

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»
Институт физики высоких энергий

ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России
Медицинский радиологический научный центр им. А. Ф. Цыба

ЦЕНТР ИОННОЙ
ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ
НА БАЗЕ
УСКОРИТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА У-70

Протвино, 2017

Аннотация

Проект-предложение «Центр ионной лучевой терапии (ЦИЛТ) на базе ускорительного комплекса У-70» имеет целью создание в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино Московской области) медицинского облучающего центра с пучками ионов углерода с использованием элементов ускорительного комплекса ИФВЭ и имеющихся объектов инфраструктуры.

Это направление работ развивается в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий» уже достаточно давно.

Создание первой очереди ЦИЛТ позволит отработать и внедрить перспективную методику лечения пучком ионов углерода, а также разработать в тесном сотрудничестве медицинского и физического сообществ проект для тиражирования с оптимальными медико-физическими и стоимостными параметрами. Россия войдет в число стран, предоставляющих своим гражданам передовую и эффективную методику лечения онкозаболеваний.

ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» и МРНЦ им. А. Ф. Цыба за прошедшие годы прошли значительный путь, решили практически все ускорительные проблемы и создали предпосылки к переходу к клиническому использованию углеродного пучка. Фактически проект готов к реализации.

Содержание

Введение	2
Цели предлагаемого проекта, имеющиеся предпосылки для его реализации	2
1 Почему ионы углерода?	3
2 Получение пучков ионов углерода в У-70	5
2.1 Особенности ускорения легких ионов в линейном ускорителе И-100	6
2.2 Экспериментальные исследования режима ускорения в И-100 дейтронов.....	7
2.3 Лазерный ионный источник.....	8
2.4 Канал перевода пучка И-100 – У-1,5.....	12
2.5 Ввод пучка в бустер	14
2.6 Ускорение ионов в бустере	16
3 Формирование пучков ионов углерода с выводом в 1БВ.....	18
3.1 Схема медленного вывода пучка легких ионов из ускорителя У-70.....	19
3.2 Аппаратура вывода пучка ионов из У-70	21
3.2.1 Мишень Пиччиони.....	21
3.2.2 Выводные магниты.....	22
3.2.3 Канал транспортировки ионов углерода в медицинскую зону.....	24
3.3 Формирование дозного поля	26
4 Параметры углеродного пучка	29
5 Временный радиобиологический стенд (ВРБС). Создание, цели, задачи, результаты	31
6 Медицинский комплекс ЦИЛТ	33
6.1 Медицинский радиологический научный центр им. А. Ф. Цыба	33
6.2 Этапы проекта ЦИЛТ	34
7 Первая очередь ЦИЛТ. Цели и задачи 1 очереди.....	35
8 Облучение пациентов	37
8.1 Планируемый поток пациентов	37
8.2 Оценка стоимости лечения.....	39
9 График сооружение первой очереди. Оценка необходимых объемов финансирования	40
Заключение	

Введение

Цели предлагаемого проекта, имеющиеся предпосылки для его реализации

Многочисленными исследованиями в отечественных и зарубежных лабораториях доказано, что самыми совершенными методами лучевой терапии онкологических заболеваний являются терапия пучками протонов и особенно ионов углерода.

В крупнейшем российском центре по физике высоких энергий – Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий» (далее ИФВЭ) в городе Протвино Московской области работает комплекс ускорителей с оптимальными параметрами для ускорения протонов и ионов углерода как для фундаментальных исследований, так и для ионной лучевой терапии.

В 2012 году на ускорительном комплексе ИФВЭ У-70 получена новая мода работы, связанная с ионами углерода ультрарелятивистских и промежуточных энергий. Последние имеют прямое отношение к лучевой терапии.

Недалеко от г. Протвино (в 50 км) в городе Обнинск Калужской области успешно работает Медицинский радиологический центр им. А. Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский радиологический центр» (далее – МРНЦ).

МРНЦ – единственный в России медицинский центр, обладающий практическим опытом протонной и нейтронной терапии, что позволяет ему в полном объеме оценивать проблемы, связанные с внедрением ионной лучевой терапии. Под руководством специалистов МРНЦ были проведены радиобиологические исследования и выработка методик лечения первых пациентов на действующих сегодня протонных лучевых установках. МРНЦ имеет развитую исследовательскую и лечебную радиологическую базу, ведет лечение пациентов лучевыми (гамма, электроны, протоны, нейтроны, фармпрепараты), химиотерапевтическими и хирургическими методами

На базе комплекса ускорителей в ИФВЭ и клинической базы МРНЦ может быть создан Центр ионной лучевой терапии (ЦИЛТ).

В ИФВЭ и в МРНЦ имеются необходимые высококвалифицированные специалисты для работы в Центре ионной лучевой терапии. ИФВЭ обладает также требуемой для создания ЦИЛТ инфраструктурой.

Города Протвино и Обнинск удобно расположены в центральном регионе России, вблизи Москвы, имеют развитую необходимую инфраструктуру.

Целью настоящего Проекта является создание первого в России экспериментально клинического центра с пучками ионов углерода.

1 Почему ионы углерода?

Лучевой терапии уже более 100 лет, это – один из важнейших методов лечения рака. За столетие была проделана громадная работа по совершенствованию методики лучевой терапии. Впервые предложение по использованию пучков ускоренных протонов или других более тяжелых ядер для лучевой терапии было сделано в 1946 году известным американским ученым Робертом Вильсоном. Р. Вильсон отметил, что ускоренные протоны и ядра имеют значительные преимущества в сравнении с гамма излучением.

В 1952 году в США было начато лечение первых онкологических пациентов на пучках ядер гелия и дейтерия. В дальнейшем интерес к пучковой лучевой терапии существенно расширился после появления многочисленных протонных установок. Следует отметить, что на первоначальном этапе освоения протонной лучевой терапии Россия (СССР) была на передовых позициях.

После того, как было понято, что биология воздействия протонов на живое вещество аналогична действию гамма-облучения, внимание передовых экспериментальных исследований было связано с тяжёлыми ионами, оказывающими более сильное биологическое воздействие, что связано с их высокими линейными ионизационными потерями.

Ионы движутся в веществе по практически прямолинейным траекториям и останавливаются на определенной глубине. Как для протонных, так и для ионных пучков важным обстоятельством является то, что выделение энергии растёт с глубиной, достигая Брегговского максимума, а затем резко уменьшается на расстояниях порядка миллиметра.

Однако не это обстоятельство является решающим в применении пучков легких ионов. Дело в том, что при облучении электронными, протонными и гамма-пучками срабатывает только один косвенный химический механизм воздействия излучения на живую ткань. Этот химический механизм успешно срабатывает лишь тогда, когда в облучаемых клетках в должном количестве имеется кислород. Если

кислорода в клетках опухоли недостаточно то химический механизм воздействия становится неэффективным, немногочисленные повреждения ДНК, нанесенные свободными радикалами в разных местах, залечиваются самой раковой клеткой, эффективность радиотерапевтического лечения заметно падает.

В этом случае говорят, что опухоль резистентна. К сожалению, это случается достаточно часто, приблизительно в 20÷30% случаев.

Вот в таких случаях и требуется облучение более сильно ионизирующими частицами, а именно – ионами углерода. Химический (косвенный) механизм воздействия для них тоже работает, но самой главной замечательной особенностью такого облучения является то, что на последних 3-4 см пробега, в Брегговском пике, такие частицы повреждают молекулу ДНК новым дополнительным способом.

Плотность ионизации становится столь высокой, что молекула ДНК буквально перерезается на несколько частей и теряет жизнеспособность. Для такого прямого вида лучевого воздействия плотно ионизирующей частицей уже не имеет значения, резистентна опухоль или нет (Рис. 1).

В результате пучок ионов углерода за несколько сеансов успешно останавливает дальнейший рост раковой опухоли и приводит в 80÷90% случаев к успешному излечению.

В 1975 году после запуска в Лоуренсовской лаборатории (LBL, USA) ускорителя BEVALAC, начались интенсивные исследования клинического применения пучков различных ионов.

После первых успешных исследований, выполненных в Лоуренсовской лаборатории, правительство Японии в 1984 году начало сооружение первой в мире ускорительной лаборатории, ориентированной на медицинское применение пучков легких ионов.

Сооружение японского медицинского ускорителя тяжелых ионов (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC)) было завершено в 1993 году, а кли-

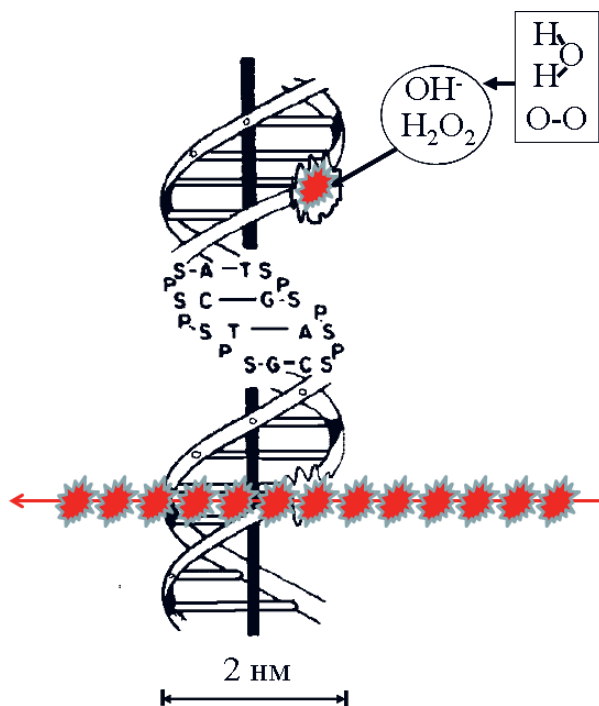


Рис. 1. Механизмы воздействия излучений на ДНК опухоли

Косвенный, через химически активные вещества

Работает для всех излучений (ϵ , γ , ρ , ядра)

Единственный механизм для

$\Delta E/\Delta x < 300$ МэВ/гр·см²

Зависит от химического состояния мишени

(прежде всего, от наличия кислорода)

Прямой, для $\Delta E/\Delta x > 300$ МэВ/гр·см²

Работает в пучках нейтронов (ядра отдачи) и ядер

Отсутствует зависимость от химического состояния

мишени

нические исследования на пучках ионов углерода были начаты в этом центре в 1994 году.

В 1997 году в Германии на ускорителе в Дармштадте (GSI) были начаты первые европейские исследования на пучках ионов углерода.

В результате многочисленных исследований было экспериментально доказано, что пучки ионов углерода более эффективны, чем γ -пучки или пучки протонов.

Это происходит потому, что:

- Пучок углерода меньше рассеивается в веществе. Рассеяние на глубине 25 см для углерода - 2 мм, вместо 8 мм для протонов.
- У углеродного пучка в конце пробега высокая относительная биологическая эффективность (ОБЭ). ОБЭ 2,5÷3 (углерод) вместо ОБЭ 1,1 (протоны).
- Углеродный пучок эффективно воздействует на радиорезистентные опухоли.

- Образующиеся в веществе радиоактивные изотопы углерода можно использовать для верификации облучения.

- На углеродном пучке более короткий курс лечения (до одной фракции).

К настоящему времени уже около 20 000 больных прошли курсы лечения на пучках ионов углерода (Япония (5 центров), Германия (2 центра), Италия (1 центр), Китай (2 центра)). На практике стало реальностью, что излечиваются до 90% онкологических больных.

