



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–10

В.И. Гаркуша, В.Н. Запольский, С.В. Иванов,
В.П. Карташев, А.П. Солдатов

**Магнитооптическая система медицинского канала
ионов углерода на ускорителе У-70**

Протвино 2022

Аннотация

Гаркуша В.И. и др. Магнитооптическая система медицинского канала ионов углерода на ускорителе У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022–10. – Протвино, 2022. – 11 с., 5 рис., 3 табл., библиогр.: 6.

В работе приводится описание структуры и основных параметров канала частиц, разработанного для транспортировки выведенного из ускорителя У-70 пучка ионов углерода C_{12}^{+6} к двум процедурным кабинам в специализированной медицинской зоне. Представлены расчетные характеристики пучков ионов с энергией от 200 до 455 МэВ на нуклон.

Abstract

Garkusha V.I. et al. Magneto-optical system for a carbon ion medical beam at the U-70 accelerator: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022–10. – Protvino, 2022. – p. 11, figs. 5, tables 3, refs. 6.

This paper outlines the structure and main parameters of the beam transfer line designed to deliver C_{12}^{+6} carbon ion beams extracted from the U-70 accelerator to the two treatment rooms in a dedicated medical area. Calculated characteristics of ion beams with energies from 200 to 455 MeV per nucleon are presented.

Введение

Начиная с 2012 года пучок ионов (ядер) углерода C_{12}^{+6} , ускоренный в быстро циклирующем синхротроне У-1.5 до энергии 455 МэВ/нуклон, используется в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ для проведения прикладных радиобиологических исследований. Из У-1.5 пучок переводится в синхротрон У-70, который используется для накопления, замедления (в диапазоне от 455 до 200 МэВ/нуклон) и растяжки ионного пучка. Медленный вывод пучка из прямолинейного промежутка ППЗ4 с длительностью до 1 с в экспериментальный зал 1БВ реализован на основе двухкаскадной схемы Пиччиони, основными элементами которой являются тонкая внутренняя мишень-замедлитель и септум-магнит, разнесенные по фазе бетатронного движения на π [1]. Для транспортировки пучка в зону радиобиологического стенда (РБС) в настоящее время используется канал № 25. Дальнейшее развитие проводимых исследований, а также применение полученного углеродного пучка для целей ионной лучевой терапии [2] связано с планами создания на Ускорительном комплексе У-70 канала № 26 и специализированной медицинской зоны. Проект выполняется в рамках Государственной программы научно-технологического развития Российской Федерации, и имеет официальное название: «Реконструкция здания 1БВ и здания 8 с целью создания экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем Ускорительном комплексе У-70, г. Протвино, Московская область».

1. Размещение и общая структура канала

Схема расположения канала № 26 и медицинской зоны с двумя процедурными кабинетами (каньонами) в экспериментальном зале 1БВ приведена на рис. 1. Общая часть канала включает в себя начальный участок, а также участок поворота пучка в направлении части зала, ныне (до начала реализации проекта) свободной от оборудования и технологических

