

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ УГЛЕРОДА ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА НУКЛОТРОНЕ ОИЯИ

И. П. Юдин¹, В. А. Панасик, С. И. Тютюнников

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе рассматриваются вопросы построения линии транспортировки пучка $^{12}\text{C}^{+6}$ для медико-биологических исследований на ускорительном комплексе нуклотрон ОИЯИ. Исследуются схема и режимы работы элементов магнитной оптики канала. Представлены результаты расчетов исследуемого канала транспортировки ионов углерода. Обсуждаются алгоритмы управления пучком ионов углерода в исследуемой системе транспортировки. Обосновывается выбор магнито-оптической системы. Приведены графики огибающих пучка в канале. Рассматриваются функции управления сканированием пучка.

The paper deals with the construction of the beam $^{12}\text{C}^{+6}$ transport line for biomedical research at the Nuclotron accelerator complex, JINR. We have studied the scheme and modes of magneto-optical elements of the channel. The results of calculations of the investigated beam transport of carbon ions, are presented. The algorithms to control the carbon ion beam in the transportation system, are discussed. The choice of the magneto-optical system is motivated. The graphs of the beam envelopes in the channel are given. The scanning control beam functions are considered.

PACS: 87.53.-j; 87.56.bd

ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений развития ускорительного комплекса ОИЯИ — это создание на основе нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ [1] стенда медико-биологических исследований. В процессе разработки данного стенда отрабатывается общая технология создания комплекса адронной терапии.

В работе представлен расчет оптики канала транспортировки заряженных частиц комплекса адронной терапии. Предполагается использование канала для транспортировки ионов углерода $^{12}\text{C}^{+6}$ интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^9$ и с энергией 100–550 МэВ/нуклон.

На рис. 1 приведена схема основного канала вывода пучка из нуклотрона в экспериментальный корпус 205. Дополнительный канал начинается вблизи фокуса F3 основного канала.

¹E-mail: yudin@jinr.ru

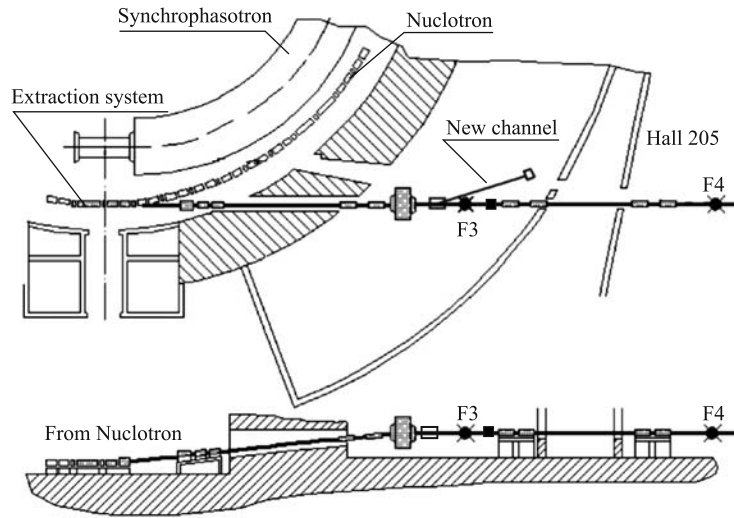


Рис. 1. Схема основного канала вывода из нуклотрона. Вид сверху и сбоку. Показано ответвление проектируемого канала перед фокусом F3

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Математическая постановка. Для описания огибающей при транспортировке пучка можно использовать матричный формализм:

$$X_{\text{out}} = M_N \cdots M_2 \cdot M_1 \cdot X_{\text{in}}, \quad (1)$$

где X_{out} и X_{in} — вектор-столбцы ($X = (\beta, \alpha, \gamma)^T$) конечного и начального условий, состоящие из параметров матрицы Твисса, описывающей пучок. M_1, \dots, M_N — матрицы преобразования элементов тракта — дрейфовых промежутков и квадрупольных линз. Для квадрупольных элементов используется приближение толстых линз. Все матрицы преобразования нелинейны относительно параметров тракта — геометрических размеров элементов и градиентов линз.