Среднее количество фракций на углеродном пучке в ≈ 3 раза меньше, чем на протонном. Практически доказано, что полноценный курс лечения рака легкого на пучках углерода может состоять даже из одной фракции.

Уже в настоящее время в Японии соотношение онкологических больных, прошедших курс лечения на пучках протонов и ионов углерода составляет 1/0,7.

Это означает, что лечение на пучках ионов углерода может оказаться в перспективе не только более эффективным, чем в протонных и гамма пучках, но и более доступным.

2 Получение пучков ионов углерода в У-70



Рис. 2.1. Вид на ускорительный комплекс ГНЦ ИФВЭ сверху

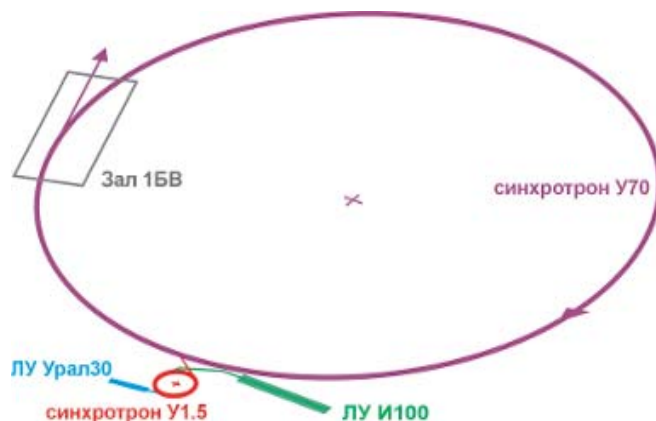


Рис. 2.2. Схема взаимного расположения ускорителей ИФВЭ

Ускорительный комплекс ГНЦ ИФВЭ (Рис. 2.1, Рис. 2.2) включает: протонный линейный ускоритель «Урал-30» на энергию 30 МэВ; протонный линейный ускоритель И-100 на энергию 100 МэВ; быстроциклирующий протонный синхротрон-бустер У-1,5; и протонный синхротрон У-70 на энергию 70 ГэВ.

Энергии, интенсивности и способы вывода пучков протонов и ионов углерода для лучевой терапии определяются медицинскими параметрами, которые определяют необходимые технические требования к ускорительному комплексу (таблица 2.1).

Основные технические требования к центру ионной лучевой терапии

Требования	Ионы углерода C^{+6}
Максимальная кинетическая энергия	5400 МэВ
Максимальная магнитная жесткость [BR]	5400 МэВ
Средняя интенсивность пучка на мишени	$2 \times 10^8 \text{ сек}^{-1}$
Вывод пучка из ускорителя	Медленный вывод

Таблица 2.1

Система инъекции протонов в протонный синхротрон У-70 включает протонный линейный ускоритель «Урал-30» и быстроциклирующий протонный синхротрон – бустер У-1,5 (Рис. 2.3).



Рис. 2.3. Быстроциклирующий протонный синхротрон – У-1,5 (Бустер)

Основные параметры синхротрона У-1,5

Периметр орбиты	99,16 м
Магнитная жесткость	0,8-6,8 Т·м
Диапазон энергии ускоренных протонов	200-1300 МэВ
Максимальная частота работы	16,6 Гц
Интенсивность протонов в импульсе	$3 \cdot 10^{11}$
Вакуум	10^{-7} Торр

Таблица 2.2

Как видно из таблицы 2.2, в конце цикла ускорения магнитная система бустера удерживает протоны, магнитная жесткость которых практически совпадает с требуемой для ускорения ионов углерода C+6 до энергии 5400 МэВ.

Таким образом, магнитная система существующего в ИФВЭ ускорителя-бустера У-1,5 хорошо соответствует требуемой для ионной C+6 терапии.

Хороший вакуум и высокий темп ускорения в бустере являются положительными факторами при ускорении многозарядных ионов.

Синхротрон У-1,5 выдает пучок в виде коротких импульсов, а для современной ионной лучевой терапии требуется постепенный (медленный) вывод

пучка. Именно для осуществления такого вывода нужен большой ускоритель У-70, который используется в этом медицинском варианте уже не как ускоритель, а как экономичный накопитель.

Выведенные из бустера пучки протонов или ионов углерода должны быть накоплены в кольцевом ускорителе У-70, а затем медленно выведены в экспериментальный зал 1БВ, в котором планируется создание нескольких экспериментальных зон: для радиобиологических исследований и медицинской зоны с несколькими медицинскими помещениями для облучения пациентов.

Перевести протонный линейный ускоритель ЛУ-30 на ускорение ионов углерода нельзя, поэтому был разработан и реализован вариант инъекции ионов углерода C+6 в синхротрон У-1,5 из линейного ускорителя И-100.

Последовательно все элементы модифицированного ускорительного комплекса ИФВЭ включают:

- лазерный источник ионов углерода;
- линейный ускоритель И-100,
- канал перевода пучка ионов из И-100 в синхротрон У-1,5,
- синхротрон У-1,5,
- канал перевода пучка в синхротрон У-70, работающий в режиме накопителя;
- систему медленного вывода пучка из У-70 в процедурные кабины.

2.1 Особенности ускорения легких ионов в линейном ускорителе И-100

Линейный ускоритель типа Альвареца – И-100 (Рис. 2.1.1) был спроектирован и использовался с 1967 года вплоть до 2000 года для ускорения протонов.

При переходе от ускорения протонов ($Z/A=1$) к ионам с $Z/A \leq 0,5$ невозможно сохранить тот же темп ускорения путем более чем двукратного увеличения ускоряющего поля из-за ограничений как по мощности, так и по пробоям.

Ускорение ионов с $Z/A \leq 0,5$ можно реализовать, лишь снизив темп ускорения в 2 раза. В этом случае при прохождении частицей ячейки ускоряющей структуры фаза ускоряющего поля изменяется не на 2 п (как для протонов), а на 4 п (ускорение на кратности $n=2$).

Из-за уменьшения фактора пролетного времени эффективность ускорения при этом падает.

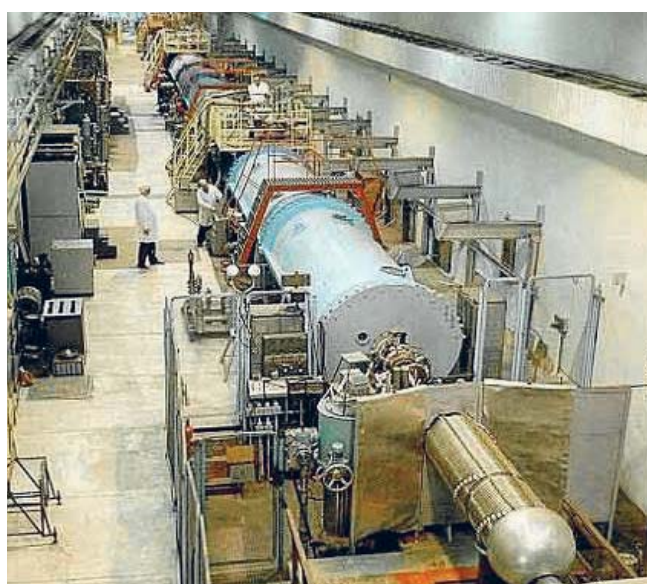


Рис 2.1.1. Линейный ускоритель И-100

В том случае, когда апертура трубки дрейфа значительно меньше её длины, что справедливо в И-100 всюду кроме начальной части, фактор пролетного времени во всех зазорах снижается в фиксированное число раз (для И-100 на кратности $n=2$ он составляет 0,707 от «стандартного» случая с кратностью $n=1$).

По расчетам при неизменной фазе ускорения, напряжения U_i в II-ом и III-ем резонаторах должны быть изменены при ускорении дейтронов и различных ионов углерода так, как указано в таблице 2.1.1, где U_p -номинальное значение электрического поля при ускорении протонов.

ИОН	d, C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}
U_i/U_p	0,707	0,849	1,06

Таблица 2.2

Из таблицы 2.1.1 видно, что ускорение ионов углерода с $Z=5,6$ или дейтронов в II-ом и III-ем резонаторах возможно даже при пониженном напряжении, а иона углерода с $Z=4$ при допустимом форсировании. Однако, в начальной части ускорителя (первые ≈ 10 трубок дрейфа I-го резонатора), там где апертуры трубок дрейфа сравнимы с длиной трубок, фактор пролетного времени становится заметно меньшим.

«Провисание» электрического поля внутри трубок дрейфа на величину порядка радиуса апертуры значительно уменьшает фактор пролетного времени на оси ускорителя, делает его существенно зависящим от радиальной координаты, а также непропорционально изменяет его вдоль начальной части ускорителя.

2.2 Экспериментальные исследования режима ускорения в И-100 дейтронов

Для изучения возможности ускорения ионов с $Z/A=0,5$ был использован штатный ионный плазменный источник форинжектора И-100, в котором вместо водорода использовался дейтерий. Изучив процесс ускорения в широком интервале изменения параметров ускорителя, были обнаружены области устойчивого и хорошо воспроизводимого ускорения дейтронов.

Однако найденный характер поведения ускорителя оказался «нестандартным».

В стандартном режиме энергия инжектируемых протонов равняется 700 кВ, т. к. масса дейтрона в ≈ 2 раза больше протонной, а скорость дейтронов на второй кратности должна быть в 2 раза меньше, то ожидаемое оптимальное напряжение для инжектируемых дейтронов должно быть 350 кВ.

Экспериментально полученные зависимости тока ускоренных дейтронов от напряжения при двух настройках ускорителя И-100 показаны на рисунке 2.2.1 А, В.

Как видно из рис. 2.2.1, при напряжении инжекции 350 кВ практически никакого захвата нет. В тоже время, при больших напряжениях инжекции четко выявляются многочисленные области захвата в ускорения.

Как видно из рис. 2.2.1 А зависимость ускоренного тока дейтронов во всем доступном диапазоне напряжений форинжектора представляет много-

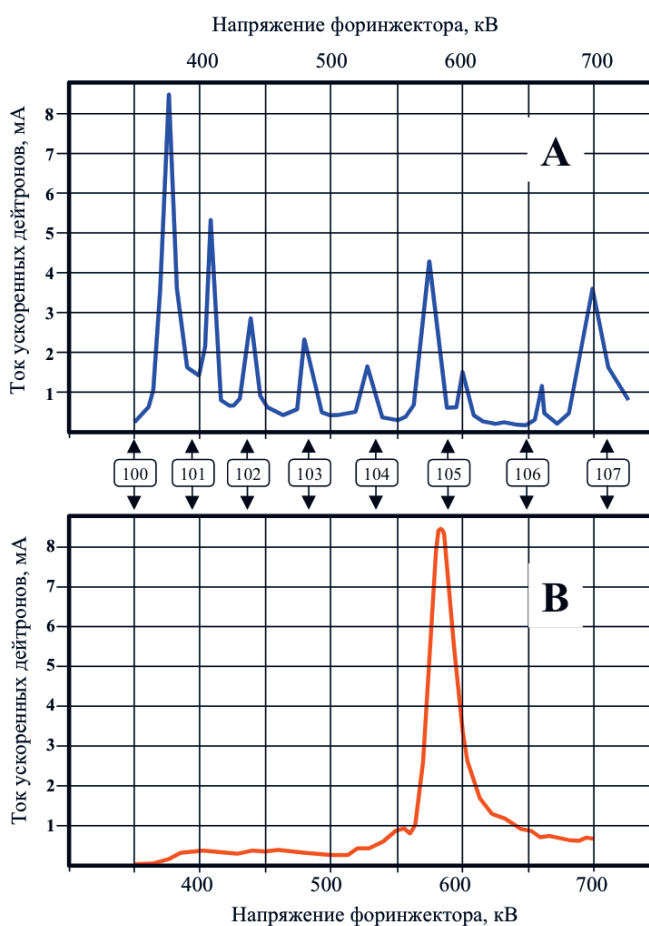


Рисунок 2.2.1. Зависимость тока ускоренных дейтронов от напряжения форинжектора: А режимы ВЧ и банчера оптимальны для пика Уфор=380кВ, В после оптимизации режимов для пика 580кВ

численные узкие пики, соответствующие тому, что инжектируемая частица, «проскальзывает» без ускорения начальные ускоряющие промежутки, а затем «захватывается» в ускорение уже внутри первого резонатора.

