

Вывод ионов углерода из протонного синхротрона ИФВЭ У-70 для ионной терапии

Ю.М. Антипов, Ю.Г. Каршев, Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Возможность использования ускорительного комплекса ИФВЭ для медицинских целей была рассмотрена в концептуальном проекте медицинского облучательного центра ИФВЭ [1]. Протонный синхротрон ИФВЭ на 70 ГэВ может быть использован как накопительное кольцо для ускоренных в бустере ионов углерода C_{12}^{+6} . Системой медленного вывода пучок ионов углерода фиксированной энергии $E_k = 5400$ МэВ выводится вовнутрь кольца синхротрона в экспериментальный зал 1БВ. Выведенный пучок транспортируется до трех медицинских кабин для ионной терапии. Магнитная оптика каналов позволяет производить облучение мишеней путем сканирования сформированным пучком с необходимой перестройкой энергии пучка ионов углерода с помощью пассивных поглотителей.

1. Медленный вывод пучка ионов углерода

Вывод пучка ионов углерода из У-70 в зал 1БВ (вовнутрь кольца) предполагается осуществить из 22-го прямолинейного промежутка (ПП). Для обхода 23-го магнитного блока необходимо получить отклонение выводимого пучка внутрь кольца порядка 2 м на длине 10 м, что соответствует углу поворота пучка в ОМ-22 порядка 200 мрад. Такую схему вывода определяет расположение магнитных блоков на этом участке. Схема вывода пучка ионов углерода основывается на существующих элементах вывода пучка протонов. Она состоит из электростатического дефлектора ЭД-106, септум-магнитов ОМ-18, ОМ-20 и ОМ-22. Медленный вывод основан на использовании резонанса третьего порядка $3Q_r = 29$ для раскачки бетатронных колебаний пучка и его заброса в электростатический дефлектор [2]. Толщина ножа дефлектора составляет 0.15 мм, что позволяет свести к минимуму потери частиц при резонансном забросе пучка. Для возбуждения 29-й гармоники квадратичной нелинейности используются две пары секступольных линз, расположенных в 12-, 42-, 72- и 102-м прямолинейных промежутках. Для подвода циркулирующего пучка к ЭД-106 и ножу септум-магнита ОМ-18 создается локальное искажение орбиты бампами 103/109, 104/110, 15/21 и 17/23.

Фазовый объем исходного пучка в У-70 с учетом ошибок инжекции составляет ~ 15 мм·мрад для обеих плоскостей поперечного движения пучка. При таких размерах пучка раскачка бетатронных колебаний для малых и больших амплитуд идет по разным фазовым траекториям. Из-за этого получается большой угловой разброс пучка у ножа электростатического дефлектора, что приводит к увеличению эффективной толщины ножа и потерь пучка на нем. Сближение фазовых траекторий для больших и малых амплитуд при наведении на резонанс магнитным полем основных магнитов для наших условий можно добиться выбором положительной хроматичности. Необходимая хроматичность равна $\xi_r = \delta_{pez} \frac{\Psi_{\Delta p}}{\Delta r} = +8.75$, где $\delta_{pez} = -2.8 \cdot 10^{-2}$ — расстройка частоты от резонансной; $\Psi_{\Delta p} = 2.5$ м — величина дисперсионной функции в месте установки электростатического дефлектора; $\Delta r = 8$ мм — необходимое смещение фазовой траектории для малой амплитуды. Для получения нужного значения используется система коррекции хроматичности.

На рис. 1 приведены горизонтальные фазовые портреты циркулирующего и заброшенного пучков в месте установки электростатического дефлектора и септум-магнитов и фазовые портреты выведенного пучка в ПП 23. Расчетная эффективность вывода составляет $94 \div 96\%$. Параметры основных элементов системы вывода представлены в табл. 1.

