

P9-2006-38

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбежян, В. В. Бехтерев,
А. Н. Борисенко*, Н. Ю. Казаринов,
В. И. Казача, И. В. Калагин, И. В. Колесов,
Н. И. Лебедев, С. Н. Лысухин*, В. Н. Мельников,
А. А. Фатеев

КАНАЛ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ПУЧКАХ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ
ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60

* Институт ядерной физики Республики Казахстан, Алма-Ата

Гикал Б. Н. и др.

P9-2006-38

Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий циклотрона ДЦ-60

Для циклотрона ДЦ-60 разработан канал, предназначенный для проведения прикладных исследований на пучках низкоэнергетических ионов с кинетической энергией $\sim 25 Z/A$ кэВ/нуклон, транспортируемых к мишени из ECR-источника циклотрона. Определена структура канала и параметры всех его оптических элементов. Приведены результаты расчета транспортировки различных ионов от ECR-источника к мишени. Показано, что ионы с отношением массы к заряду в диапазоне $Z/A = 2-20$ могут транспортироваться в разработанном канале с достаточно высокой ожидаемой эффективностью. Диаметр пучка ионов на мишени составляет ~ 40 мм. Приведены также характеристики основных оптических элементов канала.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Gikal B. N. et al.

P9-2006-38

Channel for Applied Investigations on Low Energy Ion Beams of Cyclotron DC-60

The channel intended for carrying out applied investigations on the low energy ion beams having the kinetic energy $25 Z/A$ keV/a.u. and transported from the ECR-source to a target is worked out. The channel structure and parameters of all its optics elements are defined. The calculation results of different ion types transportation are given. It is shown that ions having the ratio of their mass to charge $Z/A = 2-20$ can be transported in the worked out channel with enough high expected efficiency. At that the ion beam diameter on the target is ~ 40 mm. The characteristics of the basic optical elements of the channel are also given.

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

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

Для проведения фундаментальных и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов низких энергий (с кинетической энергией $\sim 25 Z/A$ кэВ/нуклон, где Z — заряд иона, A — его атомный вес) в циклотроне ДЦ-60 создан специальный канал. В нем пучки ионов транспортируются от ECR-источника до мишени без ускорения в циклотроне. Настоящая работа посвящена расчету и созданию этого канала.

1. РАСЧЕТ КАНАЛА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60 [1] показана на рис. 1. Начальный участок канала для прикладных исследований (от ECR-источника до поворотного магнита IM90) совпадает с начальным участком канала инжекции. Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий работает при выключенном квадруполье IQ1 и анализирующем магните IM90.

Схема разработанного канала транспортировки ионов низких энергий при работе на мишень Т без сканирующей системы показана на рис. 2. Началом канала является точка пересечения вертикальной и горизонтальной осей канала инжекции А0 (см. рис. 2).

На рис. 3 показана схема конечной части канала для случая, когда используются магнитные сканеры для развертки пучка по мишени [2]. Здесь ASM — блок двух магнитных сканеров.

Как видно из рис. 2 и 3, в этом случае расстояние от центра соленоидальной линзы AS4 до мишени Т увеличивается с 668 до 2105 мм.

Параметры пучков ионов приведены в табл. 1.

В проведенных расчетах учитывалось влияние начального разброса ионов пучка по продольным импульсам $\Delta p/p$ [3]. Рассчитанное изменение огибающих пучков по тракту канала показано на рис. 4–6. На всех рисунках горизонтальный полуразмер пучка обозначен H , вертикальный — V .

В табл. 2 приведены рассчитанные величины магнитных полей в соленоидах и 45° поворотных магнитах канала для параметров пучков, данных в табл. 1.

Как видно из приведенных результатов, канал транспортировки ионов низких энергий лучше всего настроен на работу с ионами, у которых $A/Z = 6-12$.