Сравнение 2.2.1 А и В показывает, что относительная величина пиков зависит от настройки ускорителя (режима входной оптики форинжектора, режима банчера, уровня поля в резона-

2.3 Лазерный ионный источник

Из вышеизложенного следует, что для ускорения в И-100 ионов углерода ионный источник должен создавать в достаточном количестве ионы в зарядовом состоянии C_{12}^{+5} или C_{12}^{+6} . Так как ионизационные потенциалы для этих состояний соответственно равны 393 эВ и 490 эВ, то для их эффективного образования требуется плазма с температурой в диапазоне $500 \div 1000$ эВ.

Такая высокотемпературная плазма не может быть получена в ионном источнике с дуговым разрядом, и поэтому был исследован вариант лазерного ионного источника.

В качестве источника лазерного излучения на первом этапе мы использовали изготовленный в ГНЦ ИФВЭ газовый CO_2 лазер (часть элементов лазера была любезно предоставлена ЛВЭ ОИЯИ) с длиной волны ≈ 10 мкм и выходной энергией ~ 3 Дж.

Лазер работал на смеси газов CO_2 , N_2 и He в пропорции 1:1:8 с давлением 0,9 атм. Оптический резонатор лазера образован плоским латунным зеркалом и выходным окном из клиновидной Ge пластины. Апертура выходного излучения 18×30 мм², угловая расходимость ~ 1 мрад.

Мишенный блок состоял из оптической системы, фокусирующей лазерное излучение на графитовую мишень; мишенного механизма, позволяющего менять облучаемую точку мишени, и расширительного дрейфового промежутка. Лазерное излучение фокусировалось на графитовой мишени сферическим молибденовым зеркалом с фокусным расстоянием 120 мм, под углом $\sim 10^\circ$ к направлению расширительного дрейфового промежутка.

Для исследования характеристик лазерного источника использовалась методика магнитного масс-спектрометра.

После изучения особенностей ускорения дейтронов, а также исследований и оптимизации лазерно-

торах, уровня фокусирующего поля в трубках дрейфа).

Максимальный выходной ток ускоренных дейтронов составил ≈ 10 мА.

Полученные данные по ускорению дейтронов были использованы для масштабных оценок режимов ускорения ионов углерода разных зарядностей.

Проведенный анализ показал, что в И-100 возможно ускорение лишь ионов C_{12}^{+5} и C_{12}^{+6} .

го ионного источника, в 2001 году удалось получить устойчивое ускорение 5-зарядных ионов углерода в ускорителе И-100.

Оптимальные значения напряжения инжекции и уровень ускоряющего ВЧ поля в первом резонаторе оказались близкими к расчетным масштабным оценкам. Максимальный ток ионов C^{+5} на выходе ускорителя был равен $\approx 1,6$ мА.

Осциллограмма первого успешного ускорения в И-100 ионов C^{+5} показана на Рис 2.3.1.

Для повышения надежности и улучшения эксплуатационных характеристик лазерного ионного источника было принято решение использовать современный промышленный образец.

В 2008 году на ускорителе И-100 была начата работа по экспериментальному изучению возможности использования промышленного лазера типа InfraLight SP, разработанного и изготовленного в Центре физического приборостроения Института

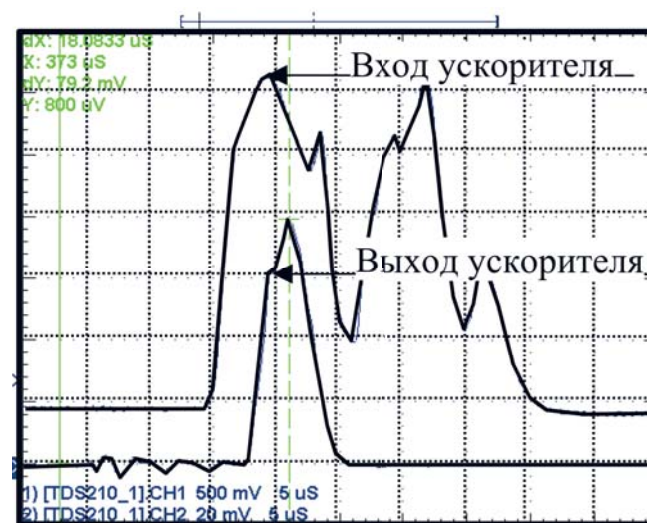


Рис. 2.3.1 Осциллограммы токовых сигналов на входе в I резонатор И-100 и на выходе ускорителя в 2001 году. Ток ионов C^{+5} на выходе ускорителя И-100 был равен $\approx 1,6$ мА.



Рис 2.3.2. Одномодульный вариант лазера InfraLight SP с энергией до 2 Дж, 2008 год

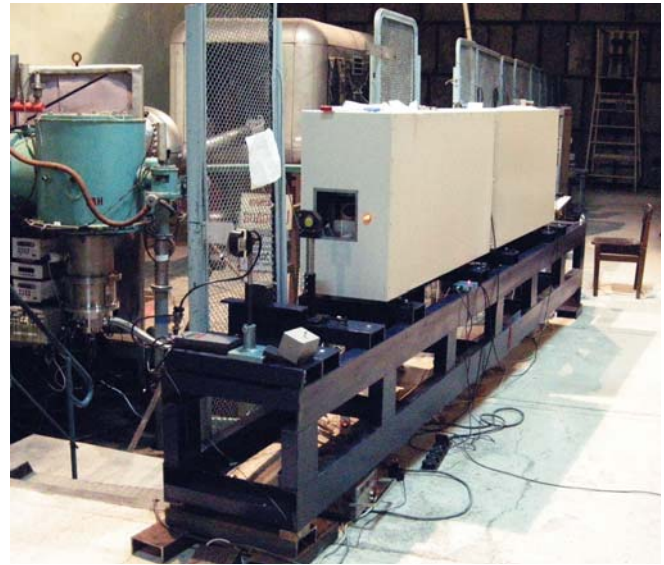


Рис 2.3.3 Общий вид двух лазерных модулей, смонтированных в зале И-100 в апреле 2010 года.

общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ЦФП ИОФ РАН, г. Троицк).

Испытания, выполненные в 2008 году с двумя типами лазерных модулей InfraLight SP, обладающих выходной энергией около 1 Дж и 2 Дж (Рис 2.3.2) доказали необходимость заметного увеличения выходной энергии лазера с одновременным уменьшением угловой расходимости.

Добиться этого в одномодульной конструкции было невозможно, поэтому в 2009 году было решено перейти к двухмодульному варианту Рис 2.3.3.

Параметры смонтированного в 2010 году двухмодульного варианта лазера InfraLight SP показаны в Таблице 2.3.1.

Из Таблицы 2.3.1 видно, что если в первом одномодульном варианте выходная энергия лазера InfraLight SP заметно уступала имеющемуся в ИФВЭ лазеру (≈ 3 Дж), то в варианте 2010 года при максимальных возможных напряжениях на тиратроне она была уже весьма близка к 5 Дж.

Для измерения временного поведения лазерного импульса использовался изготовленный в Физико-техническом институте им. Иоффе DRAG детектор.

Измеренный с помощью DRAG детектора временной импульс лазера показан на Рис. 2.3.4.

Видно, что время основной лазерной вспышки (≤ 100 нсек) близко к предельно малым для данного типа лазеров и обычно присутствующая долговременная составляющая невелика.

Общий вид установки по испытанию лазера на масс-спектрометрическом стенде изготовлен-

Количество лазерных модулей	2
Зазор между электродами	15 мм
Электроды	латунные эксимерные широкие
Выходной пучок лазера	по центру апертуры
Резонатор	глухое медное зеркало $R=5$ м с золотым покрытием, одно проходное окно под углом Брюстера из ZnSe и выходная пластина из ZnSe. Полная длина резонатора 325 см
Тиратрон	Два ТГИ-1 1000/25
Газовая смесь	3:1:6 \leftrightarrow CO ₂ :N ₂ :He
Частота повторения (макс.)	2 Гц
Измеритель энергии	OPHIR (PE-50-HD-SH)
Рабочее давление в камере	870 мБар
Максимальная энергия при зарядном напряжении 27 кВ	5 Дж
Временная регистрация светового импульса	DRAG детектор

Таблица 2.3.1

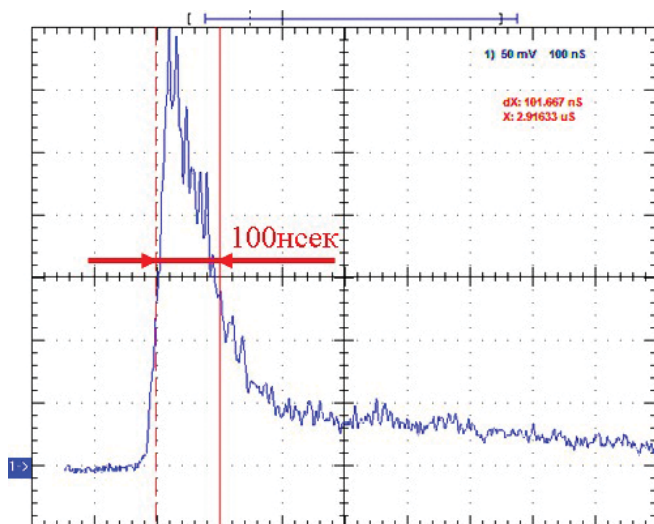


Рис. 2.3.4. Временной импульс лазера, измеренный с помощью DRAG детектора

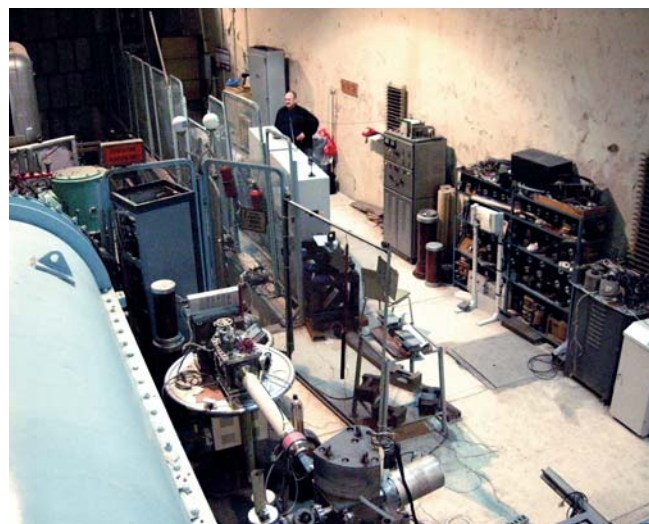


Рис. 2.3.5. Общий вид установки по испытанию лазера на масс-спектрометрическом стенде

ном в ГНЦ ИФВЭ на ускорителе И-100 показан на Рис. 2.3.5.