Начальные условия для транспортировки пучка в дополнительном канале берутся как текущие значения параметров пучка основного канала нуклотрона. Они должны удовлетворять условиям

$$M_{\text{drift}} \cdot X_{\text{in}} = X_{F3}, \quad (2)$$

где X_{in} — начальные условия из (1); X_{F3} — параметры пучка в фокусе F3 основного канала; M_{drift} — матрица преобразования от точки ответвления дополнительного канала до фокуса F3.

Конечные значения X_{out} транспортировки должны удовлетворять условиям фокуса — равенству нулю производной огибающей пучка по координате транспортировки:

$$\alpha_{x_{\text{out}}} = \alpha_{y_{\text{out}}} = 0, \quad (3)$$

где $\alpha_{x_{\text{out}}}, \alpha_{y_{\text{out}}}$ — α -компоненты матрицы Твисса в фокусе дополнительного канала.

Размер огибающей пучка в фокусе F_k дополнительного канала — близкий к минимально возможному, удовлетворяющий геометрическим ограничениям установки. Минимум огибающей считается известным и определяется взаимным расположением сканирующей системы и области сканирования.

Таким образом, задача сводится к нахождению параметров матриц преобразования из (1), принадлежащих области геометрии установки и соответствующих минимуму размера огибающей в фокусе дополнительного канала (3) при заданных параметрах фокуса F_3 основного канала.

1.2. Ограничения физической установки. Дополнительные ограничения задачи транспортировки пучка возникают при использовании конкретных оптических элементов и их монтаже в экспериментальном павильоне.

Элементы оптики, используемые в канале: поворотный и отклоняющие магниты — СП-94, магнитные линзы — МЛ-17.

Длина канала транспортировки составляет 12 м. Проектируемый канал начинается с поворотного магнита, устанавливаемого в основной канал транспортировки на расстоянии 5,25 м перед фокусом F_3 (рис. 1). На протяжении всего канала размещаются оптические элементы — квадрупольные линзы. В конце канала находится ловушка пучка, непосредственно перед ней — сам стенд в F_k , перед стендом — сканирующая система пучка. Сканирующая система состоит из двух одинаковых отклоняющих магнитов, повернутых по оси относительно друг друга на 90° .

Естественным ограничением транспортировки пучка выступает диаметр вакуумного трубопровода 0,25 м, который проходит через все квадрупольные элементы системы. На заключительном этапе сканирующей системы ограничением является апертура магнитов $0,3 \times 0,13$ м. Взаимное расположение области сканирования и системы сканирующих магнитов зафиксировано.

Для каждой квадрупольной линзы ограничивается максимальный ток, что для заданного диапазона энергий 100–550 МэВ/нуклон приводит к ограничению коэффициента $K < 1,5 \text{ м}^{-2}$, используемого при расчете фазового набегания на линзе.

Сечение пучка в фокусе F_3 основного канала транспортировки имеет вид окружности с диаметром 0,04 м [2], что приводит к определению начальных условий распространения пучка.

При расчетах предполагалось равенство горизонтального и вертикального эмиттансов пучка [3, 4]. Использовались значения эмиттанса $25 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ [3].

Для проведения экспериментов планируется область пространства вокруг фокуса в виде куба со стороной 0,1 м. При сканировании области изменяется длина канала транспортировки. Соответственно, должно существовать продолжение решения задачи транспортировки на всю область сканирования с фиксированными параметрами геометрии канала. Т.е. помимо геометрических ограничений на решение задачи налагаются условия существования решения в окрестности сканирования конечного фокуса.

2. РЕШЕНИЕ

2.1. Минимальный размер пучка в фокусе и эмиттанс пучка. Расположение сканирующей системы относительно мишени (рис. 2) задает минимальный размер пучка в фокусе, ограниченный апертурой сканирующей системы. Исходя из формулы эмиттанса $E = x'x$, можно оценить с хорошей точностью минимальный размер пучка в фокусе.

