

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.663

ВАРИАНТ ТРАКТА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОТОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ОНКООФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПЛТ В НИЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ” – ПИЯФ

© 2020 г. С. А. Артамонов^а, Е. М. Иванов^а, Г. А. Рябов^а, В. А. Тонких^{а, *}, Д. А. Амерканов^а

^а Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, Гатчина, 188300 Россия

*e-mail: tonkikh_va@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.

После доработки 04.08.2020 г.

Принята к публикации 04.08.2020 г.

Исследован вариант тракта транспортировки протонного пучка с энергией 60 МэВ для будущего онкоофтальмологического центра протонной лучевой терапии на изохронном циклотроне Ц-80 в ПИЯФ. Тракт при этом должен удовлетворять целому набору требований. На основе серии расчетов определены оптимальные параметры и состав элементов тракта. Показано, что такой тракт позволяет попеременно и оперативно переходить с режима наработки изотопов на циклотроне к режиму работы центра протонной лучевой терапии без кардинальной перестройки систем ускорителя.

Ключевые слова: изохронный циклотрон, офтальмологический центр, транспортировка пучка

DOI: 10.1134/S2079562920040028

ВВЕДЕНИЕ

Изохронный циклотрон Ц-80 является многоцелевой машиной. Он предназначен для производства медицинских изотопов высокого качества (например, генераторных изотопов), создания центра для лечения меланомы глаза и проведения испыта-

ний электроники для авиации и космоса на радиационную стойкость [1]. Сейчас на циклотроне дополнительно разрабатывается новый способ получения сверхчистых изотопов с помощью магнитного сепаратора.

Общий вид циклотрона представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид циклотрона Ц-80.

Таблица 1

Магнитная структура	
Диаметр полюса	2.05 м
Зазор в долине	386 мм
Зазор в холме	163 мм
Магнитное поле в центре	1.352 Тл
Флаттер (макс.)	0.025
Угол спиральности (макс.)	65°
Число секторов	4
Ток выведенного пучка	до 100 мкА
Радиус вывода пучка	0.65–0.90
Энергия (варьируемая)	40–80 МэВ
Метод вывода пучка	стриппирование

Основные параметры циклотрона, представлены в табл. 1. Согласно приведенным в таблице параметрам циклотрон Ц-80 может быть использован как для производства целого спектра медицинских изотопов, так и для создания офтальмологического центра (ОФЦ) по лечению раковых заболеваний глаза.

Однако при реализации совместной работы циклотрона на производство изотопов и офтальмологию возникают некоторые проблемы. Дело в том, что для производства изотопов требуется пучок с высокой интенсивностью ~ 100 мкА ($6 \cdot 10^{14}$ с⁻¹) и выше, а для офтальмологии необходим пучок всего $\leq 10^{10}$ с⁻¹. Одновременный вывод двух таких пучков, с указанными выше параметрами, из циклотрона Ц-80 оказался весьма сложной технической и физической задачей, требующей существенных переделок уже запущенной машины. Основные детали этой проблемы рассмотрены в работе [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе обсуждается другой — относительно простой, дешевый и радиационно более чистый вариант тракта для офтальмологии, позволяющего оперативно переходить с одного режима работы циклотрона на другой без кардинальной перестройки систем ускорителя. То есть, вывод пучка производится попеременно: либо для наработки изотопов, либо для работы ОФЦ. Такой режим работы вполне допустим, т.к. для производства изотопов важен интеграл облучения, поэтому остановки в облучении изотопов, без нарушения режима настройки ускорителя, не являются катастрофичными.

Для проектируемого офтальмологического тракта были сформулированы следующие требования. Энергия пучка протонов в тракте офтальмологии должна быть 60 МэВ, поперечный размер пучка в конце канала, т.е., на входе в зал протонно лучевой терапии, должен быть ≥ 20 мм в диаметре, его расходимость не более 5 мрад (малый эмиттанс пучка). При этом необходимо осуществить подъем пучка с 1250 до 1750 мм, т.е., на 0.5 м по вертикали, снизив интенсивность исходного пучка до 10^9 частиц см⁻² с⁻¹. Найти возможность обеспечить быструю перестройку пучка от режима наработки изотопов с интенсивностью 100 мкА к режиму офтальмологии без кардинальной перестройки систем ускорителя. Реализовать минимальные потери пучка в зале ускорителя.