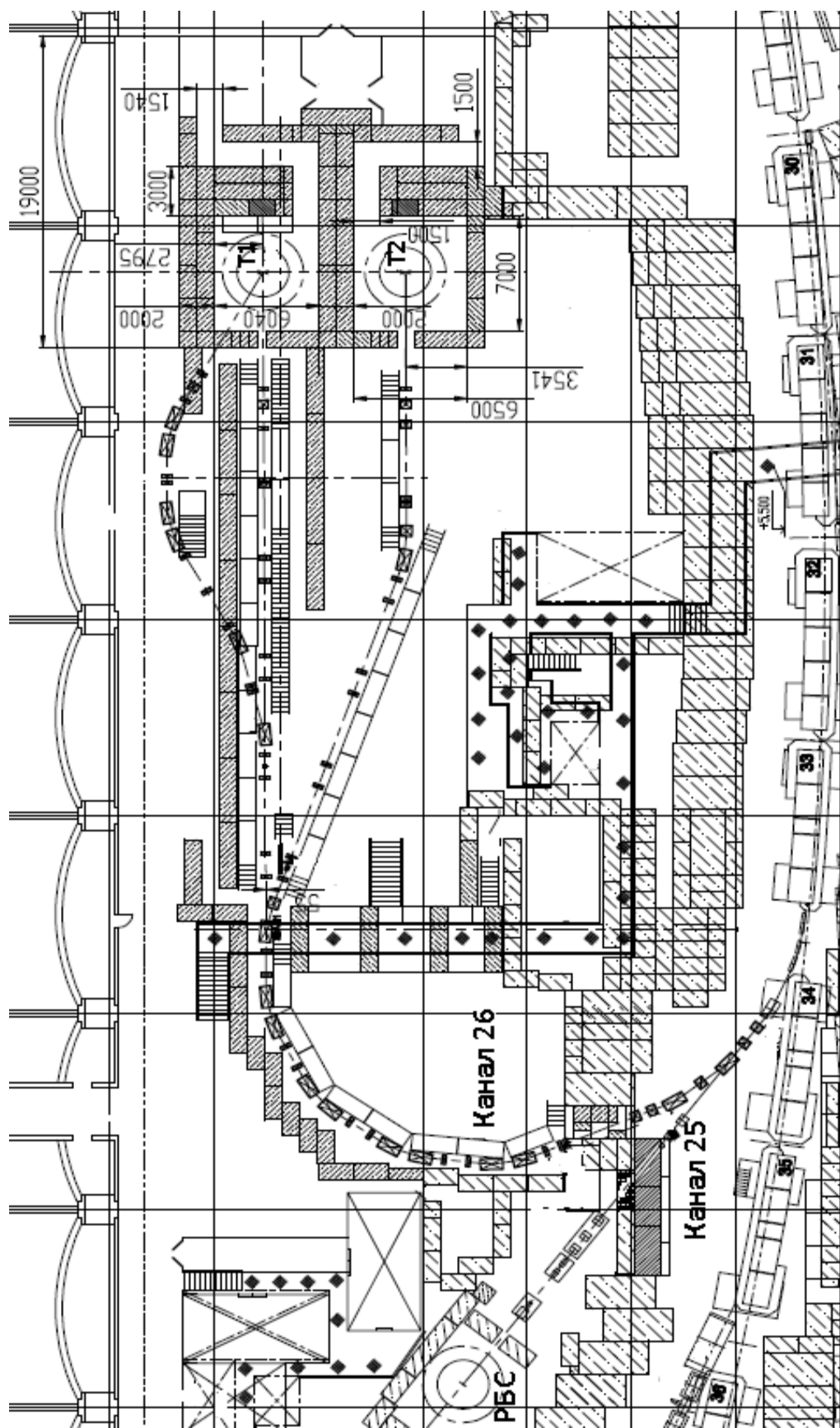


Рис. 1. Схема расположения канала № 26 и медицинской зоны с двумя процедурными кабинетами в экспериментальном зале ИБВ.

систем. Далее пучок может быть направлен поочередно в одну из двух процедурных кабин, причем для одной из них предусмотрена также подача пучка под углом 30° в вертикальной плоскости (на рис. 1 этот вертикальный участок канала изображен повернутым на 90°). При разработке магнитооптической системы канала, получившего порядковый № 26, был реализован модульно-функциональный принцип построения оптики канала с локальным подавлением координатной и угловой дисперсии на каждом участке. Ниже рассматриваются особенности формирования ионного пучка в канале № 26 по ходу его транспортировки от точки вывода из У-70 к облучаемым объектам (мишеням Т1 и Т2) в процедурных кабинках.

2. Оптические схемы участков канала

Начальный участок канала размещается в кольцевом зале ускорителя У-70 (здание 1). После вывода из ускорителя пучок существующими септум-магнитом и тремя отклоняющими магнитами отворачивается от У-70 на суммарный угол 27.6° в направлении канала № 25. Оптическая система начального участка канала № 26 включает в себя пять квадрупольных линз, две из которых являются общими с каналом № 25, а также два отклоняющих магнита, отворачивающих пучок от направления канала № 25 на угол 30° . При этом в направлении канала № 26 обеспечивается полная компенсация дисперсии, а также согласование параметров выведенного пучка с оптической системой участка поворота. В качестве начальных условий для разработки магнитооптической системы канала № 26 использовались параметры пучка с энергией 455 МэВ/нуклон на входе в септум-магнит, а именно: $\beta_x = 0.646 \text{ м}$, $\alpha_x = 0.54$, $\beta_y = 1.686 \text{ м}$, $\alpha_y = 1.54$, $D_x = 4.72 \text{ м}$, $D'_x = 0.24$. Геометрический эмиттанс (деленная на π площадь эквивалентного эллипса на фазовой плоскости) был принят равным $4 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$ по обеим плоскостям, разброс пучка по импульсам $\pm 0.2\%$.