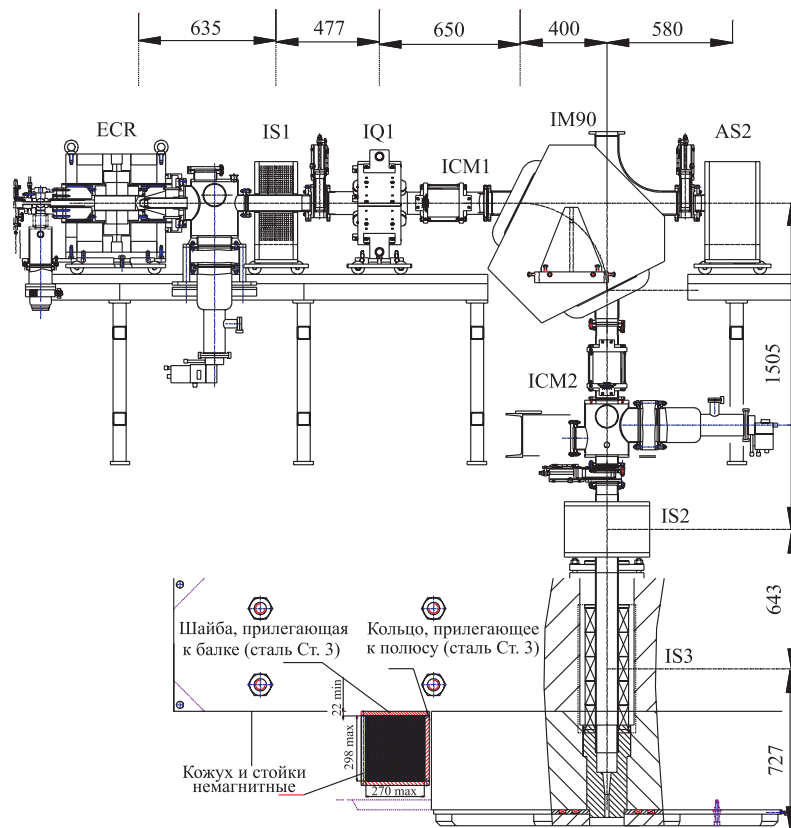


Рис. 1. Схема канала аксиальной инъекции циклотрона ДЦ-60. Здесь ECR — источник ионов; IS1, IS2, IS3 — фокусирующие соленоиды; IQ1 — квадрупольная линза; ICM1, ICM2 — корректирующие магниты; IM90 — поворотный магнит. Указаны положения середин оптических элементов и их габаритные размеры

Таблица 1

| A/Z | 2 | 4 | 6 | 12 | 15 | 18 | 20 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| U_{inj} , кВ | 25 | | | | | | |
| Эмиттанс, π мм · мрад | 412 | 292 | 244 | 168 | 152 | 137 | 130 |
| Начальный диаметр пучка, мм | 10 | | | | | | |
| Ток пучка, мкА | 100 | | | | | | |

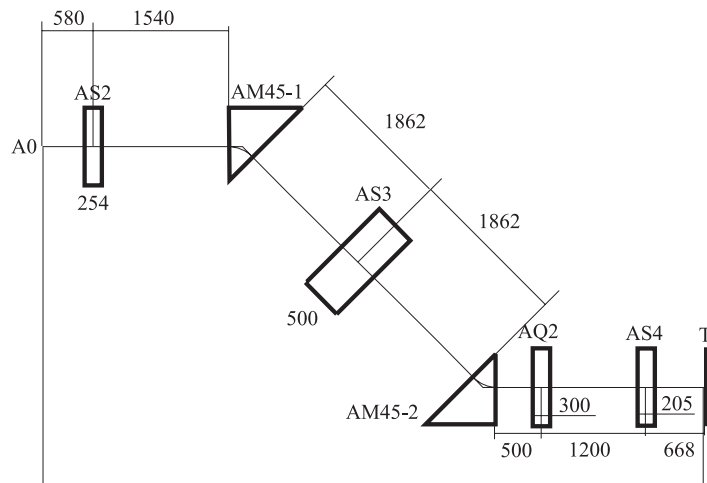


Рис. 2. Схема канала для прикладных исследований: AS2–4 — соленоиды; AM45-1, 2 — 45° поворотные магниты; AQ2 — квадрупольная линза; T — мишень