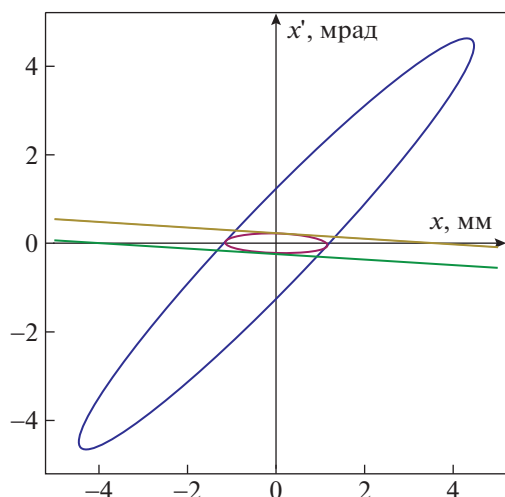
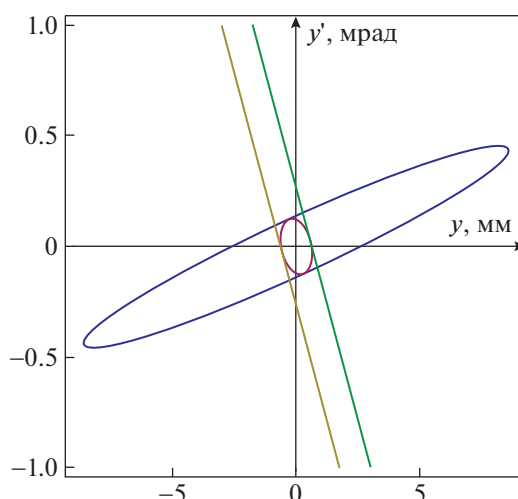
МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для проектирования системы транспортировки пучка к экспериментальным установкам необходимо знать фазовые эллипсы пучка на выходе из выводной системы ускорителя. В линейном приближении движение частиц пучка в вертикальной (y) и горизонтальной (x) плоскости является независимым. В этом приближении состояние такого ансамбля частиц может быть описано с помощью двух независимых фазовых эллипсов [3].

В качестве начального фазового эллипса в вертикальной плоскости был выбран согласованный с фокусирующей структурой циклотрона фазовый эллипс пучка на радиусе и азимуте перезарядного устройства и с максимальным отклонением от медианной плоскости 3 мм [4]. Отклонение 3 мм в точке максимума огибающей определяет величину эмиттанса в диапазоне ~ 1 –4 мм мрад.

Начальные условия для горизонтального движения определялись более сложно. Это связано с механизмом заброса пучка на мишень в процессе ускорения. Из-за малой величины заброса пучка на мишень (несколько миллиметров) на перезарядном пробнике образуется источник с почти точечными размерами. Исходя из опыта работы на других циклотронах принято считать, что центр заброса пучка отстоит от края перезарядного устройства на 1.5 мм. Расходимость пучка определялась максимальной расходимостью эллипса, согласованного с фокусирующей структурой циклотрона в горизонтальной плоскости. Детали описаны в предыдущей работе [4].

Оптика пучка рассчитывалась с помощью широко применяемой в мире программы Trase-3D [5]. Однако программа не рассчитана на использование ограничивающих апертур или коллиматоров в тракте. Поэтому был применен искусственный прием. Влияние коллиматора на фазовый портрет пучка учитывалось следующим образом.

Рис. 2. Горизонтальный $x-x'$.Рис. 3. Вертикальный эллипс $y-y'$.

На x и y фазовые эллипсы пучка при входе в тракт транспортировки накладывался аксептанс коллиматора. Аксептанс представляет собой две прямые линии, являющиеся отображением с помощью матрицы перехода апертуры коллиматора $x, y \leq 3$ мм, на вход тракта.

Согласно работе [3]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{X}_0,$$

$$\text{где } \mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix}, \mathbf{X} = \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{pmatrix}, \mathbf{X}_0 - \text{ко-}$$

ординаты и углы движения частицы на входе тракта.

Очевидно, что сквозь коллиматор пройдут частицы, координаты которых удовлетворяют соотношениям

$$|x| = |M_{11}x_0 + M_{12}x'_0| \leq A,$$

$$|y| = |M_{33}y_0 + M_{34}y'_0| \leq A.$$

Здесь $|M_{11}x_0 + M_{12}x'_0| = A$ и $|M_{33}y_0 + M_{34}y'_0| = A$ — соответственно параллельные прямые в фазовом пространстве пучка $x-x'$ и $y-y'$, являющиеся отображением аксептанса коллиматора на вход тракта.

Далее в часть фазового пространства, ограниченного входными эллипсами пучка (вертикальным и горизонтальным на выходе согласующего магнита [4]) и прямыми отраженного коллиматора, вписывался новый эллипс (это позволяет

остаться в формализме TRACE-3D, работающего с эллипсами пучков).