Магнитооптическая система участка поворота пучка, находящегося за пределами защиты кольцевого зала, реализована на основе периодической структуры FO_1DO_2 с набегом фазы $\pi/2$ на периоде длиной 6 м . При этом обеспечивается транспортировка пучка с небольшими (относительно апертуры квадрупольных линз) размерами в обеих поперечных плоскостях, а также полная компенсация дисперсии, создаваемой восемью отклоняющими магнитами, поворачивающими пучок на угол 112° в направлении медицинской зоны. Соотношение длин свободных промежутков $3.5\text{O}_1 \approx \text{O}_2$ выбрано для более оптимального размещения ос-

новного и вспомогательного оборудования канала по сравнению со структурой с эквидистантными линзами $O_1 = O_2 = O$. Графики оптических функций (функций Твисса) начального участка канала и участка поворота пучка приведены на рис. 2. Первые шесть элементов являются общими с каналом № 25. Четырехметровый свободный промежуток между двумя парами квадрупольных линз, согласующими пучок с периодической структурой, обусловлен необходимостью пропускания пучка через защиту кольцевого зала У-70. Середина первой фокусирующей в горизонтальной плоскости линзы после завершения поворота пучка рассматривается далее в качестве начальной по оптике пучка точки для трех последующих участков канала.

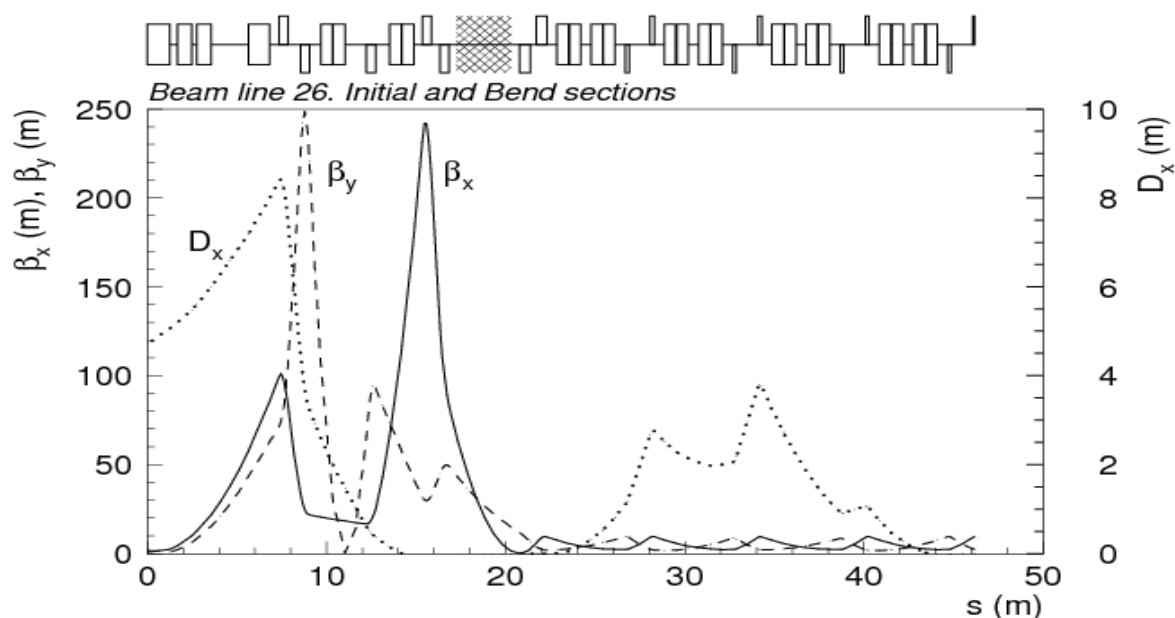


Рис. 2. Оптические функции начального участка канала и участка поворота пучка.