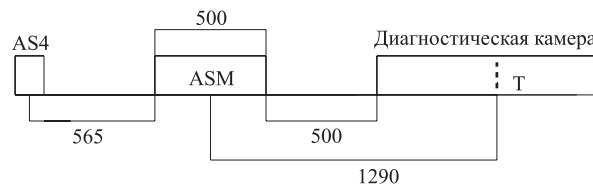


Рис. 3. Схема конечной части канала

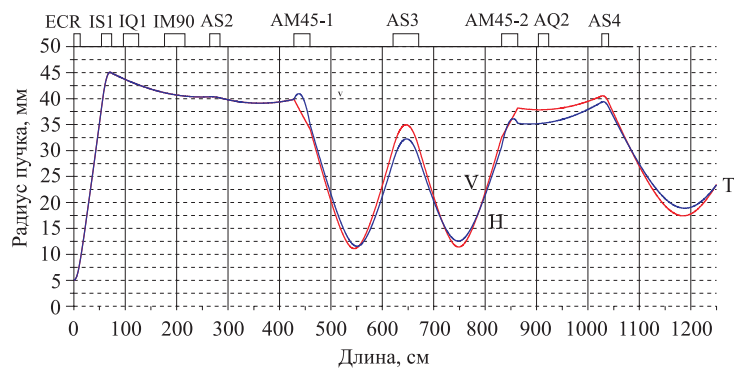


Рис. 4. Огибающие пучки. $A/Z = 2$, $U_{inj} = 25$ кВ, $\varepsilon = 412$ π мм-мрад

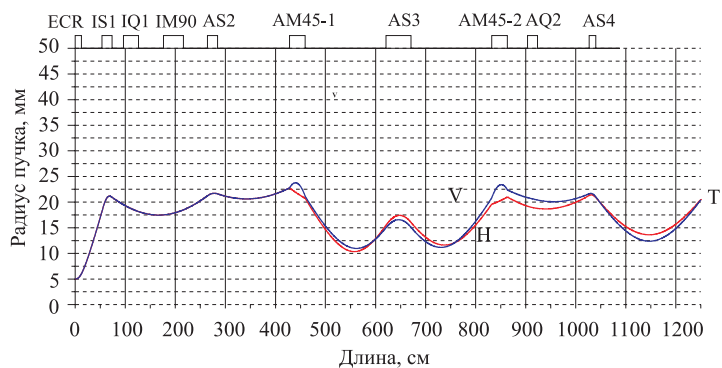


Рис. 5. Огибающие пучки. $A/Z = 12$, $U_{inj} = 25$ кВ, $\varepsilon = 168 \pi$ мм·мрад

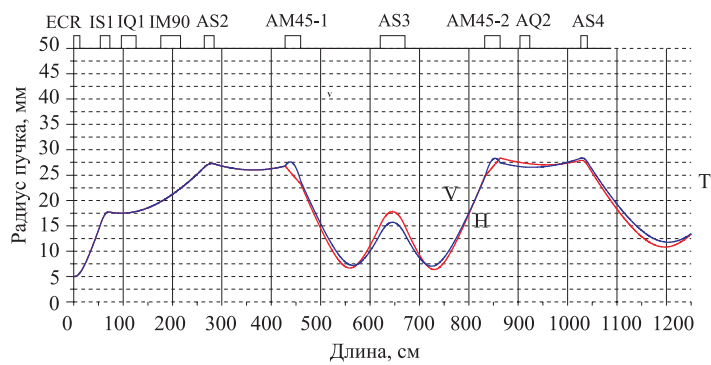


Рис. 6. Огибающие пучки. $A/Z = 20$, $U_{inj} = 25$ кВ, $\varepsilon = 130 \pi$ мм·мрад

Таблица 2

| Магнитное поле, Тл | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| A/Z | IS1 | AS2 | AS3 | AS4 | AM45-1, 2 |
| 2 | 0,224 | 0,044 | 0,134 | 0,144 | 0,0808 |
| 4 | 0,32 | 0,10 | 0,18 | 0,21 | 0,1142 |
| 6 | 0,39 | 0,13 | 0,22 | 0,278 | 0,1398 |
| 12 | 0,58 | 0,26 | 0,30 | 0,40 | 0,1978 |
| 15 | 0,64 | 0,32 | 0,34 | 0,40 | 0,2212 |
| 18 | 0,70 | 0,36 | 0,406 | 0,446 | 0,2423 |
| 20 | 0,70 | 0,32 | 0,48 | 0,46 | 0,2554 |

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА

2.1. Соленоид AS2. В канале прикладных исследований внешний соленоид AS2 формирует пучок для поворотного магнита AM-45-0.4 совместно с соленоидом IS1. Соленоид является асимметричной магнитной линзой, магнитное поле которой симметрично относительно оси и относительно средней плоскости катушки, перпендикулярной оси. Индукция этого поля имеет как продольную, так и радиальную составляющие, что и определяет фокусирующие действия соленоида. Основные параметры соленоида AS2:

| | |
|--|-------|
| магнитное поле Тл | 0,33 |
| внутренний диаметр трубы соленоида, мм | 100 |
| эффективная длина соленоида, мм | 204,4 |
| номинальный ток, А | 226,9 |
| номинальное напряжение на обмотке, В | 18,8 |
| мощность питания обмотки, кВт | 4,27 |

На рис. 7 приведена кривая возбуждения соленоида AS2 как результат измерений.