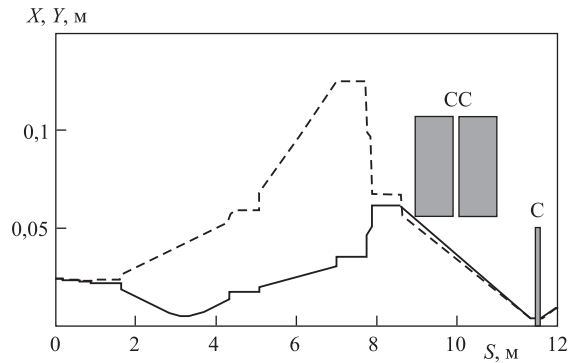


Рис. 2. Расположение сканирующей системы магнитов на пучке (СС). Область сканирования в фокусе пучка (С)

Полагаем: x' — средний наклон огибающей на участке перед фокусом, а x — значение огибающей в фокусе.

Для заданной апертуры и расположения магнитов получаем:

- для эмиттанса $25 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ минимальный диаметр фокуса 2,8 мм,
- для эмиттанса $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ минимальный диаметр фокуса 5,6 мм.

2.2. Геометрические ограничения на область сканирования перпендикулярно пучку.

Область сканирования мишени в перпендикулярной пучку плоскости ограничивается апертурой двух последовательно стоящих магнитов. Для конкретного канала апертура магнита — $0,3 \times 0,13 \text{ м}$, что согласуется с планируемой областью сканирования — $0,1 \times 0,1 \text{ м}$.

2.3. Полученные результаты. Огибающая пучка. Исходя из заданных ограничений были найдены решения для эмиттанса $25 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ (рис. 3).

Сечение пучка в фокусе F_k близко к минимальному для данной геометрии сканирующей системы:

- для эмиттанса $25 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ — $3,0 \times 3,0 \text{ мм}$,
- для эмиттанса $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ — $5,6 \times 6,0 \text{ мм}$.

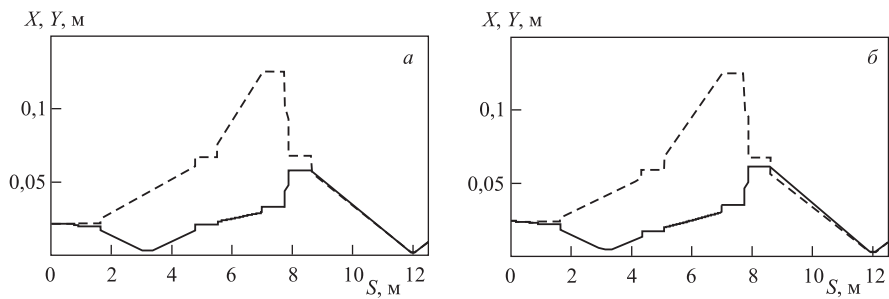


Рис. 3. Огибающие пучка X, Y вдоль канала для значений эмиттанса $25 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ (а) и $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ (б). Штриховой линией показана огибающая Y

3. УПРАВЛЕНИЕ ПУЧКОМ

3.1. Расширение пучка и дополнительная фокусировка линз при сканировании вдоль пучка. При отклонении вдоль пучка от точки фокусировки происходит расширение пучка. Для фиксированной геометрии сканирующей системы изменение размера пучка зависит от размера фокуса. Вдоль пучка по области сканирования $\pm 0,05$ м изменение составляет (рис. 4):

- 20 % для диаметра пучка 3 мм (эмиттанс 25π мм · мрад), т. е. 0,6 мм;
- 6 % для диаметра пучка 5,8 мм (эмиттанс 50π мм · мрад), т. е. 0,35 мм.

Можно компенсировать расширение пучка, если синхронно с движением по области сканирования корректировать настройку оптических элементов. Максимальное значение коррекции составляет порядка 2 % (рис. 5).

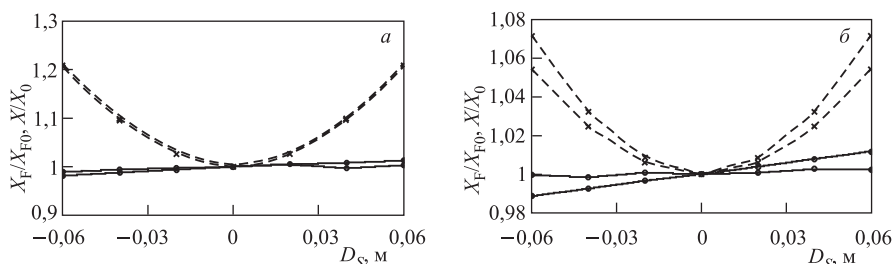


Рис. 4. Огибающая пучка вблизи фокуса, нормированная на размер фокуса. Значения эмиттанса 25π мм · мрад (а) и 50π мм · мрад (б). Показаны варианты с дополнительной коррекцией настройки линз (сплошная линия) и без нее (штриховая линия)

