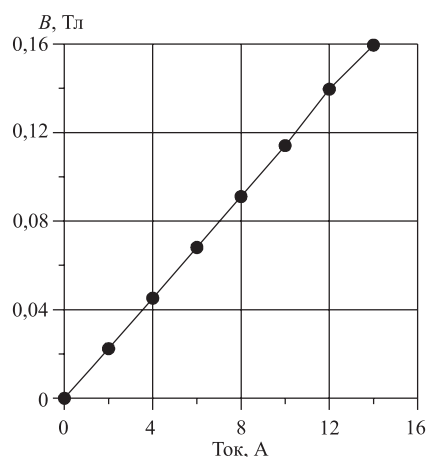


Рис. 5. Кривая возбуждения магнита вывода ТСМ



Рис. 6. Магнит вывода ТСМ

2.2. Квадрупольная линза 11К30-600. Линза 11К30-600 является элементом транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из изохронного циклотрона ДС-60, и предназначена для решения задач формирования выведенных пучков при их транспортировке на физические мишени с максимальной интенсивностью. Линзы 11К30-600 объединяются в дублеты, которые устанавливаются в расчетных точках спроектированных каналов транспортировки пучков. Основные параметры линз:

максимальный градиент индукции магнитного поля, G , Тл/м	6
диаметр апертуры, $2a$, мм	110
длина полюсного наконечника, мм	300
номинальный ток, А	16,4
номинальное напряжение на обмотке, В	77,4
мощность питания обмотки, Вт	1270

На рис. 7 приведена измеренная кривая возбуждения квадратупольной линзы. На рис. 8 показан внешний вид дублета квадратуполей.

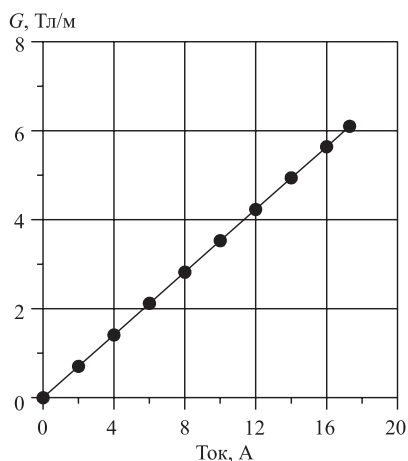


Рис. 7. Измеренная кривая возбуждения квадратупольной линзы



Рис. 8. Дублет квадратуполей

2.3. Поворотный магнит ТМ. Поворотный Ш-образный магнит ТМ предназначен для перестройки выведенного ионного пучка с канала на канал с углами поворота -30° , 0° и $+30^\circ$. Основные данные магнита:

максимальная магнитная индукция, Тл	0,86
радиус поворота центральной траектории, м	1,5
межполюсный зазор, мм	80
длина осевой траектории, мм	785
угол торцевого скоса полюсов, $^\circ$:	

входной ε_1	0
выходной ε_2	0
номинальный ток, А	292
напряжение на обмотке при номинальном токе, В	37,8
мощность питания обмотки, кВт	11,0

На рис. 9 приведена рассчитанная кривая возбуждения, а на рис. 10 внешний вид поворотного магнита ТМ.

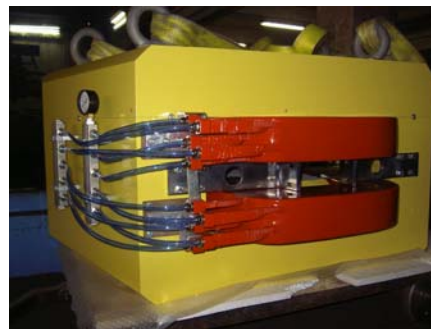
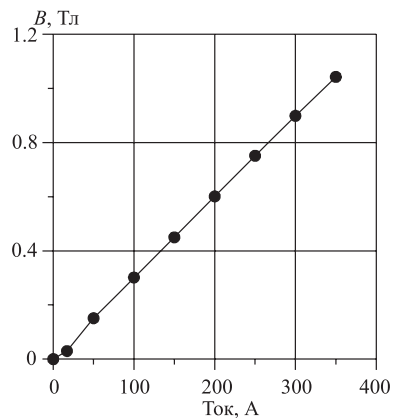


Рис. 9. Кривая возбуждения поворотного магнита ТМ

Рис. 10. Поворотный магнит ТМ

2.4. Системы диагностики и коррекции движения центра масс пучка.

Система диагностики состоит из цилиндров Фарадея и профиломеров. В блоках диагностики Т1В1–Т3В3 располагаются охлаждаемые цилиндры Фарадея, служащие для определения тока пучка. В этих блоках диагностики также размещаются профиломеры для определения координат центра пучка и его размеров. Профиломер из блока диагностики Т1В2 может быть переустановлен в блоки диагностики Т2В2, Т3В2.

Корректирующие магниты Т1СМ1–Т3СМ3 (см. рис. 1) используются для коррекции положения центра масс пучка. Каждый из них представляет собой прямоугольный магнитопровод, на двух противоположных стенках которого расположены одинаковые по числу витков катушки, питаемые одинаковым током. Обе пары катушек включаются так, чтобы их магнитные поля внутри зазора складывались. В результате получается «двухплоскостной» корректор, позволяющий за счет комбинаций полей, создаваемых разными парами катушек, отклонять пучок в любой плоскости, проходящей через ось магнита коррекции. Корректирующие магниты имеют следующие основные параметры:

максимальная индукция магнитного поля, Тл	0,0368
максимальный угол коррекции, °	0,5
максимальный ток в катушке, А	12
номинальное напряжение, В	11
мощность питания обмотки, Вт	132

На рис. 11 показана измеренная кривая возбуждения корректора, а на рис. 12 — внешний вид корректирующего магнита.