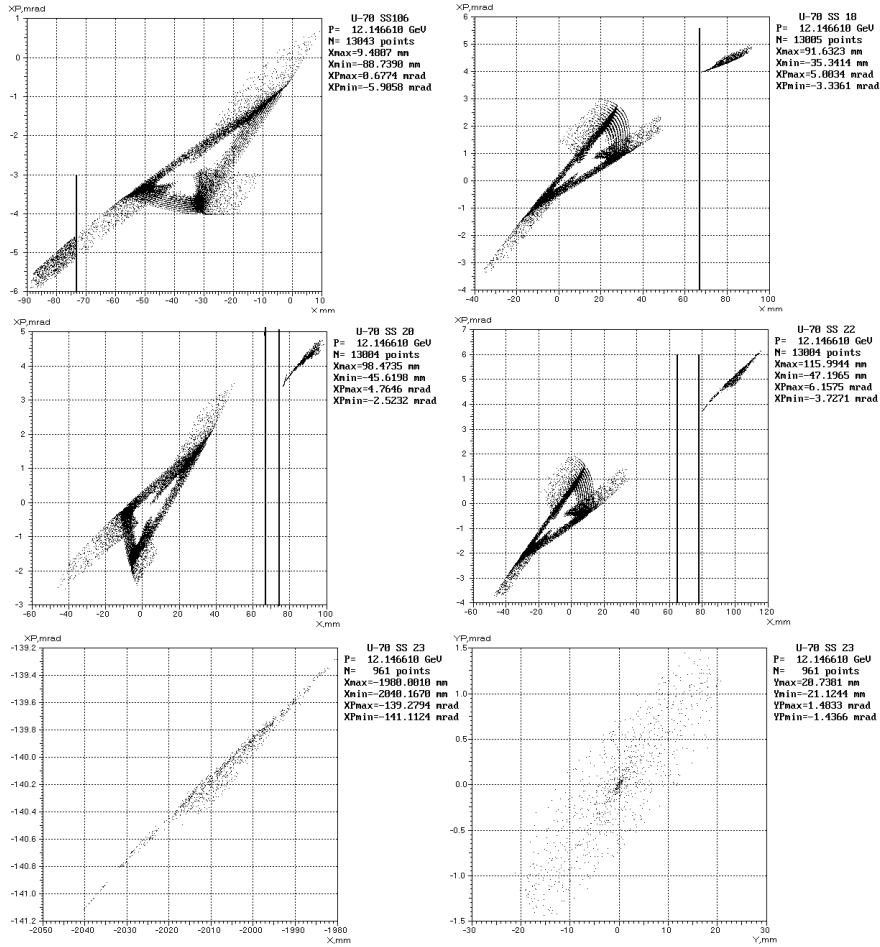


Рис. 1: Горизонтальные фазовые портреты циркулирующего и заброшенного пучков в ПП 106; 18; 20; 22 и фазовые портреты выведенного пучка в ПП 23. Жирной линией показано положение ножей электростатического дефлектора и септум-магнитов.

Таблица 1: Параметры электромагнитов системы вывода.

Электромагниты	Длина (м)	Апертура (мм) HxV	Толщина токовой перегородки (мм)	Поле
ЭД-106	3.0	20x55	0,15	9.8 кВ/см
ОМ-18	1.26	40x45	0,47	0.13 кГс
ОМ-20	1.325	40x55	7,5	0.15 кГс
ОМ-22	1.26	40x40	14	10.7 кГс
Секступоли	0.5	$\phi 160$	-	$\pm 0.09/\pm 0.16$ 1/м ²

2. Канал транспортировки пучка ионов углерода от У-70 до мишени

Схема трассы канала транспортировки пучка ионов углерода от У-70 в зал 1БВ для организации медицинского облучательного центра показана на рис. 2. Канал обеспечивает доставку пучка до трех медицинских облучательных кабин. Две кабин предполагается использовать для облучения пациентов, а третью — для экспериментов с фантомами. Головная часть канала состоит из двух поворотных магнитов МН1, МН2 и триплета квадрупольных линз L1, L2, L3. Эта часть канала расположена в зале кольцевого ускорителя У-70. Далее трасса до магнита

МН3 проходит через земляную защиту кольцевого ускорителя и попадает в зал 1БВ. Магнит МН3 обеспечивает разводку трассы на три направления. Электромагниты MV1 и MV2 задают подъем трассы на 5,3 м, а магниты MV3 и MV4 обеспечивают ввод пучка на мишень под углом 45° к горизонту. Расстановка магнитов выполнена с учетом минимизации линейной дисперсии в конце канала.

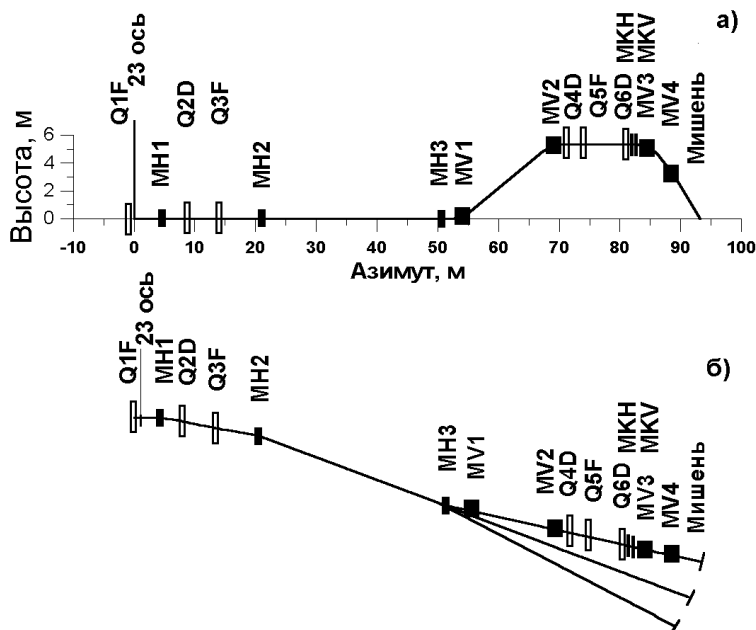


Рис. 2: Вертикальная трасса (а) и план канала транспортировки пучка ионов углерода до трех медицинских облучательных кабин (б).