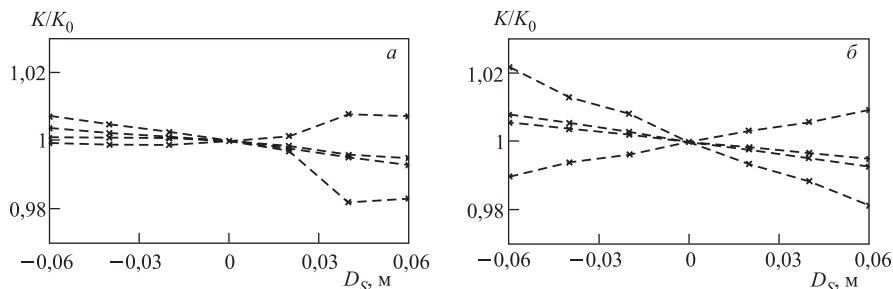


Рис. 5. Коррекция настройки линз, нормированная на значение в центральной точке. Значения эмиттанса — 25π мм · мрад (а) и 50π мм · мрад (б)

3.2. Особенности поглощения энергии. Так как при облучении мишени используется ярко выраженная особенность пика поглощения энергии — пика Брэгга (рис. 6), то возрастает значение компенсации расфокусировки пучка при отклонении от центрального положения при сканировании.

Решение о выборе функции управления пучком принимается исходя из выбранного способа сканирования мишени и допусков проводимого эксперимента.

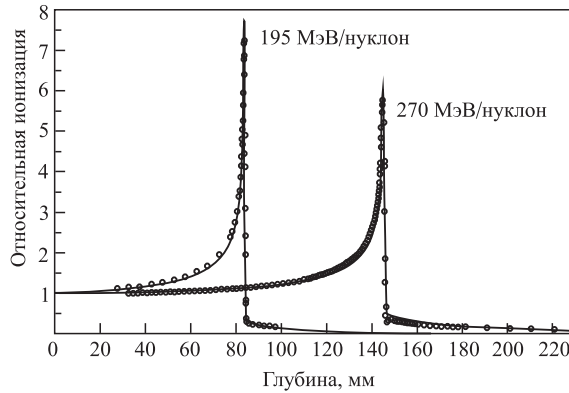


Рис. 6. Положение пика Брэгга при различных энергиях ионов углерода

4. ВАРИАНТЫ КОНФИГУРАЦИЙ

4.1. Количество магнитных линз. Для выбора конкретной конфигурации линии транспортировки были рассмотрены варианты, состоящие из различного количества фокусирующих элементов.

Для случая простейших конфигураций, состоящих из одного или двух квадрупольных элементов, не удалось найти решений, удовлетворяющих начальным и граничным условиям физической установки. Для конфигураций с тремя и четырьмя элементами результирующие огибающие представлены на рис. 7. Варианты с тремя и четырьмя линзами отличаются размером и формой фокуса — при увеличении количества линз эллиптический фокус можно перевести в круглый.

Сечение пучка в фокусе F_k для различных конфигураций составляет (эмиттанс $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$):

- для конфигурации из трех линз — $5,6 \times 12,0 \text{ мм}$,
- для конфигурации из четырех линз — $5,6 \times 6,0 \text{ мм}$.

Возможно использование более сложной конфигурации четырех линз, когда в дополнительном канале стоят две линзы, а еще две — из основного канала. В этом случае для транспортировки пучка необходимо корректировать настройки линз основного канала.