Общим требованием для всех последующих участков канала № 26 является получение на мишенях Т1 и Т2 в процедурных кабинах круглого и точно сфокусированного пучка с $\beta_x = \beta_y = 1$ м и $\alpha_x = \alpha_y = 0$. Кроме этого, перед каждой мишенью должен быть предусмотрен свободный от магнитооптического оборудования промежуток длиной 7 м, необходимый для размещения сканирующих систем и других элементов формирования дозового поля. В представленном здесь варианте оптической системы канала № 26 окончательная фокусировка пучка на мишени на всех участках осуществляется триплетами квадрупольных линз. Для получения на мишенях пучков с требуемыми параметрами задействуются также одна или несколько предшествующих квадрупольных линз.

Прямолинейный горизонтальный участок транспортировки пучка к мишени T1 является непосредственным продолжением периодической структуры участка поворота пучка, что не требует согласования параметров пучка между двумя функциональными участками. Графики оптических функций этого участка канала приведены на рис. 3. Обозначено положение двух магнитов, отклоняющих *при включении* пучок от прямого направления к T1, либо в горизонтальной (первый), либо в вертикальной (второй) плоскости для организации двух смежных участков транспортировки пучка в направлении процедурных кабин. Общая длина канала от передней кромки септум-магнита до мишени T1 составляет 87.6 м.

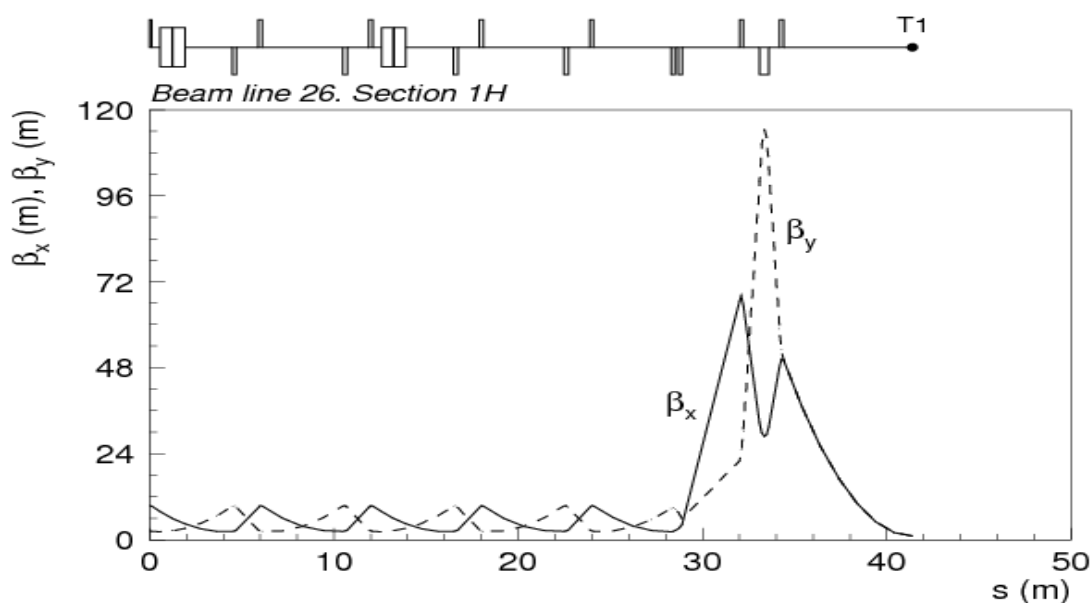


Рис. 3. Оптические функции горизонтального участка транспортировки пучка к мишени T1.

Горизонтальный участок транспортировки пучка к мишени T2 реализован посредством параллельного переноса пучка относительно прямого направления к мишени T1 двумя парами магнитов, отклоняющими пучок в противоположных направлениях. Графики оптических функций этого участка канала приведены на рис. 4. Как и в случае горизонтального участка транспортировки пучка к мишени T1, данный участок по фокусировке пучка является продолжением периодической структуры участка поворота и также не требует согласования параметров пучка между двумя функциональными участками канала. Компенсация дисперсии обеспечивается за счет размещения второй пары магнитов на расстоянии 24 м от первой, что соответствует набегу бетатронной фазы 2π в используемой периодической структуре. Требуемое смещение в поперечном направлении ~ 8 м между мишенями в двух процедурных кабинках достигается при суммарном угле отклонения $\sim 20^\circ$ для каждой пары магнитов, в

которых первый магнит длиной 1.3 м поворачивает пучок на 15° , а второй длиной 0.65 м – на угол $\sim 5^\circ$. Общая длина канала от передней кромки септум-магнита до мишени T2 составляет 89.0 м.