Установка состояла из лазера, поворотного зеркала, направляющего лазерное излучение в мишен-

ный блок с графитовой мишенью и масс-спектрометра с магнитным анализатором, позволяющим разделять различные зарядовые состояния ионов углерода.

Мишенный блок состоял из вакуумного объема, оптической системы, фокусирующей лазерное излучение на мишень; мишенного механизма, позволяющего менять облучаемую точку мишени, и расширительного дрейфового промежутка. Плазма, вылетающая в основном в направлении нормали к поверхности мишени, пропусклась в отверстие в сферическом Мо зеркале и далее попадала в дрейфовый промежуток.

После дрейфового промежутка плазма попадала в плазменный диод, где происходило разделение положительных ионов и электронов, а далее пучок положительных ионов, ускоренных напряжением 15 кВ, анализировался магнитом.

Ток ионного пучка измерялся с помощью стоящего после магнита цилиндра Фарадея. Во время измерений вакуум в установке перед лазерной вспышкой находился в диапазоне $2 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Схема мишенного блока вместе с масс-спектрометром показана на Рис. 2.3.6

Масс-спектрометр лазерного стенда позволял четко разделять все зарядовые состояния ионов углерода.

На Рис. 2.3.7 показано реальное разделение в масс-спектрометре пяти зарядовых состояний C^{+6} , C^{+5} , C^{+4} , C^{+3} , C^{+2} полученное в ходе проведенных испытаний.

Так как системы ускорителя И-100 позволяют надежно ускорять ионы с $Z \geq 5$, а сигнал ионов с $Z=6$

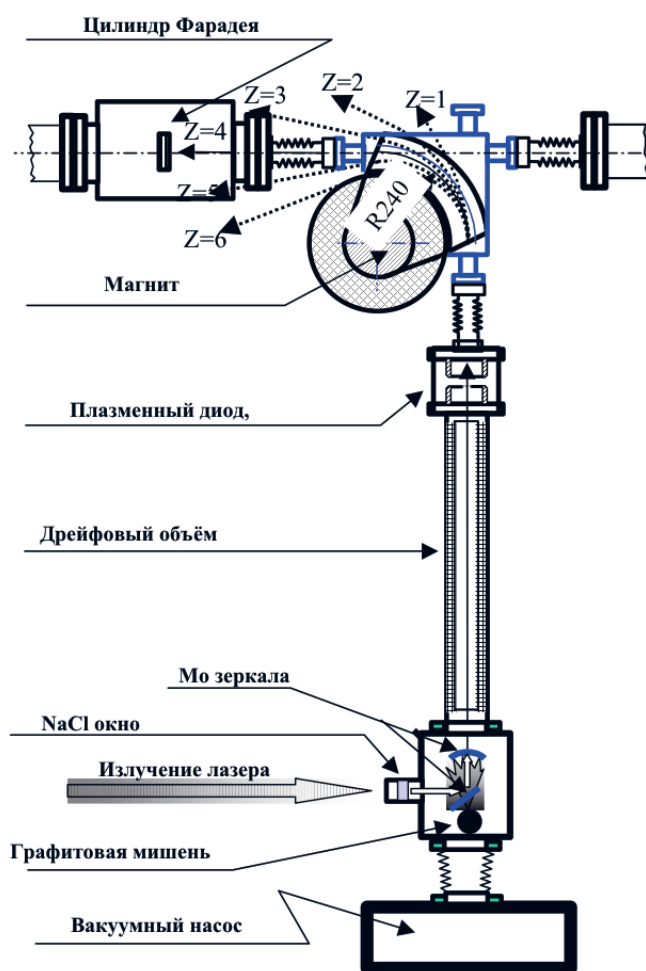


Рис. 2.3.6. Схема мишенного блока, вместе с масс-спектрометром

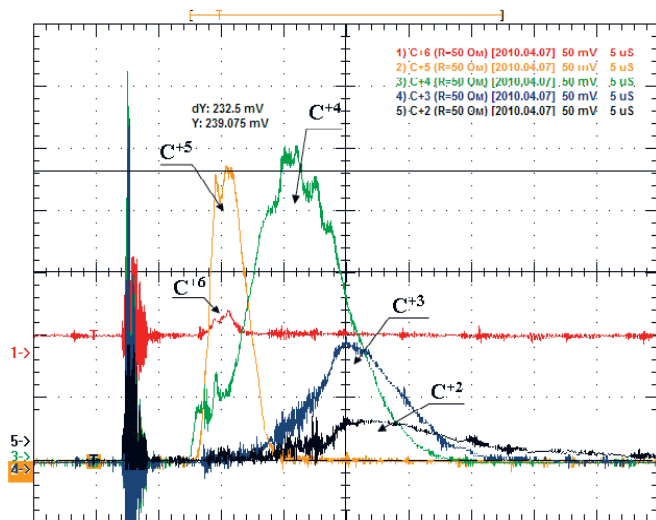


Рис. 2.3.7. Разделение в масс-спектраторе пяти зарядовых состояний C^{+6} , C^{+5} , C^{+4} , C^{+3} , C^{+2} полученное в ходе проведенных испытаний

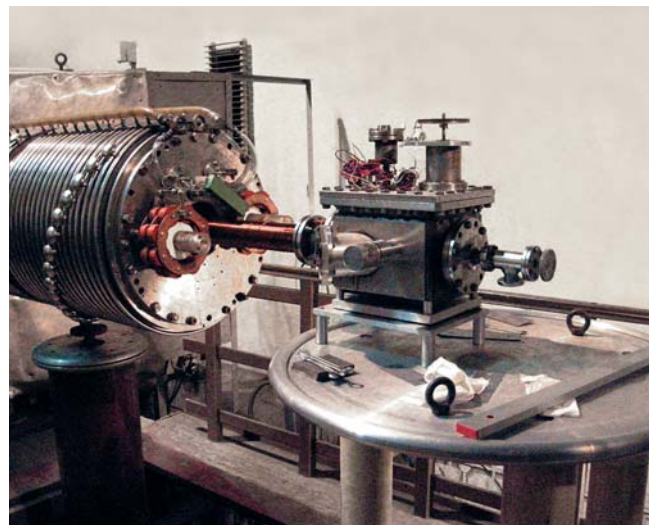


Рис. 2.3.8 Завершающая стадии сборки нового лазерного источника на ускоряющей трубке форинжектора И-100

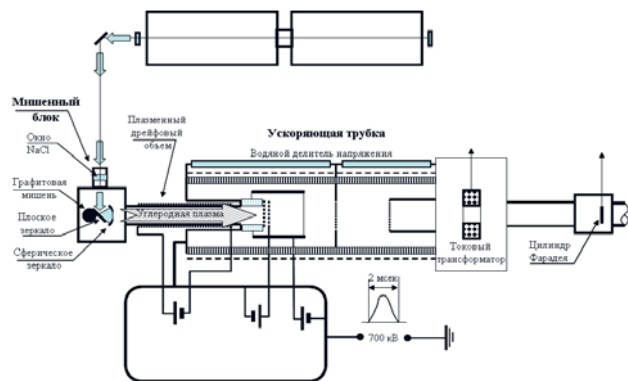


Рис. 2.3.9 Схема нового лазерного источника и начальной части ускорителя И-100

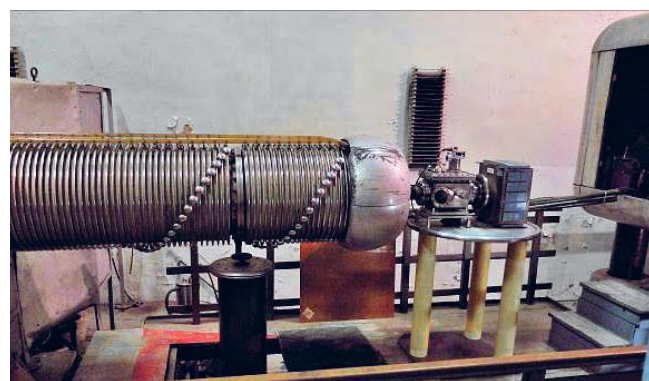


Рис. 2.3.10 Вид на ускоряющую трубку и мишеньный блок (2016 год)

мал, то основное внимание в проведенных измерениях было связано с изучением процесса образования ионов C^{+5} .

В ходе испытаний было показано, что нормальный рабочий режим образования ионов C^{+5} устанавливается через ≈ 300 срабатываний лазера. Вероятно, это время формирования необходимого «кратера» в графитовой мишени.

После этого ток ионов C^{+5} медленно меняется на протяжении почти 5000 срабатываний. Это означает, что при рабочих условиях ускорения ионов в И-100 переходить на новую точку в графитовой мишени придется через 5÷6 часов, что вполне приемлемо.

Монтаж лазерного источника на форинжекторе линейного ускорителя И-100 был выполнен в мае-июне 2010 года. Завершающая стадия сборки нового лазерного источника на ускоряющей трубке форинжектора И-100 показаны на Рис. 2.3.8.

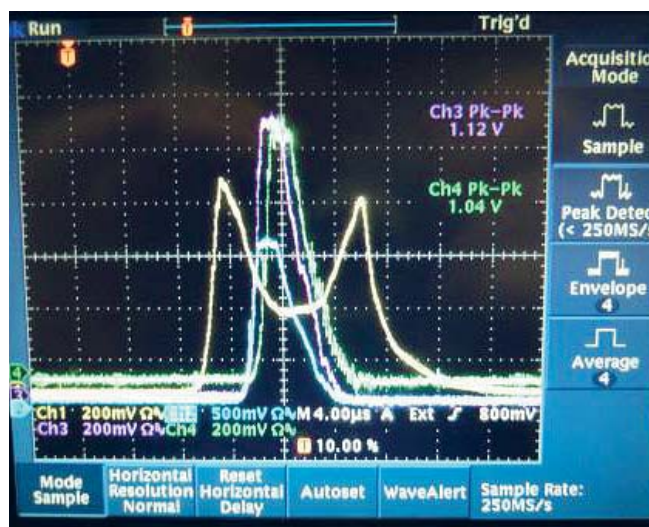


Рис 2.3.11. Осциллограмма сигналов пучка ионов углерода на входе И-100 (1 канал, желтый луч), выходе И-100 (3 канал, фиолетовый луч) и в конце канала перевода в У1,5 (4 канал, зеленый луч). Амплитуда тока ионов углерода на выходе И-100 превышает 20 мА

Схема нового лазерного источника и начальной части ускорителя И-100 показана на Рис. 2.3.9.

Окончательный вид мишенного блока, смонтированного на входе ускоряющей трубки форинжектора И-100, показан на Рис. 2.3.10.

После выбора окончательного варианта лазерного ионного источника и оптимизации режимов ускоряющей системы И-100 удалось увеличить максимальную амплитуду тока ускоренного пучка ядер углерода до 22 мА, а средние значения до уровня 17±18 мА (Смотри Рис. 2.3.11).

Таким образом, в результате многолетних экспериментальных работ на линейном ускорителе И-100 были найдены устойчивые режимы ускорения ионов дейтерия и углерода. Окончательный вариант лазерного ионного источника позволил получить на выходе И-100 ток ионов углерода на уровне ≈20 мА.

2.4 Канал перевода пучка из И-100 в У-1,5

В 2001 году в НИИЭФА совместно с ИФВЭ было начато проектирование канала перевода пучка из И-100 в бустер, обеспечивающего транспортировку пучков протонов, дейтронов и ядер углерода от линейного ускорителя И-100 до вводного септум-магнита, расположенного в 9-ом прямолинейном промежутке бустера.