На рис. 3 приведены огибающие пучка и дисперсионные функции вдоль канала. Система фокусировки обеспечивает размер пятна на мишени диаметром от 10 до 40 мм с возможностью сканирования в двух поперечных плоскостях на 5 см. Для данного варианта оптика настроена для получения на мишени пучка размерами: 20x20 мм. Канал транспортировки с вертикальной трассой содержит 7 поворотных магнитов, 6 квадрупольных линз и 2 корректирующих диполя. На двух других каналах установлены по 3 квадрупольных линзы и по 2 корректирующих диполя. В канале также размещаются приборы для измерения положения центра тяжести, профиля и интенсивности пучка. От выхода последнего магнитного элемента до мишени имеется расстояние ~ 4 м. Для формирования однородного пучка нужного профиля используются рассеиватели и коллиматоры. Регулирование энергии ионов углерода предполагается производить пассивным образом с использованием поглотителей.

Параметры электромагнитов канала с вертикальной трассой приведены в табл. 2.

Таблица 2: Элементы канала транспортировки.

Элемент	Длина (м)	Апертура (мм) HxV	Поле (кГс)	Градиент (кГс/см ²)
МН1, МН2	1.1	120x80	-10,954	-
МН3	1.1	120x80	± 9.149	-
MV1, MV2	2.7	80x120	± 9.275	-
MV3, MV4	2.7	80x120	-10.0	-
Q1F-Q6D	1.0	$\phi 150$	-	0,08-0.28

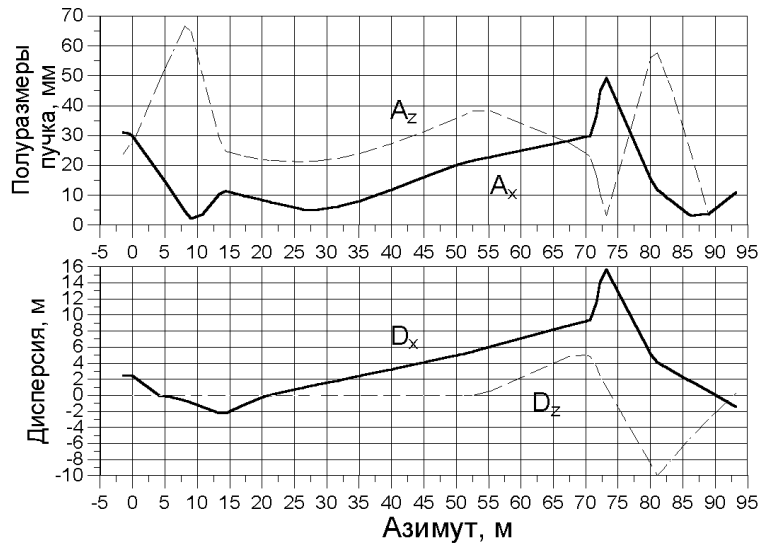


Рис. 3: Полуразмеры пучка и дисперсия в канале транспортировки пучка.

Заключение

В работе рассмотрена схема медленного вывода пучка ионов углерода из У-70 на бустерном столе внутрь кольца в районе 22-го прямолинейного промежутка, проведено компьютерное моделирование процесса резонансного медленного вывода пучка ионов углерода с использованием резонанса третьего порядка, рассчитан канал транспортировки пучка до здания 1БВ и спроектирована схема разводки пучка по трем облучательным кабинам. Выбраны трассы каналов и параметры магнитной оптики для формирования необходимых размеров пучка на мишенях. Расчетная эффективность вывода составляет $94 \div 96\%$.

Выполненная работа позволяет утверждать, что вывод пучка ионов углерода из У-70 и организация облучения медицинских мишеней ионами углерода в здании 1БВ технически вполне возможны. Но для этого требуется замена электромагнитов системы вывода на другие с большими вертикальными апертурами.

Проектируемые системы медленного вывода и транспортировки пучка ионов углерода до мишени также позволяют использовать протоны для лучевой терапии.

Список литературы

- [1] Антипов Ю.М., Василевский А.В и др. Медицинский облучательный центр с пучком ионов углерода на базе ускорительного комплекса ИФВЭ. XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.
- [2] Федотов Ю.С. Использование нелинейных резонансов бетатронных колебаний для медленного вывода частиц из ускорителей с сильной фокусировкой. Препринт ИФВЭ, Серпухов, 1971.