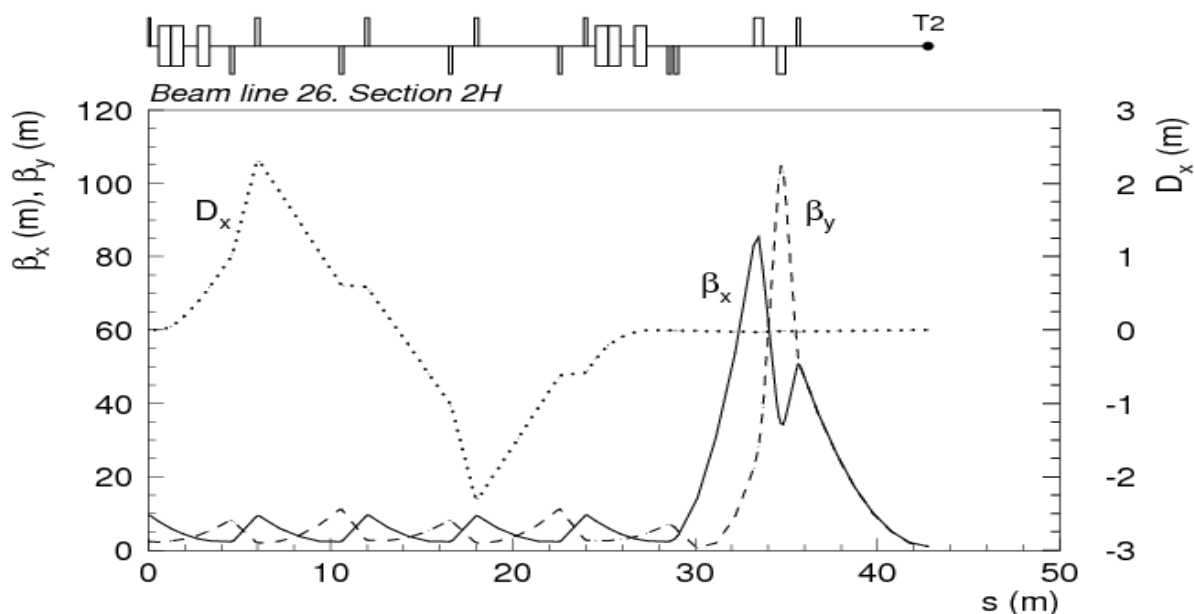


Рис. 4. Оптические функции горизонтального участка транспортировки пучка к мишени T2.

Вертикальный участок транспортировки пучка к мишени T1 обеспечивает подачу пучка в процедурную кабину № 1 под углом 30° в вертикальной плоскости, образуя в точке T1 изоцентр для двух направлений пучка. Возможность организации пучка с большим углом наклона в вертикальной плоскости ограничена доступным для размещения оборудования пространством (по высоте) в экспериментальном зале 1БВ. Графики оптических функций вертикального участка канала приведены на рис. 5. Двумя магнитами пучок отклоняется вверх на угол 30° от прямого направления горизонтального участка транспортировки пучка к мишени T1 и затем – четырьмя магнитами на 60° вниз. Для обеих групп магнитов компенсация дисперсии осуществляется с помощью одной сдвоенной полевой [3] квадрупольной линзой, расположенной на равных расстояниях от центров поворота, а для передачи пучка от первой группы магнитов ко второй используется триплет квадрупольных линз. Отказ от использования периодической структуры на данном участке позволяет существенно сократить его продольные размеры и количество используемых квадрупольных линз. При этом в отличие от горизонтальных участков транспортировки, здесь для частичного согласования пучка между двумя разнородными магнитооптическими системами используется две квадруполь-

ные линзы в периодической структуре, предшествующей началу поворота пучка. Общая длина канала от передней кромки септум-магнита до мишени T1 составляет 90.3 м.