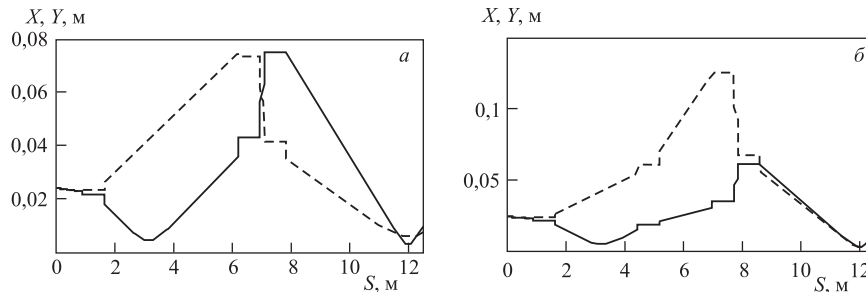


Рис. 7. Сравнение огибающих для конфигураций с различным количеством квадрупольных линз — три (а) и четыре (б) линзы. Значение эмиттанса — $50 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$

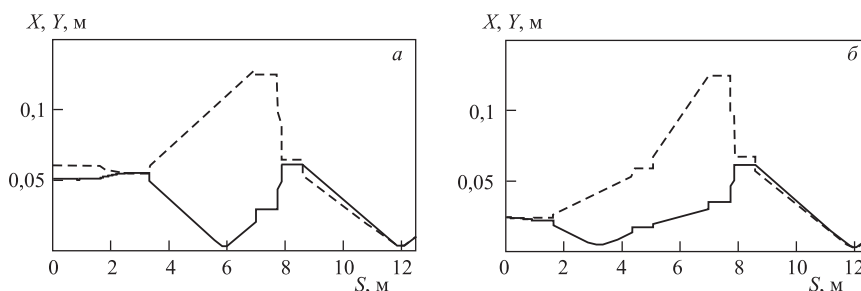


Рис. 8. Сравнение огибающих для конфигураций с различными начальными условиями — сечение в фокусе F3 $0,1 \times 0,12$ м (а) и $0,04 \times 0,04$ м (б). Значение эмиттанса — 50π мм · мрад

4.2. Начальные условия. Для проверки существования решения в других режимах работы рассматривались другие начальные условия распространения пучка в дополнительном канале. Сечение пучка в фокусе F3 основного канала выступает в качестве параметра, определяющего начальные условия распространения пучка в дополнительном канале.

Кроме основного решения с фокусом на мишени основного канала $0,04 \times 0,04$ м рассматривалось решение для фокуса $0,1 \times 0,12$ м [4]. Огибающие пучка обоих решений приведены на рис. 8.

Сечение пучка в фокусе на мишени для конфигураций с начальными условиями, соответствующими различным размерам пучка в фокусе F3 основного канала (эмиттанс 50π мм · мрад):

- для фокуса $0,1 \times 0,12$ м основного канала — $5,6 \times 6,3$ мм,
- для фокуса $0,04 \times 0,04$ м основного канала — $5,6 \times 6,0$ мм.

5. ОБОРУДОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Для дополнительного канала предполагается использовать следующее оборудование:

- магнитные линзы МЛ-17,
- сканирующие и поворотный магниты СП-94.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана принципиальная возможность построения оптической системы для транспортировки пучка с различным числом оптических элементов. Найдены корректирующие поправки для функции сканирования пучка.

Выбор параметров оптической системы определяется режимом работы основного канала ускорителя и требованиями проводимых медико-биологических исследований.

Выбор временных функций управления магнитными элементами определяется задачами планирования эксперимента (способом управления энергией пучка, типом сканирования мишени и др.).

Настоящая работа позволяет приступить к планированию непосредственно медико-биологических экспериментов на стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бартенева Н. А. и др.* Система транспортировки пучков от синхрофазотрона и нуклотрона к экспериментальным установкам корпуса №205. Сообщ. ОИЯИ P1-90-75. Дубна, 1990; <http://nucloserv.jinr.ru/>
2. *Safronova A. et al.* Investigation of 4 GeV Deuteron Beam Parameters at the Nuclotron // Book of Abstracts of the 3rd Intern. Conf. «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy» (НРАЕ-Київ2010), Kiev, June 7–12, 2010. Kyiv, 2010. С. 113.
3. *Волков В. И.* Частное сообщение.
4. *Adam J. et al.* Transmutations of Th and U with Neutrons Produced in Pb Target and U-Blanket System by Relativistic Deuterons. JINR, E15-2008-118. Dubna, 2008. 27 p.

Получено 10 февраля 2011 г.