Как уже упоминалось выше ускоритель И-100 ускоряет ионы C^{+5} . На выходе И-100 был установлен бокс с тонкой (3 микрона майлара) перезарядной мишенью. В этой мишени ионы C^{+5} с эффективностью близкой к 100% «обдираются» до C^{+6} , которые и транспортируются затем по каналу перевода.

Взаимное расположение бустера, линейных ускорителей Урал-30 и И-100, а также каналов ввода пучка в бустер и перевода пучка из бустера в ускоритель У-70 показана на Рис. 2.4.1.

Канал перевода пучка из И-100 в бустер (У-1,5) (IV на рис. 8) имеет длину 43 метра и пересекает две стены в фундаменте зданий №1А и №3Н. В состав магнитооптического оборудования канала входят 4 поворотных магнита, 8 квадрупольных линз, 2 комбинированных корректора (горизонтальный/вертикальный), диагностическое оборудование.

Расчетные огибающие и дисперсия канала перевода пучка из И100 в У-1,5 показаны на Рис 2.4.2.

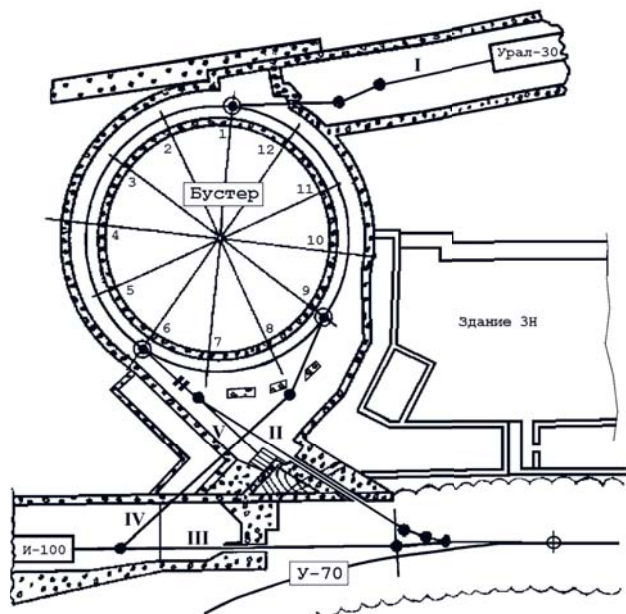


Рис. 2.4.1. Схема взаимного расположения бустера, линейных ускорителей Урал-30 и И-100, а также каналов перевода пучков в бустер и вывода пучка из бустера в У-70

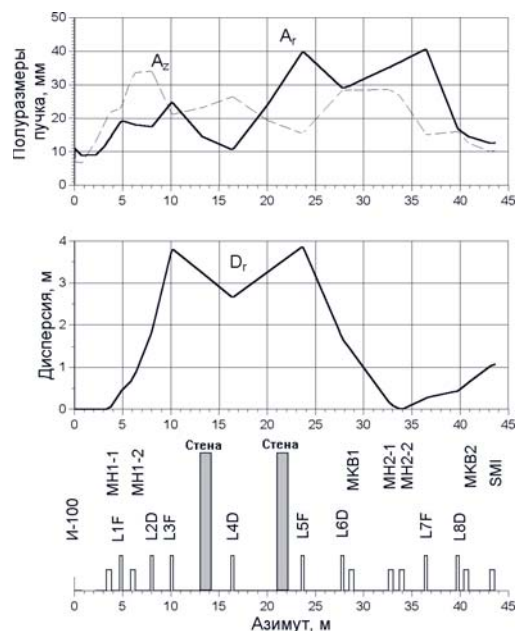


Рис 2.4.2. Расчетные огибающие и дисперсия канала перевода пучка И100-У-1,5

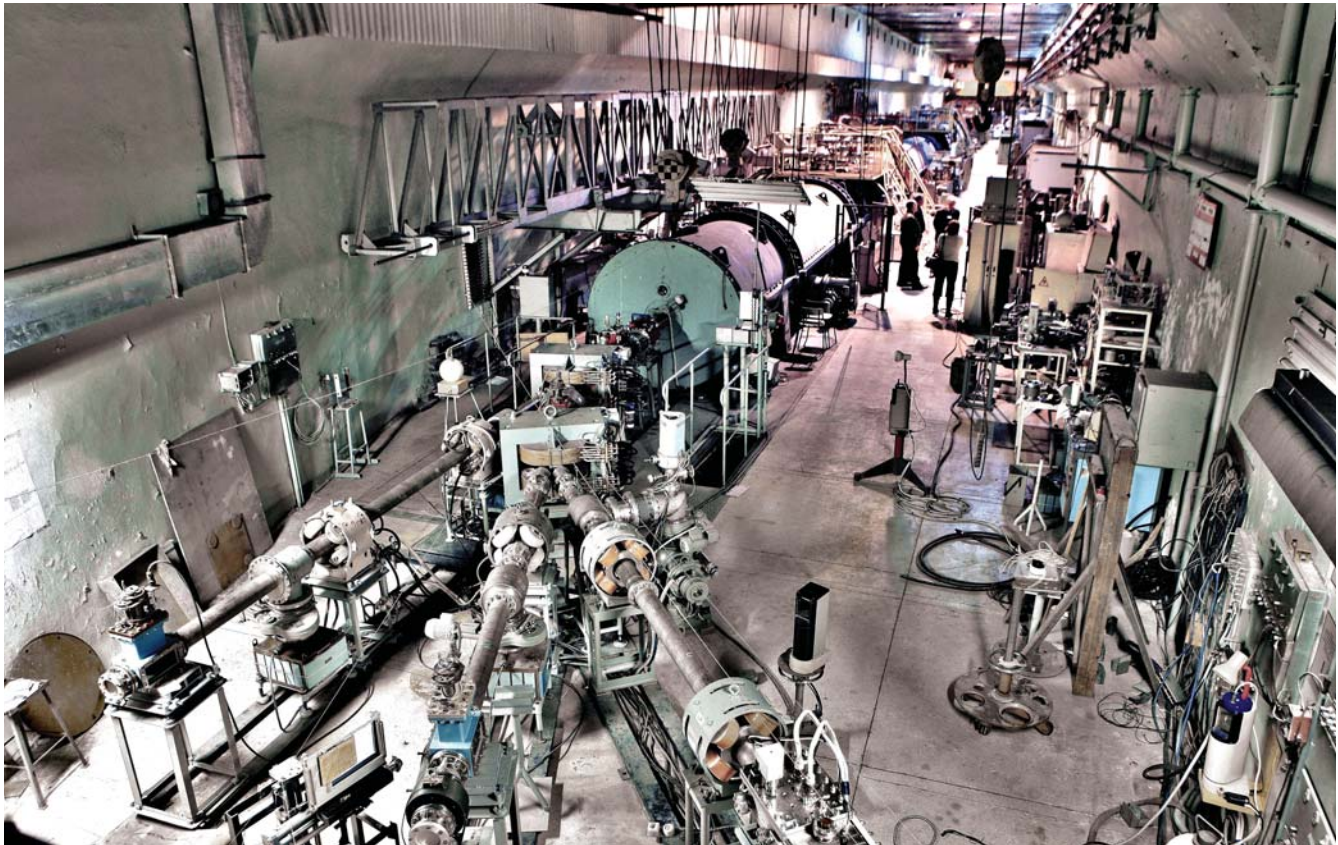


Рис. 2.4.4. Выходной резонатор И-100 и начальная часть канала перевода в У-1,5, смонтированная в 2003 году

Два диполя МН1-1 и МН1-2 осуществляют поворот пучка на направление бустера и проводку трассы пучка между колоннами в зале бустера, диполи МН2-1 и МН2-2 обеспечивают поворот трассы в направлении ввода пучка в бустер. Квадрупольные линзы обеспечивают фокусировку пучка и согласование оптики и дисперсии на входе в бустер (смотри Рис. 2.4.3).

Квадрупольные линзы и поворотные магниты для канала перевода были изготовлены в НИИЭФА в 2003 году. В этом же году был выполнен монтаж элементов канала перевода в зале И-100 (смотри Рис. 2.4.4).

Источники питания для магнитной оптики этого канала были разработаны и изготовлены в ГНЦ ИФВЭ. Они обеспечивают точность поддержания токов на уровне $\pm 0,1\%$ для дипольных магнитов и $\pm 0,5\%$ для квадрупольных линз и корректоров.

Окончательный монтаж элементов канала в залах бустера был выполнен в 2006 году.

Завершающая часть канала перевода (перед вводом пучка в У-1,5) показана на Рис. 2.4.6.

В ноябре 2006 года по каналу перевода впервые были транспортированы протоны, ускоренные в линейном ускорителе И-100. Экспериментально определенные режимы магнитооптического оборудования оказались близки к расчетным.

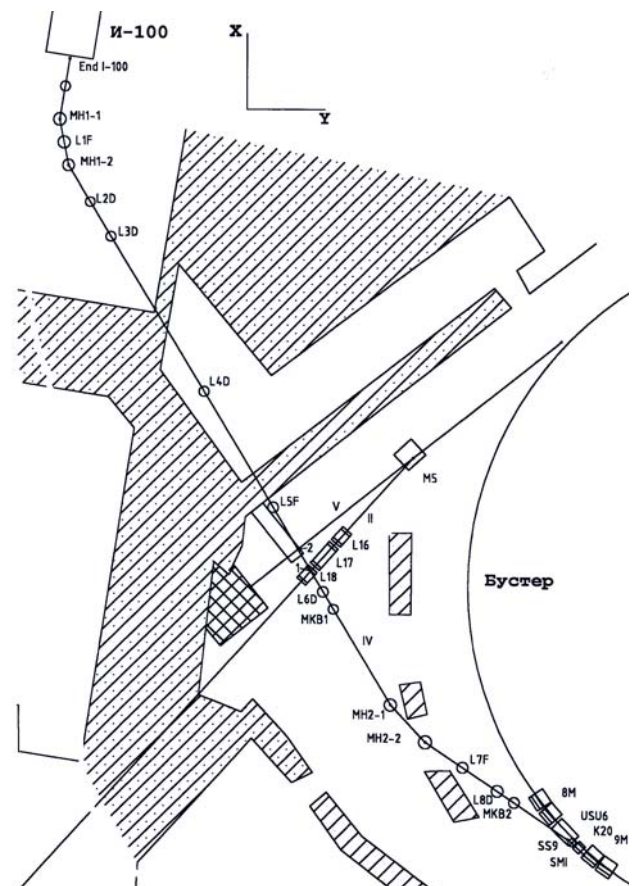


Рис 2.4.3. Взаимное расположение И-100, У-1,5 и канала перевода



Рис. 2.4.6. Завершающая часть канала перевода (перед вводом пучка в У-1,5)



Рис 2.4.7. Телевизионный кадр с сцинтилляционной станции наблюдения пучка в конце канала перевода (ноябрь 2006 года)

Эффективность прохождения пучка по каналу близка к 90%. На Рис 2.4.7 показан телевизионный

кадр со сцинтилляционной станции наблюдения пучка в конце канала перевода.

2.5 Ввод пучка в бустер

Инжекция пучка ионов углерода из канала перевода в синхротрон У-1,5 производится с помощью септум-магнита, устанавливаемого в 9-ом промежутке, и ударного магнита, устанавливаемого в 9-ом триплете между линзами 9Д и 9Ф2. Трасса ввода пучка в бустер показана на Рис. 2.5.1. Ввод пучка производится в горизонтальной плоскости под углом 184 мрад относительно орбиты бустера.