Такая процедура позволяет найти эллипс и эмитанс эллипсу пучка, проходящему без потерь через тракт и коллиматор. Отношение площади вписанного фазового эллипса к площади первоначального эллипса определяет коэффициент уменьшения интенсивности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Окончательный вариант нового, оптимизированного по программе Trace-3D, тракта представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлен PrintScreen результата работы программы Trace-3D по оптимизации предложенного тракта транспортировки. Сверху — оптимальные значения градиентов магнитных полей квадрупольных линз. В нижней части рис. 5 верхняя линия соответствует горизонтальной (по отношению к средней линии), а нижняя — вертикальной огибающей пучка.

В результате дополнительных исследований было выявлено, что для уменьшения интенсивности пучка в новом тракте на пять порядков нужно: во-первых, выключить фокусирующие соленоиды в системе аксиальной инжекции (САИ) циклотрона. Это позволит уменьшить интенсивность пучка в ~ 1000 раз без увеличения радиационной нагрузки на системы ускорителя, т.к. энергия инжектируемых в Ц-80 отрицательных ионов водорода всего 26 кэВ. Во-вторых, оставшуюся ~ 0.1 мкА ($6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$) избыточную интенсивность, можно уменьшить ~ 100 раз за счет введения в новом тракте транспортировки пучка коллиматора К2 размером 6 мм $\times$ 6 мм.

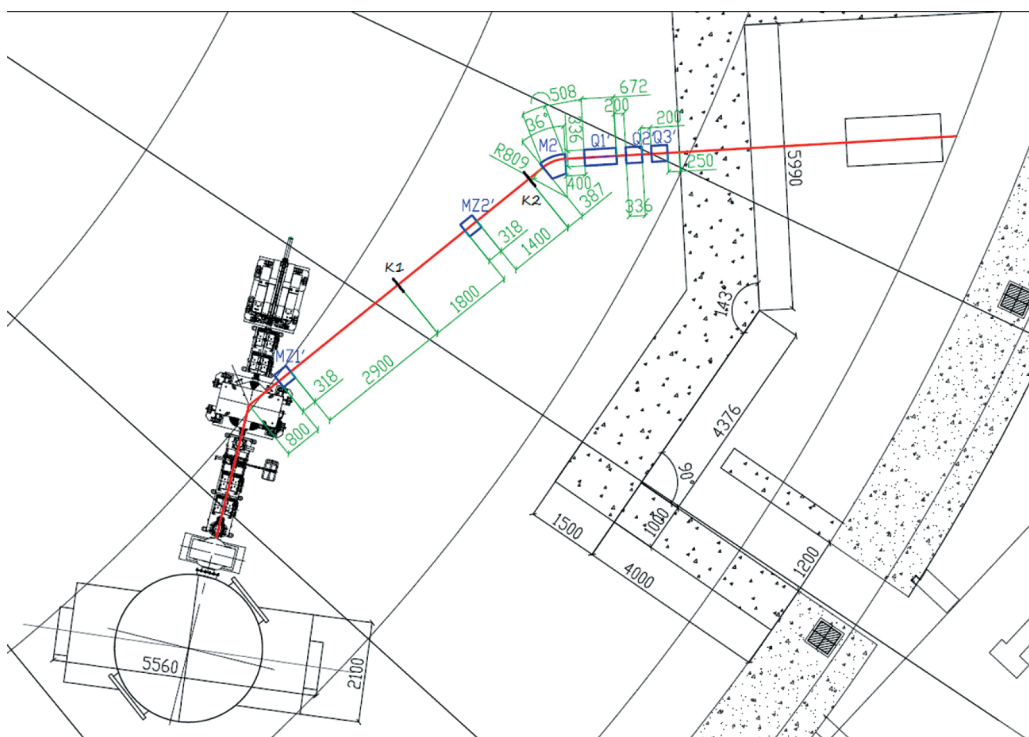


Рис. 4. Оптимизированный тракт транспортировки пучка для офтальмологических нужд. Здесь MZ1, MZ2 – поворотные магниты в вертикальной плоскости; M1, M2 – поворотные магниты в горизонтальной плоскости; K1, K2 – коллиматоры; Q1, Q2, Q3 – триплет квадрупольных линз.