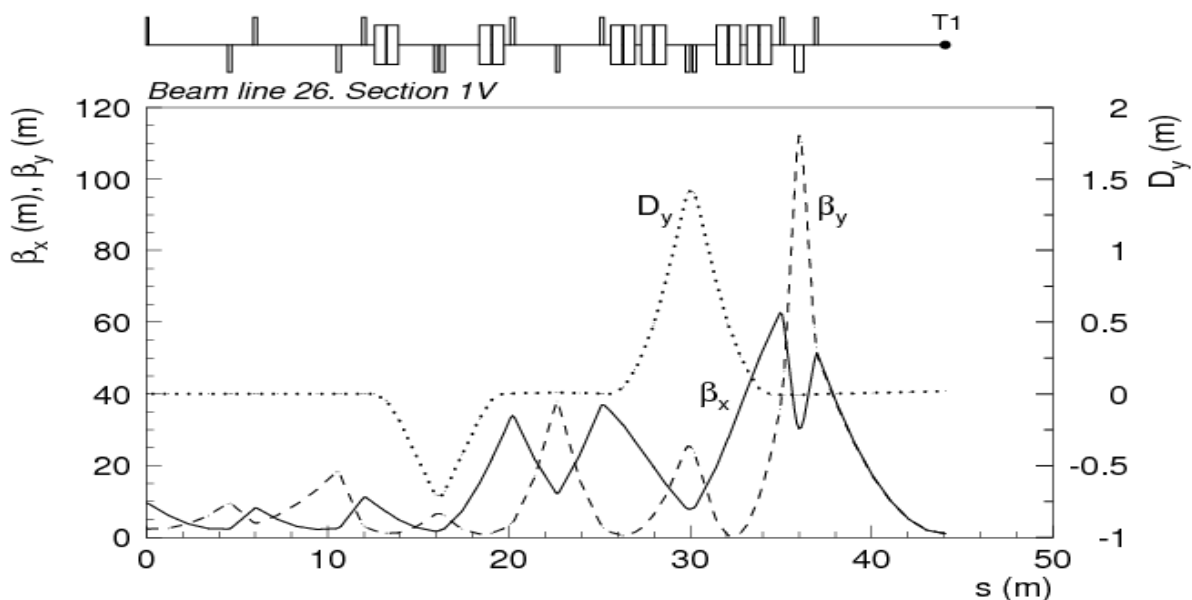


Рис. 5. Оптические функции вертикального участка транспортировки пучка к мишени T1.

3. Фазовые объемы выведенного из У-70 пучка, параметры сформированного на мишенях пучка

Для реализации целей лучевой терапии планируется вывод из У-70 пучков ионов углерода с шестью фиксированными начальными энергиями в диапазоне от 200 до 455 МэВ/нуклон, что обеспечивается применением комплекта из шести различных внутренних мишеней-замедлителей. За счет ионизационных потерь энергии при однократном пересечении мишени импульс частиц скачком уменьшается на относительную величину $\Delta p/p$, одинаковую для всех выводимых энергий. С целью минимизации многократного кулоновского рассеяния (МКР) пучка для изготовления мишеней планируется использовать бериллий. В табл. 1 приведены расчетные параметры предполагаемого комплекта внутренних мишеней, обеспечивающих сброс импульса выводимых частиц на 0.70% [1]. Расчеты проведены по формулам, рекомендованными PDG [4], эффективная энергия ионизации бериллия была принята равной 63.7 эВ [5].

Таблица 1. Основные параметры комплекта внутренних мишеней.

Начальная энергия, МэВ/нуклон	200	250	300	350	400	455
Толщина мишени, мм	1.3	1.8	2.3	2.9	3.5	4.1
Угол МКР (1σ), мрад	1.07	1.04	1.02	0.99	0.97	0.95

Помимо линейного размера источника¹ и рассеяния в материале внутренней мишени, фазовый объем пучка в канале № 26 определяется апертурными ограничениями вакуумной камеры У-70, а также рассеянием частиц в титановой (толщиной 0.05мм) и в майларовой (толщиной 0.2 мм) перегородках, разделяющих вакуумные объемы ускорителя и канала. Результаты траекторных расчетов фазовых объемов выведенного из У-70 ионного пучка, проведенные с целью оценки величины эмиттанса пучка для двух крайних значений его начальной энергии, приведены в табл. 2. В обоих случаях высота внутренней мишени равна 2 мм.