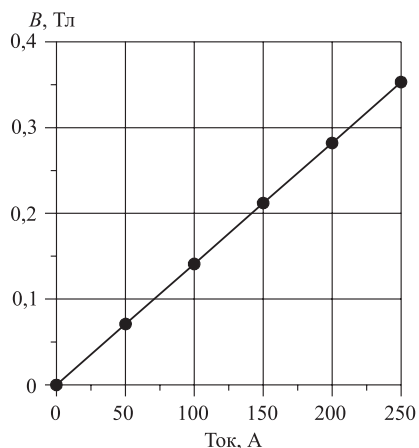


Рис. 7. Кривая возбуждения соленоида AS2

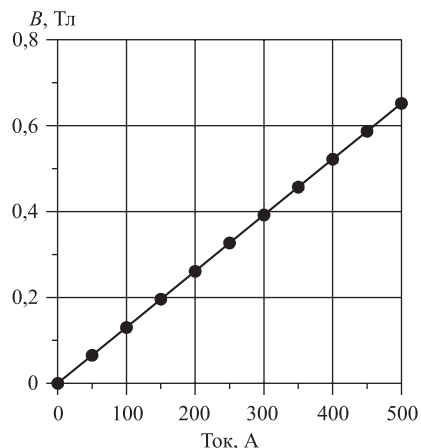


Рис. 8. Кривая возбуждения соленоида AS4

2.2. Соленоид AS4. Соленоид AS4 используется для фокусировки ионного пучка на выходе канала для прикладных исследований. Основные параметры соленоида:

| | |
|--|-----|
| магнитное поле соленоида B, Тл | 0,5 |
| внутренний диаметр трубы соленоида, мм | 100 |

| | |
|---------------------------------------|-------|
| эффективная длина линзы соленоида, мм | 133,7 |
| номинальный ток, А | 360 |
| номинальное напряжение на обмотке, В | 20 |
| мощность питания обмотки, кВт | 7,2 |

На рис. 8 представлена кривая возбуждения соленоида AS4.

2.3. Поворотные магниты AM-45-1, 2. Пучок ионов, удерживаемый фокусирующими соленоидами IS1 и AS2 в требуемых размерах, транспортируется и поворачивается первым поворотным магнитом AM-45-1 по типу фокусировки параллель–фокус вниз на 45° . В точке фокуса происходит анализ пучка с выбранным отношением массы к заряду A/Z . Направление медианной плоскости магнита — вертикальное. Этот промежуточный фокус переводится соленоидом AS3 во второй промежуточный фокус для второго поворотного магнита AM-45-2. Пучок в этом магните снова поворачивается на угол 45° и транспортируется на новый горизонтальный уровень канала прикладных исследований по типу фокусировки фокус–параллель. Далее пучок транспортируется на мишень квадрупольной линзой AQ2 и соленоидом AS4 по типу фокусировки параллель–фокус. Направление медианных плоскостей в обоих поворотных магнитах — вертикальное. Основные параметры поворотных магнитов AM-45-1, 2:

| | |
|---|------|
| угол поворота осевой траектории, $^\circ$ | 45 |
| радиус осевой траектории, мм | 400 |
| межполюсный зазор, мм | 100 |
| расчетная индукция магнитного поля B , Тл | 0,27 |
| угол торцевого скоса полюсов, $^\circ$: | |
| входной ε_{in} | +12 |
| выходной ε_{out} | +12 |
| номинальный ток, А | 24,4 |
| напряжение на обмотке при номинальном токе, В | 89,0 |
| номинальная мощность питания, кВт | 2,17 |

На рис. 9 представлена измеренная кривая возбуждения поворотных магнитов AM-45-1,2, а на рис. 10 показан их внешний вид.

Разрешение R для поворотного магнита AM-45 определяется следующим образом:

$$R = \frac{D}{d}, \quad (1)$$

где D — величина дисперсионной функции после поворотного магнита; d — диаметр пучка (учетверенный среднеквадратичный полуразмер пучка).