Трасса ввода пучка проходит мимо «щеки» блока 8М2 кольцевого электромагнита бустера с достаточным запасом.

Вводной септум-магнит смещен по азимуту ускорителя в направлении движения пучка на 250 мм относительно середины 9-го промежутка.

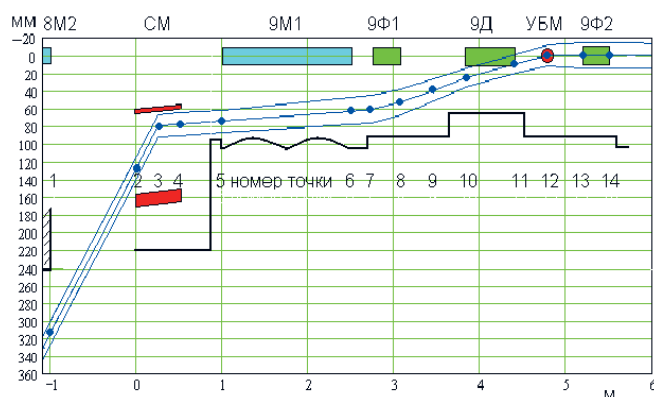


Рис. 2.5.1. Трасса ввода пучка в синхротрон У-1,5

На место блока 9М1 установлен блок с расширенной апертурой и, соответственно, с расширенной вакуумной камерой. Ударный бамп-магнит (УБМ) установлен в промежутке 9-б и имеет длину ~0.5 м.

Угол поворота пучка в УБМ около 20 мрад. Взаимное расположение СМ и УБМ таково, что возможно не только однооборотная, но и эффективная двухоборотная инжекция.



Рис. 2.5.2. Общий вид силового шкафа питания септум-магнита

Основные параметры септум-магнита

Наименование параметра	Величина
Длина	0,5 м
Апертура, ширина x высота	92 x 50 мм
Индукция магнитного поля в центре зазора	0,42 Т
Индуктивность (расч.)	1,3 мкГн
Толщина септума	3 мм
Угол поворота пучка в СМ	+177 мрад
Режим работы	импульсный
Частота повторения импульсов тока	1 Гц
Амплитуда рабочего тока	17 кА
Неравномерность тока в течение инъекции	0,1%
Стабильность тока от импульса к импульсу	0,1%
Длительность синусоиды импульса тока	12 мсек
Емкость накопительной батареи	1600 мкФ
Зарядное напряжение макс.	1000 В

Таблица 2.5.1

Септум-магнит обеспечивает угол поворота пучка в 177 мрад, что позволяет более слабому полю кикер-магнита довернуть пучок до оси параллельной равновесной орбите бустера в прямолинейном промежутке N 9.



Рис. 2.5.3. Смонтированный на кольце У-1,5 септум-магнит

Основные параметры кикер-магнита

Наименование параметра	Величина
Длина	0,5 м
Апертура, ширина X высота	130 x 100 мм
Индукция магнитного поля в центре зазора	0,054 Т
Угол поворота пучка в СМ	23 мрад
Режим работы	импульсный
Частота повторения импульсов тока	1 Гц
Длительность плато импульса	1,6 мкс
Длительность спада импульса (по уровню 0.95-0.05)	0,18 мкс
Неравномерность поля в апертуре 100 x 80 мм	±2%
Нестабильность плато от импульса к импульсу	±0.2%

Таблица 2.5.2

Основные параметры септум-магнита и его системы питания указаны в Таблице 2.5.1.

Система питания септум магнита была изготовлена и налажена в ИФВЭ в 2007 г. Общий вид силового шкафа питания септум-магнита показан на Рис. 2.5.2

Смонтированный на кольце синхротрона У-1,5 септум-магнит показан на Рис. 2.5.3.

Кикер-магнит, установленный в 9-ом промежутке кольца бустера, предназначен для поворота инжектируемого пучка на угол 23 мрад.

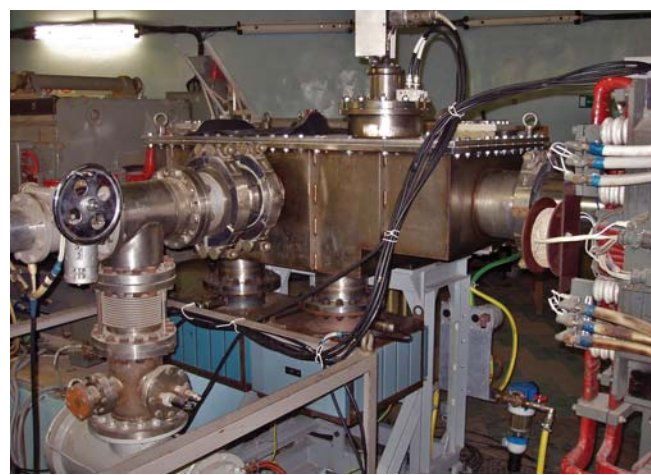


Рис. 2.5.4. Кикер-магнит, смонтированный на кольце синхротрона У-1,5

Основные параметры кикер-магнита указаны в таблице 2.5.2.

Кикер-магнит с системой питания был разработан и изготовлен в ИФВЭ. Кикер-магнит представля-

ет собой одновитковый магнит с О-образным ферритовым магнитопроводом.

Кикер-магнит, смонтированный на кольце синхротрона У-1,5 показан на Рис. 2.5.4.

2.6 Ускорение ионов в бустере

Основные параметры бустера при ускорении протонов и легких ядер, а также относительное изменение параметров при переходе от одного режима к другому приведены в таблице 2.6.1.

Для ускорения дейтронов и ионов углерода в бустере требовалось выполнить ряд работ:

- Для ввода пучка ионов из ускорителя И-100 в бустер с использованием канала транспортировки потребовалось освободить промежуток №9 от установленной там ускоряющей станции.
- Ускорение пучка дейтронов и ионов в бустере приводит к изменению режима работы уско-

Основные параметры бустера при ускорении протонов, и легких ядер

	При ускорении протонов	При ускорении легких ядер	Относительное изменение параметра (ядро/протон)
Энергия инъекции частиц	30 МэВ	16,7 МэВ/нуклон	–
Максимальная энергия частиц (на один элементарный заряд)	1320 МэВ	840 МэВ	0,64
Минимальная энергия частиц (на один элементарный заряд)	200 МэВ	200 МэВ	1,0
Магнитная жест. HR начальная	0,797 Т·м	1,18 Т·м	1,45
Магнитная жест. HR конечная	6,847 Т·м	6,53 Т·м	0,95
Радиус кривизны орбиты	5,73 м		
Индукция магнитного поля	0,139÷1,195 Т	0,206÷1,140 Т	1,45÷0,95
Диапазон изменения магнитного поля	8,60	5,53	0,64
□ начальная	0,247	0,186	0,753
□ конечная	0,910	0,724	0,796
Периметр орбиты	99,16 м		
Частота ускоряющего напряжения	0,746÷2,75 МГц	0,562÷2,186 МГц	0,753÷0,796
Диапазон перекрытия частот	3,69	3,89	1,057
Максимальная частота работы бустера	16,6 Гц	1,0 Гц	0,06
Ток частиц	20÷90 мА	дейтроны ~10 мА ядра углерода ~15 мА	дейтроны ~0,5÷0,1 ядра углерода ~0,03
Число частиц в импульсе	2÷5·10 ¹¹	дейтроны – 10 ¹¹ ядра углерода – 7·10 ⁹	дейтроны ~0,5÷0,1 ядра углерода ~0,03

Таблица 2.6.1

ряющих станций. До модернизации бустера их было 9, они перестраивались в цикле от 746 кГц до 2750 кГц. (диапазон перекрытия – 3,69). Как видно из таблицы 5, для ускорения дейтронов и ионов углерода требуется изменение частотного диапазона от 562 кГц до 2186 кГц (диапазон перекрытия – 3,89). Для изменения частотного диапазона был реализован вариант, когда снижение частоты в 1,3 раза достигается за счет увеличения емкости ускоряющих зазоров. Это было достигнуто путем дополнительного подключения при ускорении ионов сборки ВЧ-конденсаторов, устанавливаемых вне резонатора и оперативно отключаемых от

него при переводе станций в протонный режим работы.

- Для ускорения ионов был разработан и изготовлен новый задающий генератор, основанный на принципе прямого цифрового синтеза сигнала радиочастоты.
- Планируемые интенсивности дейтронного и углеродного пучков заметно ниже, чем в протонном варианте. Это потребовало заметного расширения динамического диапазона работы систем диагностики и обратной связи.

Все эти работы по модернизации бустера для ускорения легких ионов были завершены силами ГНЦ ИФВЭ в 2007 году.

Таким образом, созданное оборудование и выполненная модернизация синхротрона У-1,5 (Бустера) уже в 2007 году позволила получить устойчивый захват инжектируемых ионов углерода с их последующим ускорением до энергии в 455 МэВ/нуклон. Это позволяет сделать вывод, что задача получения пучка ионов углерода с необходимыми для ионной лучевой терапии энергией и интенсивностью в синхротроне У-1,5 была решена.

3 Формирование пучков ионов углерода с выводом в 1БВ

К 2010 году было осуществлено ускорение дейтронов и ионов углерода в линейном ускорителе И-100, сооружен канал перевода пучка из И-100 в Бустер, осуществлена модернизация систем бустера.

В 2008 году осуществлено ускорение дейтерия в цепочке из И-100 в Бустер, а в 2009 И-100 – Бустер – У-70. В 2010 году было выполнено ускорение по цепочке ускорителей и ионов углерода.

Настало время приступать к работам по системам вывода пучка легких ионов в экспериментальный зал 1БВ.

В первоначальном предложении ИФВЭ-МРНЦ предлагалось выводить пучок ионов углерода из ускорителя У-70 в северо-восточную часть зала 1БВ из 22 промежутка У-70.

Головная часть канала располагалась в кольцевом зале ускорителя У-70. Далее трасса проходила между строительных опор кольцевого зала, пересекала стену зала, проходила под земляной защитой ускорителя У-70 и попадала в зал 1БВ.

В этом первоначальном варианте магнитооптическое оборудование канала вывода серьезно ин-

терферировало со строительными конструкциями кольцевого зала У-70, требовалось построить подземный бункер, примыкающий к внутреннему кольцевому залу, и пропустить пучок по подземному вакуумпроводу длиной более 20 метров.

Все это требовало заметных строительных работ и не могло быть выполнено без привлечения существенных ресурсов.

В 2009 году был предложен новый вариант вывода пучка ионов из ускорителя У-70 в районе 34 промежутка. В этом варианте пучок может быть выведен в зону канала №6, где можно организовать зону для радиобиологических исследований. После поворота пучка почти на 180° в северо-восточной части зала 1БВ можно организовать точно такую же медицинскую зону, как и в первоначальном варианте.

Новое предложение не требовало строительных работ и привлечения дополнительных ресурсов.