Таблица 2. Эмиттанс пучка в мм·мрад для двух значений начальной энергии пучка.

Начальная энергия	200 МэВ/нуклон		455 МэВ/нуклон	
	xx'	yy'	xx'	yy'
На уровне 2σ	3.7	4.1	1.9	2.5
На уровне 3σ	8.2	9.3	4.2	5.6

Таким образом, для пучка с максимальной энергией, принятая для проработки оптики канала № 26 величина эмиттанса ионного пучка 4 мм·мрад находится в хорошем соответствии с результатами траекторных расчетов фазовых объемов выведенного из У-70 пучка. Что касается пучка с минимальной энергией, то, исходя из результатов этих расчетов, для оценок заполнения пучком апертуры магнитооптических элементов канала можно принять величину эмиттанса равной 8-9 мм·мрад в обеих поперечных плоскостях. В этом случае:

- заполнение пучком апертуры двух квадрупольных линз с диаметром апертуры 100 мм в начальной части канала достигает 90%. Возможных потерь небольшой части пучка можно избежать при использовании в этих линзах эллиптических вакуумных камер;
- для минимизации потерь пучка непосредственно перед мишенями Т1 и Т2 не вызывает сомнения необходимость использования в каждом объективе, фокусирующем пучок на мишень, одной-двух квадрупольных линз с диаметром апертуры 100 мм.

С учетом полученных данных об эмиттансе выведенного пучка и использованных при разработке канала условий фокусировки ($\beta_x = \beta_y = 1$ м, $\alpha_x = \alpha_y = 0$), следует ожидать получения на мишенях пучков с диаметром (на уровне 3σ) ~6 мм для пучка с начальной энергией 200 МэВ/нуклон и ~4.5 мм для пучка с начальной энергией 455МэВ/нуклон. Структура и расчетные режимы квадрупольных линз в последних объективах на всех трех участках ка-

¹ В горизонтальной плоскости линейный размер источника определяется величиной заброса частиц за кромку мишени-замедлителя, равной 1.0-1.5 мм в зависимости от режима вывода [6], тогда как в вертикальной плоскости – собственно размером (высотой) мишени-замедлителя.

нала позволяют в некоторых пределах, *требующих уточнения для каждого объектива*, изменять размеры сформированных пучков, а с учетом применения в этих объективах квадрупольных линз с диаметром апертуры 100мм обеспечивать также более жесткую фокусировку пучка ($\beta_x, \beta_y < 1$ м).

Для получения на мишенях Т1 и Т2 пучков, имеющих более резкие границы за счет удаления «хвостов» распределения, возникающих за счет рассеяния выводимого из У-70 пучка во внутренней мишени и в разделяющих вакуумные объемы ускорителя и канала перегородках, на трассе канала № 26 предполагается использовать систему из четырех коллиматоров (по два в горизонтальной и вертикальной плоскости). Коллиматоры устанавливаются таким образом, чтобы набег фазы между двумя коллиматорами в каждой из пар был равен или близок к $(2n - 1)\pi/2$, где $n \in \mathbb{N}$. Фактически единственным участком для размещения системы коллиматоров, работающей на все три ветки канала, является участок поворота пучка в направлении медицинской зоны, реализованный на основе периодической структуры с набегом фазы $\pi/2$ на периоде структуры (разд. 2). При этом для минимизации потерь интенсивности горизонтальные коллиматоры целесообразно размещать в местах с минимальной дисперсией.

Важной характеристикой сформированного на мишень пучка является стабильность его положения и размеров, которая связана главным образом с нестабильностью магнитного поля в магнитооптических элементах канала вследствие пульсаций тока источников питания. Результаты проведенных оценочных расчетов показывают, что при нестабильности магнитного поля в отклоняющих магнитах² равной $\Delta B/B = 10^{-4}$ нестабильность положения пучка на мишенях в горизонтальной плоскости не превышает 0.2 мм. На мишени Т1 при подаче пучка под углом 30^0 к горизонтальной плоскости нестабильность положения пучка в вертикальной плоскости составляет ~ 0.1 мм. (Приводятся среднеквадратичные отклонения в предположении нормального распределения отклонений величины магнитного поля от расчетных значений). Что касается нестабильности магнитного поля в квадрупольных линзах, то согласно оценочным расчетам величина $\Delta G/G = 10^{-3}$ приводит к увеличению среднеквадратичных размеров пучка на мишенях не более чем на 3–4%.