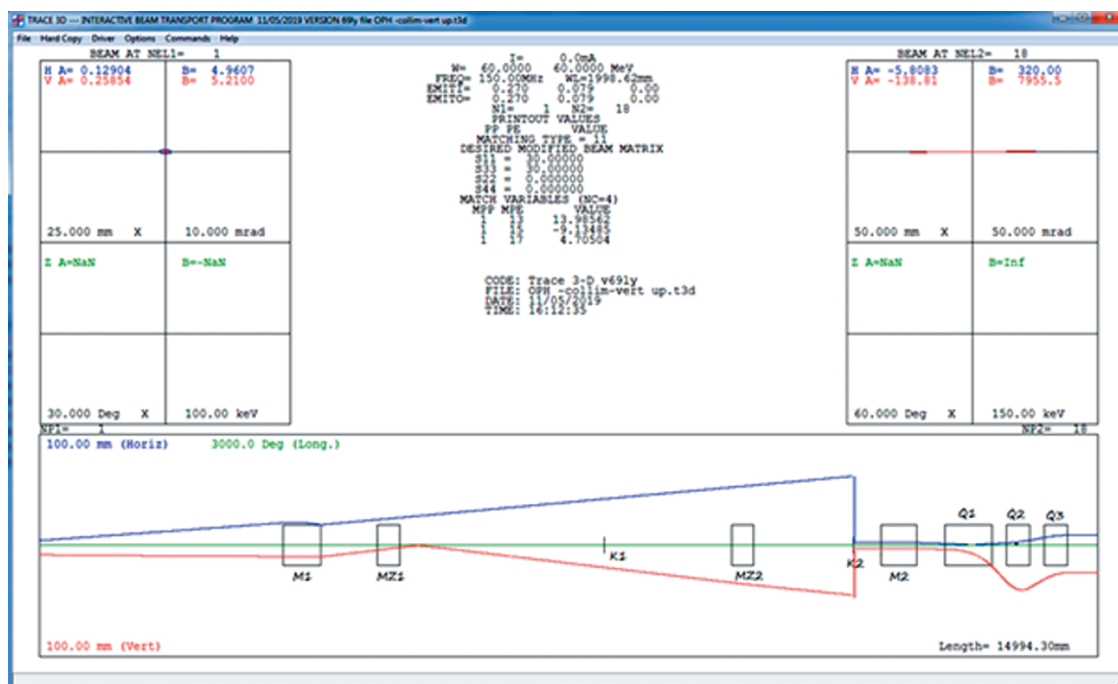


Рис. 5. Результаты оптимизационного расчета Trace-3D и огибающие пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный вариант тракта удовлетворяет всем сформулированным выше требованиям, а также является простой, дешевой, радиационно-чистой, с минимальным числом элементов схемой. Т.к. для производства изотопов важен интеграл облучения, то переключение пучка на некоторое время в режим для офтальмологических нужд, отключив только солениды в системе аксиальной инжекции и переключив поворотный магнит, не является проблемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Artamonov S.A., Amerkanov D.A., Ivanov E.M. et al. // Proc. RUPAC2018 Conf. Protvino, Russia. 2018. P. 65–67.
2. Artamonov S.A., Ivanov E.M., Riabov G.A., Tonkikh V.A. // Proc. OPENSOURCE Conf. 2018. Gatchina, Russia. 2018. P. 1.
3. Steffen K.G. High Energy Beam Optics. 1965. New York-London-Sydney: Interscience Publ.
4. Artamonov S.A., Chernov A.N., Ivanov E.M., Riabov G.A., Tonkikh V.A. // Proc. RUPAC2016 Conf. St-Petersburg, Russia. 2016. P. 176–178.
5. Crandall K., Rusthoi D. “TRACE 3-D Documentation,” 3rd Ed., LA-UR-97-886. 1997.

Variant of the Protons Beam Delivery System for the Oncological Ophthalmological Center of Proton Radiation Therapy at the NRC “Kurchatov Institute”—PNPI

S. A. Artamonov¹, E. M. Ivanov¹, G. A. Riabov¹, V. A. Tonkikh^{1, *}, and D. A. Amerkanov¹

¹Petersburg Institute of Nuclear Physics, National Research Center “Kurchatov Institute”, Gatchina, 188300 Russia

*e-mail: tonkikh_va@pnpi.nrcki.ru

Received May 8, 2020; revised August 4, 2020; accepted August 4, 2020

Abstract—A variant of the protons beam delivery system with an energy of 60 MeV for the future oncoophthalmological center for proton radiation therapy at the isochronous cyclotron C-80 at PNPI was designed. The requirements to the beam characteristics were defined. Based on a series of calculations, the optimal parameters and composition of the beam line elements are determined. It is shown that such a beam line allows one to alternately and efficiently switch from the isotope production mode on the cyclotron to the mode of operation of the center of proton radiation therapy without a fundamental overhaul of the accelerator systems.

Keywords: isochronous cyclotron, ophthalmological center, beam transportation