Размещение радиобиологического и медицинского оборудования в этом новом варианте показано на Рис.3.1

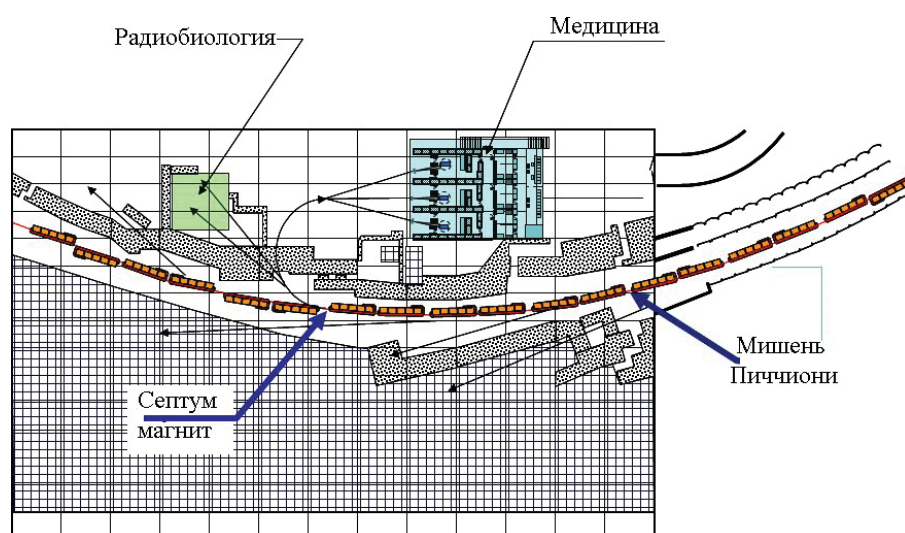


Рис.3.1 Размещение радиобиологического и медицинского оборудования в новом варианте вывода пучка из У-70 в зал 1БВ

3.1 Схема медленного вывода пучка легких ионов из ускорителя У-70

В качестве рабочего варианта схемы медленно-го вывода пучка легких ионов из ускорителя У-70 на нижнем плато магнитного поля была рассмотрена классическая схема вывода пучка Пиччиони–Райта (O. Piccioni, B.T. Wright, 1954–55 г. г.).

Подобная схема успешно применялась в слабофокусирующем протонном синхротроне COSMOTRON (BNL, США, 1953–66 г. г.). С ее помощью были впервые в мире получены пучки, выведенные из кольцевого ускорителя на внешнюю мишень.

В Таблице 3.1.1 приведено сравнение технических параметров схем вывода из ускорителей COSMOTRON и У-70.

Эта схема использует внутреннюю мишень–замедлитель (далее ВМ) и отклоняющий септум-магнит.

В соответствии с этой схемой в 28 промежутке частица однократно пересекает тонкую мишень в 28 промежутке – ВМ28 и испытывает в ней ионизационные потери энергии.

При этом ее импульс скачком уменьшается на относительную величину

$$\Delta p/p_0 = -0.008.$$

В терминах уменьшения удельной кинетической энергии это

$$\Delta T = \beta^2 \gamma E_{0\text{аеи}} \Delta p/p_0 = -4.52 \text{ МэВ на нуклон,}$$

(или -54,2 МэВ на ядро ^{12}C).

где $E_{0\text{аеи}} = 931.5 \text{ МэВ}$ есть энергия покоя одного нуклона в ядре.

Благодаря относительно невысокой скорости ядер максимальные энергии δ -электронов оказываются много меньше средних ионизационных потерь

$$E_{\text{макс}\delta} \approx 2 m_e \gamma \approx 1,5 \text{ МэВ} \ll 54 \text{ МэВ,}$$

вследствие чего флуктуации ионизационных потерь гауссовы и невелики

$$\sigma(\Delta E)/\Delta E = 0,025,$$

так что ими вполне можно пренебречь.

Указанный сброс энергии происходит в бериллиевой мишени с толщиной

$$t = 3.5 \text{ мм.}$$

В таких условиях угол сопутствующего многократного рассеяния составит

$$\sigma_{\ominus} = 0.86 \text{ мрад.}$$

В результате выводимая частица получает новую равновесную орбиту и дополнительное угловое отклонение.

Сравнительные характеристики схем вывода

Ускоритель	COSMOTRON	У-70	
Сорт частиц	p	ядра С	
Длина орбиты	71.8	1483.7	м
Удельная кинетическая энергия, Т	3300	450	МэВ на нуклон
Ионизационные потери энергии (замедление) при однократном пересечении ВМ, ΔT	- 8.0	- 6.0	МэВ на нуклон
Относительное изменение импульса, $\Delta p/p_0$	- 0.002	- 0.008	
Изменение радиуса равновесной орбиты, Δx	- 100	- 21.1	мм
Поперечный размер пучка, ожидающего вывода (полный; горизонтальный и вертикальный)	75 x 25	80 x 45	мм ²
Материал ВМ	бериллий	бериллий	
Высота ВМ, h	23	10	мм
Толщина ВМ, t	нет данных	3,5	мм
С.к.в. угол рассеяния на выходе ВМ из-за МКР, σ_{\ominus}	нет данных	0.9	мрад
Эффективность медленного вывода	60	50	%

Таблица 3.1.1

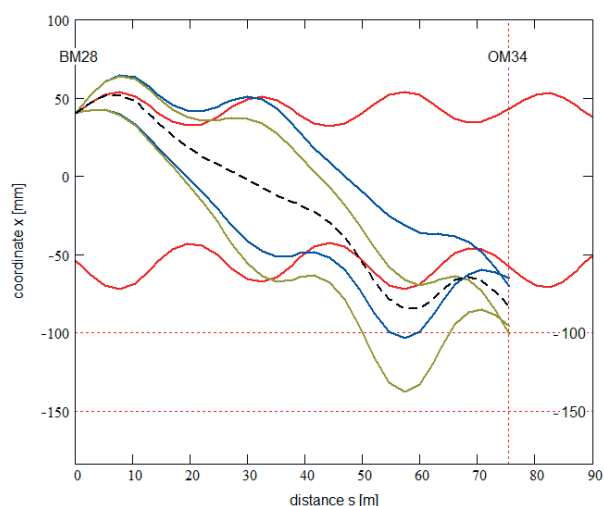


Рис. 3.1.1 Горизонтальная проекция типичных траекторий трассы вывода и огибающая функция циркулирующего пучка ((красные) периодические кривые)

Наибольший выбег траектории в область отрицательных горизонтальных координат происходит при набеге фазы горизонтальных бетатронных колебаний на π относительно фазы касания BM28.

Этот выбег траектории используется для заброса частиц за перегородку магнита OM34 и их последующего вывода.

Горизонтальное направление

Горизонтальные проекции типичных траекторий трассы вывода для импульсов $\pm \delta r / r_0$ и углов рассеяния $\Delta dx / ds = \pm 2\sigma_0$ построены на Рис. 3.1.1. Там же показана огибающая функция циркулирующего пучка и траектория центра выводимого пучка (пунктир).

В начале прямолинейного промежутка (ПП) ПП28 хроматические эффекты сильно подавлены. Здесь выводимый пучок имеет нулевой линейный размер по x . Угловой же размер пучка задан эффектом многократного рассеяния.

В ПП34 пучки (ожидающий вывода и выводимый) разведены.

Горизонтальная апертура регулярной части вакуумной камеры составляет ± 100 мм.

Горизонтальные апертурные ограничения достигаются на внутренней стенке вакуумной камеры в 32-м магнитном блоке (фокусирующий, закрытый).

Для полного устранения потерь частиц на участке трассы вывода с координатами $|x| > 100$ мм требуется установка в 32-м магнитном блоке нового участка вакуумной камеры, расширенного до 150 мм.

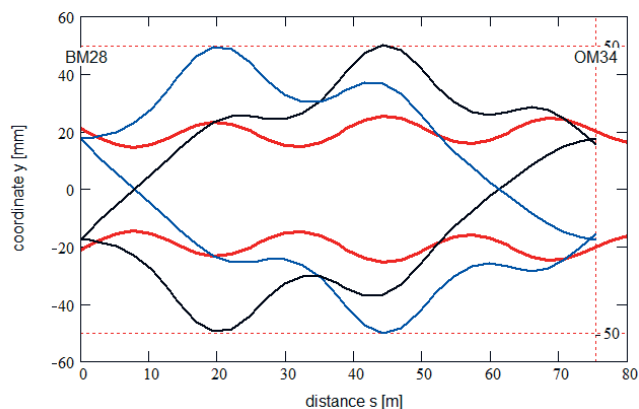


Рис. 3.1.2: Вертикальная проекция типичных траекторий трассы вывода и огибающая функция циркулирующего пучка ((красные) периодические кривые). Высота мишени BM28 $\pm 35/2$ мм.

Пучок в OM34 имеет конечный линейный размер, который почти полностью определяются дисперсионной функцией и разбросом по импульсам $\pm \delta r / r_0$.

Параметры выводимого пучка в конечной точке трассы ПП34/2 приведены в Таблице 3.1.2.

Вертикальное направление

Вертикальная апертура регулярной части вакуумной камеры составляет ± 50 мм. Вертикальная

Параметры выводимого пучка в точке ПП34/2 (в центре септум-магнита)

Расстояние между границами циркулирующего и выводимого пучка, ширина перегородки OM34	7.4 мм
Координата центра пучка	- 83.4 мм
Наклон центральной трассы	- 4.0 мрад
Дисперсионная функция (для согласования с принимающим каналом)	
D_x	5.13 м
dD_x/ds	0.12
Для справки. Дисперсионная функция магнитной структуры У-70	
D_x	2.692 м
dD_x/ds	0.116

Таблица 3.1.2

огибающая циркулирующего пучка показана на Рис 3.1.2 (периодические кривые).

Избыточный вертикальный фазовый объем пучка осложняет вывод. Вертикальные апертурные ограничения достигаются на верхней и нижней стенке вакуумной камеры в 29-м и 31-м магнитных блоках (оба де фокусирующие) при учете МКР уже на уровне 2σ .

Предлагается использовать VM28 с высотой

$$h_{VM28} = 10.0 \text{ мм.}$$

Для справки, вертикальный размер пучка на азимуте VM28 больше и составляет $\pm 42.6/2$ мм.

Вертикальные проекции типичных (экстремальных) траекторий трассы вывода, начинающихся в крайних высотных координатах мишени $y = \pm h_{VM28}/2$, построены на Рис. 3.1.2.

Набег фазы бетатронных колебаний на участке VM28–OM34 составляет 1.01 р. Происходит почти точная фокусировка перевернутого изображения VM28 в магните OM34. Линейный размер изображения VM28 на азимуте OM34 совпадает высотой VM28,. Этим задается вер-

тикальная апертура OM34 — самое узкое место по трассе вывода.

Предложенная схема вывода из У-70 выглядела простой и реализуемой. Она опиралась на опробованные технологии (COSMOTRON) и для реализации этой схемы требовались создание и монтаж сравнительно небольшого объема нового оборудования.

Более того, при реализации этой схемы вывода не предполагалось какое-либо радикальное вмешательство в существующую конфигурацию технологических систем ускорителя. При выводе предполагалось задействовать небольшой объем электрофизического оборудования с понятными алгоритмами работы и настройки.

Однако в этом варианте вывода из-за больших фазовых объемов пучка были выбраны почти все запасы по допускам.

Основная проблема — многократное рассеяние пучка в мишени Пиччиони на VM28 и ограниченность вертикальной апертуры ускорителя.

Ожидаемая эффективность вывода из У-70 составляла $\approx 50\%$.

3.2 Аппаратура вывода пучка ионов из У-70

3.2.1 Мишень Пиччиони

Внутренняя мишень Пиччиони, установленная в 28 промежулке ускорителя У-70 предназначена для

вывода пучков ионов углерода и протонов для медицинского использования.