² За исключением септум-магнита СМ34 и отклоняющих магнитов ОМ1, ОМ2 в головной части канала.

4. Магнитооптическое и вспомогательное оборудование канала

Перечень магнитооптического оборудования, использованного при разработке канала № 26, приведен в табл. 3. Всего для создания канала требуется 20 отклоняющих магнитов и 51 квадрупольная линза. Особенности конструкции 3 отклоняющих магнитов типа М2 и соответствующих вакуумных камер должны позволять использовать их для разделения трассы канала на отдельные участки. Из общего количества квадрупольных линз, 9 с диаметром апертуры 100 мм задействованы на начальном участке канала и в объективах, фокусирующих пучок на мишени. На остальных участках канала применяются квадрупольные линзы с диаметром апертуры 75 мм.

Таблица 3. Основные параметры и количество магнитооптического оборудования канала №26.

Наименование	Параметры	Количество
Квадрупольная линза (Л1)	Длина 0.22 м, апертура \varnothing 75 мм, градиент индукции магнитного поля 19 Тл/м	40
Квадрупольная линза (Л2)	Длина 0.50 м, апертура \varnothing 100 мм, градиент индукции магнитного поля 13 Тл/м	9
Квадрупольная линза (Л3)	Длина 0.60 м, апертура \varnothing 75 мм, градиент индукции магнитного поля 16 Тл/м	2
Отклоняющий магнит (М1)	Длина 0.65 м, рабочая область 90×64 мм ² , индукция магнитного поля 1.4 Тл	2
Отклоняющий магнит (М2)	Длина 1.3 м, рабочая область 90×64 мм ² , индукция магнитного поля 1.4 Тл	18
Корректирующий С-образный магнит (МК)	Длина 0.25 м, рабочая область \varnothing 75 мм, индукция магнитного поля 0.08 Тл	13

Основные параметры коллиматоров: длина каждой из щек 200 мм, ширина в направлении действия коллиматора 65 мм, высота 80 мм. Диапазон перемещения щек относительно продольной оси коллиматора составляет от 30 мм для полностью открытой щеки до 25 мм при перемещении щеки в противоположном направлении. Материал щек – латунь с хромированием поверхности.

Заключение

Создание канала № 26, являющегося одной из составных частей проектируемого экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на базе Ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, позволит отработать и внедрить перспективную методику лечения пучком ионов углерода наиболее сложных (радиорезистентных) онкологических новообразований, а также выработать оптимальные технические и ме-

дицинские требования к типовому ионному центру для разработки и тиражирования в России.

Разработка структуры и оптимизация основных параметров магнитооптической системы канала № 26 проводилась в рамках, ограниченных доступностью площадей и высоты экспериментального зала 1БВ для размещения оборудования самого канала и медицинской зоны с двумя процедурными кабинетами, и с использованием существующей системы медленного вывода ионного пучка из ускорителя У-70.

Авторы выражают искреннюю благодарность С.А. Никитину и Ю.В. Пимбурскому за эскизную конструкторско-технологическую проработку размещения оборудования канала № 26.

Список литературы

- [1] Ю.М. Антипов, Г.И. Бритвич, С.В. Иванов и др. Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70. ПТЭ, 2021, №3, с. 5.
DOI: 10.31857/S0032816221020117
- [2] Центр ионной лучевой терапии на базе ускорительного комплекса У-70. Протвино, 2017.
http://www.ihep.su/files/Journal_2017_Final_2_05_02_2018.pdf
- [3] В.П. Карташев, В.И. Котов. Основы магнитной оптики пучков заряженных частиц. Москва, Энергоатомиздат, 1984, с. 69.
- [4] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022).
Passage of Particles through Matter, Revised August 2021.
- [5] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab1.html>
- [6] С.В. Иванов, О.П. Лебедев. Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70. ПТЭ, 2013, №3, с. 5. DOI: 10.7868/S0032816213020201

Рукопись поступила 20 октября 2022 г.

В.И. Гаркуша и др.

Магнитооптическая система медицинского канала ионов углерода на ускорителе У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 24.10.2022 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1. Уч.– изд.л. 1,3. Тираж 60. Заказ 10. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2022-10,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022