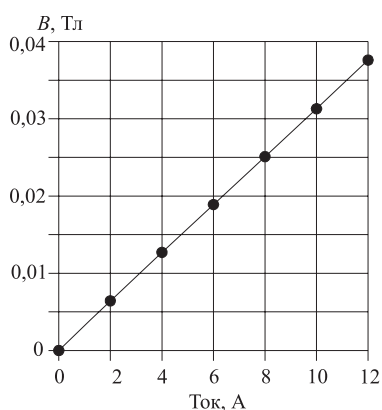


Рис. 11. Кривая возбуждения магнита коррекции



Рис. 12. Корректирующий магнит

2.5. Магнитные сканеры. Сканирующая система предназначена для использования в каналах 1 и 3 системы транспортировки ускоренных пучков ионов.

Канал 1. Система сканирования ионного пучка в канале 1 должна обеспечивать облучение стационарной мишени размерами 600×220 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже ±5 % и с краевыми потерями пучка не более 20 %. Система также должна обеспечивать облучение пленок шириной до 600 мм, движущихся со скоростями до 1 м/с. При этом однородность распределения частиц по облучаемой площади должна быть не хуже ±5 %, а краевые потери пучка не более 10 %. При отключении ионного пучка на 0,3 с (защита от ВЧ-пробоя на дуантах) система должна обеспечивать выравнивание засветки с уменьшением интенсивности не более 50 % при скоростях ленты менее 0,4 м/с. Основные параметры сканеров:

длина вертикального сканера VS1 по магниту, мм	400
частота развертки VS1, Гц	160–250
длина горизонтального сканера HS1 по магниту, мм	800

частота развертки HS1, Гц	80–150
максимальная индукция отклоняющего магнитного поля, Тл	0,040
суммарная индуктивность обмоток, мГн	30
пиковый ток в обмотках, А	15

Канал 3. Система сканирования должна обеспечивать облучение стационарной мишени размерами 50×50 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$. Основные параметр сканеров:

длина вертикального сканера VS3 по магниту, мм	400
частота развертки VS3, Гц	100
длина горизонтального сканера HS3 по магниту, мм	400
частота развертки HS3, Гц	90
максимальная индукция отклоняющего магнитного поля, Тл	0,050
суммарная индуктивность обмоток, мГн	27
пиковый ток в обмотках, А	17

На рис. 13 представлен внешний вид системы сканирования для канала 1.

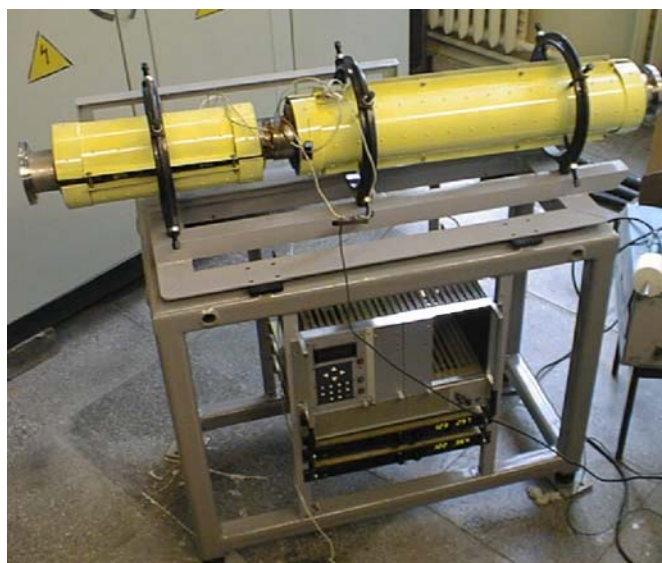


Рис. 13. Сканирующая система для канала 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты показали, что в канале 1 влияние первоначального разброса по продольным импульсам выведенных из циклотрона частиц

является существенным, поскольку им определяется горизонтальный размер пучка на мишени. Результаты транспортировки в канале 1, полученные для всех выбранных ионных пучков, удовлетворяют предъявленным требованиям.

Наличие в каналах 2 и 3 еще одного дублета квадрупольных линз позволяет уменьшить влияние импульсного разброса и получить требуемый диаметр пучка 10–20 мм на мишени.

Величины градиентов квадрупольных линз, требуемых для транспортировки всех типов пучков ионов в трех каналах, не превосходят 90 % от максимального значения 6 Тл/м.

Полученные результаты расчетов позволили спроектировать и изготовить систему транспортировки ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60.

На рис. 14 показан общий вид канала 2.



Рис. 14. Канал 2 транспортировки пучков тяжелых ионов

ЛИТЕРАТУРА

1. Гикал Б. Н. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-240. Дубна, 2002.

2. *Alexandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V.* Multi-Component Ion Beam Code — MCIB04 // Proceedings of XIX Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2004), Dubna, 2004. P. 201.
3. *Борисов О. Н.* Отчет ЛЯР ОИЯИ. ТОТ-ДСК-07-04. Дубна, 2003.

Получено 28 марта 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 01.06.2006.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,90. Тираж 290 экз. Заказ № 55358.

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/