Различные зарядовые составляющие пучка будут разделяться при выполнении условия

$$\frac{R}{2} \frac{\delta(A/Z)}{A/Z} \geq 1. \quad (2)$$

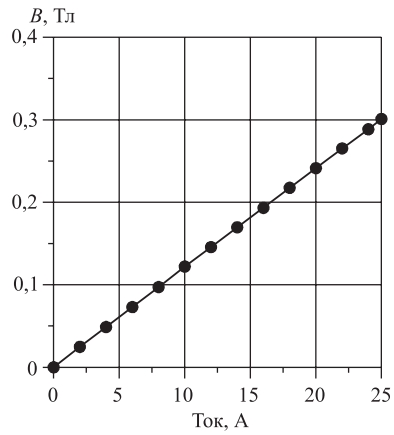


Рис. 9. Кривая возбуждения поворотных магнитов АМ-45-1, 2



Рис. 10. Поворотный магнит АМ-45

Зависимость разрешения R от расстояния после анализирующего магнита для $A/Z = 6$ показана на рис. 11. Как видно из этого рисунка, разрешение достигает максимума на расстоянии, 900 мм от выхода из магнита АМ45-1.

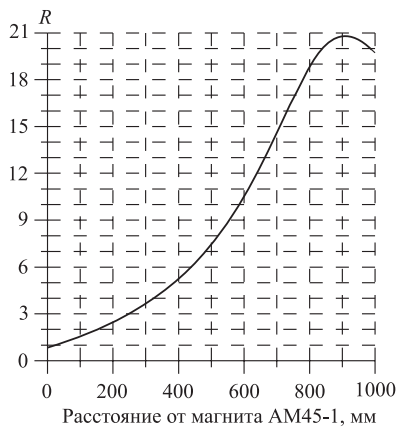


Рис. 11. Разрешение R как функция расстояния от магнита АМ45-1 ($A/Z = 6$)

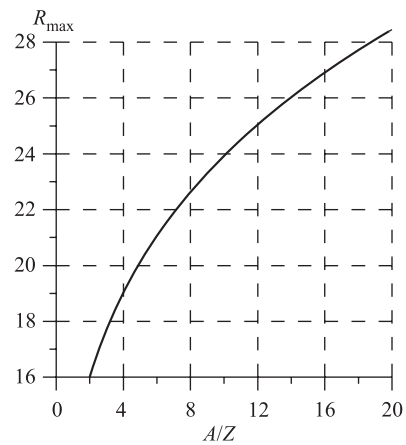


Рис. 12. Зависимость R_{\max} от величины A/Z

При фиксированном потенциале экстракции из ЭЦР-источника ионов эмиттанс пучка уменьшается с увеличением отношения A/Z . Это приводит к уменьшению диаметра пучка и увеличению разрешения R . На рис. 12 показана зависимость максимального значения разрешения R_{\max} от величины A/Z .

2.4. Соленоид AS3. Соленоид AS3 служит для перехвата ионного пучка, прошедшего поворотный магнит AM-45-1 и передачи его на вход второго поворотного магнита AM-45-2. Основные параметры соленоида AS3:

| | |
|--|-------|
| магнитное поле, Тл | 0,5 |
| внутренний диаметр трубы соленоида, мм | 100 |
| эффективная длина соленоида, мм | 513,4 |
| номинальный ток, А | 394,6 |
| номинальное напряжение на обмотке, В | 57,2 |
| мощность питания обмотки, кВт | 22,6 |

На рис. 13 приведена измеренная кривая возбуждения соленоида AS3, а на рис. 14 показан его внешний вид.

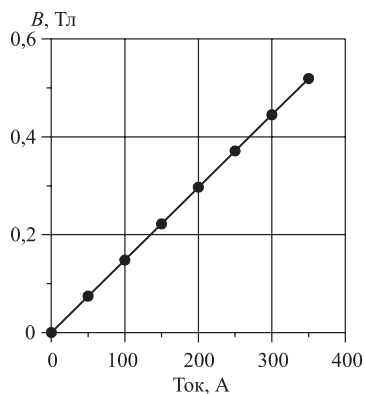


Рис. 13. Кривая возбуждения соленоида AS3



Рис. 14. Соленоид AS3

2.5. Квадруполь AQ2. В канале для прикладных исследований используется квадрупольная линза 11К29-60 для согласования эмиттанса пучков ионов с аксептансом конечного участка канала. Основные параметры квадрупольной линзы:

| | |
|--|-----|
| максимальный градиент индукции магнитного поля, G , Тл/м | 0,6 |
| диаметр апертуры $2a$, мм | 110 |
| длина полюсного наконечника, мм | 200 |

| | |
|--------------------------------------|------|
| номинальный ток, А | 4,8 |
| номинальное напряжение на обмотке, В | 16,6 |
| мощность питания обмотки, Вт | 80 |

На рис. 15 представлена кривая возбуждения квадрупольной линзы, а на рис. 16 — ее внешний вид.

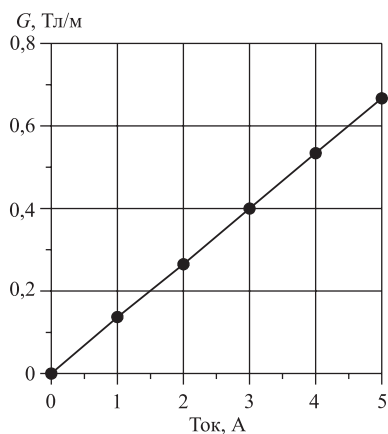


Рис. 15. Кривая возбуждения квадрупольной линзы

Рис. 16. Квадрупольная линза

2.6. Магнитные сканеры. Сканирующая система (ASM, см. рис. 3) предназначена для использования в канале для прикладных исследований. Она должна обеспечивать облучение ионами неподвижной мишени, имеющей размеры 80×80 мм. При этом относительная неоднородность распределения плотности частиц по поверхности мишени должна быть не более $\pm 10\%$, а максимальный угол входа частиц в мишень не должен превышать 3° . Основные параметры системы сканирования:

| | |
|--|------|
| длина вертикального сканера по магниту, мм | 200 |
| частота развертки вертикального сканера, Гц | 100 |
| длина горизонтального сканера по магниту, мм | 200 |
| частота развертки горизонтального сканера, Гц | 90 |
| максимальная индукция отклоняющего магнитного поля, Тл | 0,03 |
| суммарная индуктивность обмоток, мГн | 123 |
| пиковый ток в обмотках, А | 3 |

На рис. 17 показан внешний вид сканирующего магнита.



Рис. 17. Сканирующий магнит

2.7. Система диагностики и коррекции движения центра масс пучка.

Система диагностики состоит из цилиндров Фарадея и профиломеров. В блоках диагностики располагаются неохлаждаемые цилиндры Фарадея, служащие для определения тока пучка. В этих блоках диагностики также размещаются профиломеры для определения координат центра пучка и его размеров.

Корректирующие магниты 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 катушки 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 | 0,0065 |
| максимальный угол коррекции, ° | 0,57 |
| максимальный ток в катушке, А | 4,8 |
| номинальное напряжение, В | 6,4 |
| мощность питания обмотки, Вт | 31 |

На рис. 18 показана измеренная кривая возбуждения корректора, а на рис. 19 — внешний вид корректора.

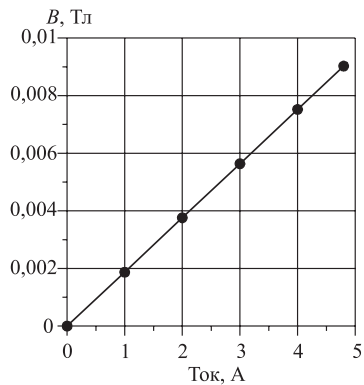


Рис. 18. Кривая возбуждения корректирующего магнита



Рис. 19. Корректирующий магнит

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены габаритные размеры канала транспортировки ионов низких энергий и параметры оптических элементов канала.

Проведенные расчеты показали, что ионы с отношением массы к заряду в диапазоне $A/Z = 2-20$ могут транспортироваться в канале с достаточно высокой ожидаемой эффективностью.

Диаметр пучка на мишени (без развертки) получается приблизительно 40 мм.

На основе проведенных расчетов был спроектирован и изготовлен канал для прикладных исследований циклотрона ДЦ-60.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаринов Н. Ю. Отчет ЛЯР ОИЯИ TOT-DCK 02-06. Дубна, 2004.
2. Alexandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V. Multi-Component Ion Beam Code – MCIB04 // Proc. of XIX Russian Particle Accelerator Conference, RUPAC2004. Dubna, 2004. P. 201.
3. Гикал Б. Н. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-240. Дубна, 2002.

Получено 28 марта 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.06.2006.

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

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 290 экз. Заказ № 55362.

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/