Рис 3.2.1.1. Вид 28-го промежулка ускорителя У-70 с мишенью Пиччиони и вакуумным оборудованием

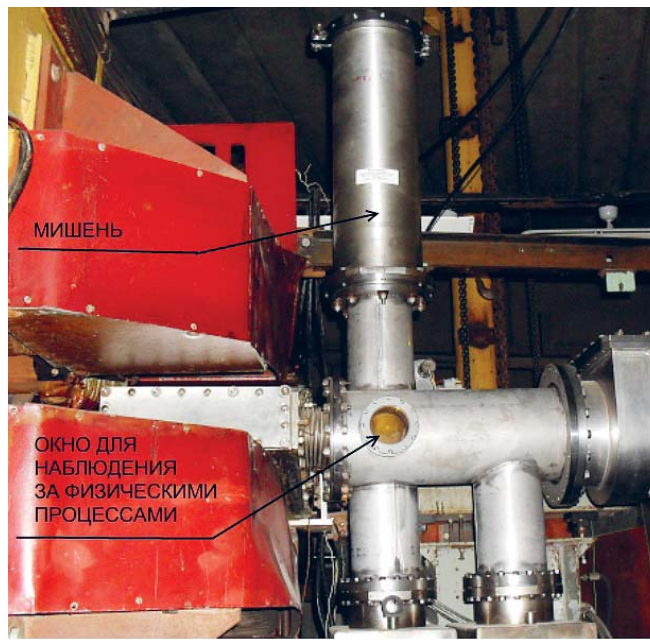


Рис 3.2.1.2. Внешний вид мишени Пиччиони

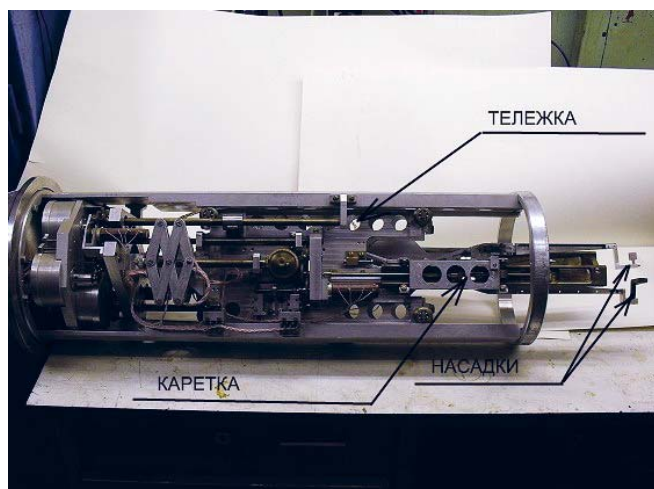


Рис. 3.2.1.3. Механизм мишени Пиччиони

При проектировании и изготовлении мишени был взят за основу и модернизирован стандартный механизм внутренних мишеней для физических исследований на ускорителе У-70 (Рис.3.2.2.) с двумя насадками из Ве (бериллия) и С (углерода).

Были рассмотрены различные варианты расположения мишени: горизонтальное снаружи или внутри кольца и вертикальное – сверху вакуумной камеры.

Было выбрано наиболее реализуемое решение – вертикальное расположение мишени с врезкой вверху вакуумной камеры, представленное на Рис. 3.2.1.1 и Рис. 3.2.1.2.

Модernизированный механизм мишени (Рис. 3.2.1.3) состоит из:

1. Тележки, перемещающейся на 120 мм в вертикальной плоскости;

3.2.2 Выводные магниты

Мишень Пиччиони, расположенную в 28 промежутке и систему выводных магнитов, расположенных в 34 промежутке разделяют 6 блоков магнитной структуры синхротрона У-70 (75 метров).

При наведении протонов или ионов углерода на мишень Пиччиони, часть пучка, прошедшая через материал мишени теряет энергию за счет ионизационных потерь и через половину периода бетатронных колебаний (≈ 75 метров) смещается внутрь кольца.

В 34-ом прямолинейном промежутке, где расположен головной септум-магнит СМ-34, мы имеем на входе септум-магнита ионный пучок со следующими расчетными параметрами:

- заброс пучка по R = -78мм,



Рис. 3.2.1.4 Бериллиевая насадка для мишени Пиччиони

2. Каретки с насадкой, перемещающейся в горизонтальной плоскости в диапазоне 20 мм.

Перемещение осуществляется двумя двигателями переменного тока, индикация положения насадки снимается с многооборотных резисторов.

При работе с пучком ионов углерода используется насадка из Бериллия (Ве) с размерами 10x10x4 мм (Рис.3.2.1.4).

В процессе экспериментальных работ по выводу ионов углерода в 25 канал мишень Пиччиони совершенствуется.

В последнюю в 28 промежутке У-70 установлена вторая мишеничная станция, что позволяет увеличить возможное число мишеничных насадок до 8 штук.

Это позволяет эффективно выводить пучки ионов для 8 различных энергий.

- угол пучка = -5,5мрад,
- эмиттанс пучка горизонтальный $\epsilon_x = 20$ мм*мрад,
- эмиттанс пучка вертикальный $\epsilon_y = 21$ мм*мрад,
- импульсный разброс $\Delta p/p = 0,0055 \pm 0,0015$,
- размер пучка по горизонтали $\Delta R = 17$ мм,
- размер пучка по вертикали $\Delta Y = 13$ мм.

Несколько упрощая можно сказать, что септум-магнит СМ-34 должен вывести смещенный пучок из вакуумной камеры, магнит ОМ1 отклоняет пучок так, чтобы обойти октупольную линзу, расположенную в 34 промежутке, магнит ОМ2 выводит пучок на центр магнита ОМ3, а магнит ОМ3 окончательно направляет пучок в канал №25 (смотри схему на Рис. 3.2.2.2, Рис. 3.2.2.3 и Рис. 3.2.2.4).



Рис 3.2.2.1. Вид кольцевого зала У-70 от 28 промежутка в направлении к 34 промежутку

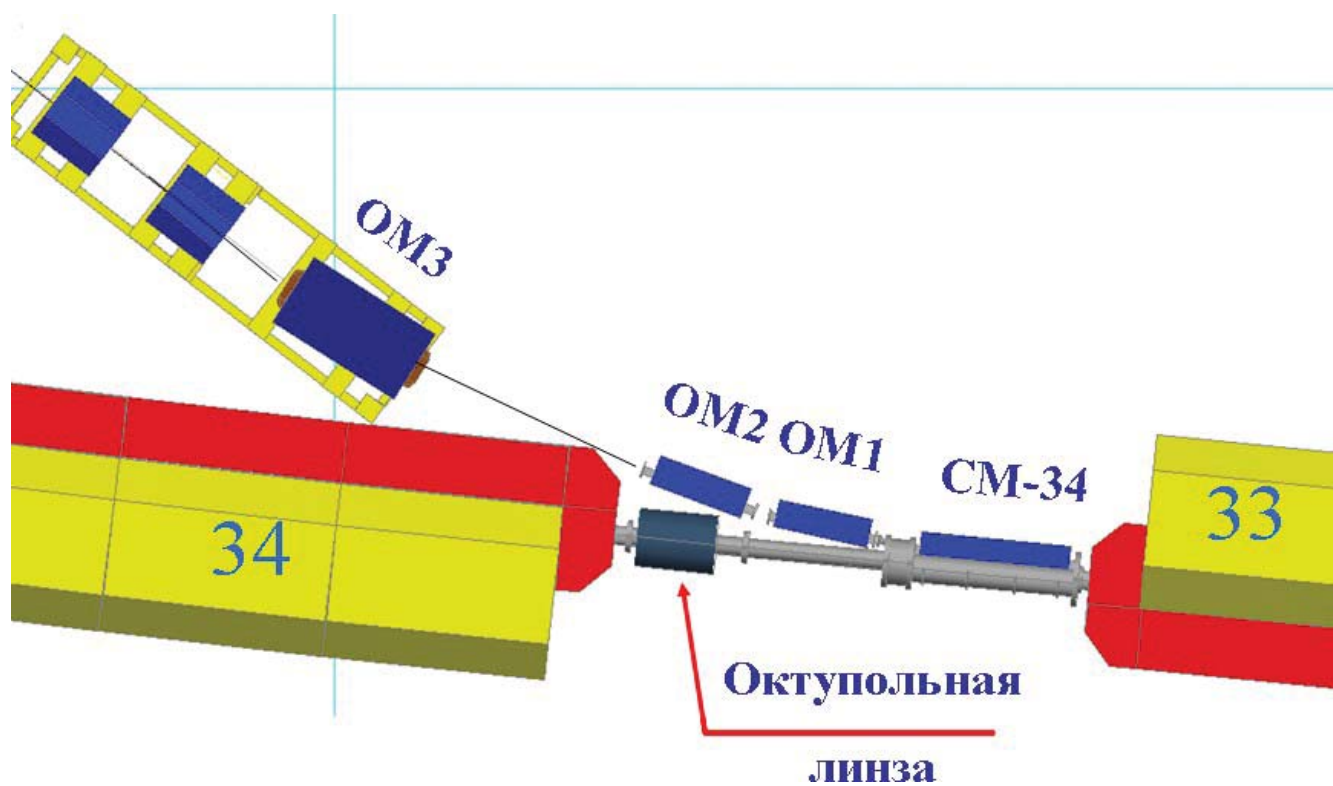


Рис 3.2.2.2. Схема выводных элементов в 34 промежутке



Рис. 3.2.2.3. Вид 34-го промежутка с смонтированными выводными элементами. Слева – септум магнит СМ-34, в центре и справа С-образные магниты ОМ1 и ОМ2.



Рис 3.2.2.4. Слева – магниты СМ-34, ОМ1, ОМ2, справа от центра магнит ОМ3

Технические характеристики выводных магнитов

Параметр	СМ-34	ОМ1	ОМ2	ОМ2
Индукция магнитного поля, Тл	0,41	0,838	1,08	1,4
Неоднородность магнитного поля, %	0,15	0,15	0,2	0,2
Ширина рабочей области, мм	80	75	110	190
Вертикальная апертура, мм	42	42	42	64
Длина рабочей области, мм	1250	800	800	1200
Размер медного проводника, мм	4 x 6, ф2,5 15 x 15, ф7	13 x 11, ф6	15 x 15, ф7	13 x 11, ф6
Число витков	2	4	8	28
Ток, А	7000	7000	7000	1000
Падение напряжения, В	8,4	6,3	22,7	12
Охлаждение водяное, расход воды, литров/минуту (не менее)	20	14,8	26,2	3
Перегрев воды в обмотке, °С	35	22	23	20
Сопротивление обмотки, Ом	0,0012	0,0009	0,0032	0,012
Индуктивность, мГн	5,95	7,7	22,7	64,5
Масса активной стали, кг	273	275	275	1850
Масса меди в обмотках, кг	10,96	18,5	18,5	190

Таблица 3.2.2.1

3.2.3 Канал транспортировки ионов углерода в медицинскую зону

Канал транспортировки ионов углерода в медицинскую зону (магнитооптический канал №25) (смотри Рис. 3.2.3.1) состоит из:

- септум-магнита СМ-34;
- С-образных магнитов ОМ1 и ОМ2;
- дипольного магнита ОМ3;

- магнитных квадруполой Q1-Q4;
- пучкового затвора;
- магнитных квадруполой Q5-Q7;
- воблер-магнитов;
- водного фантома с местом для размещения биообъектов.

Все эти элементы были разработаны, изготовлены, испытаны и смонтированы специалистами ИФВЭ.

Технические характеристики квадруполой канала №25 даны в Таблице 3.2.3.1.

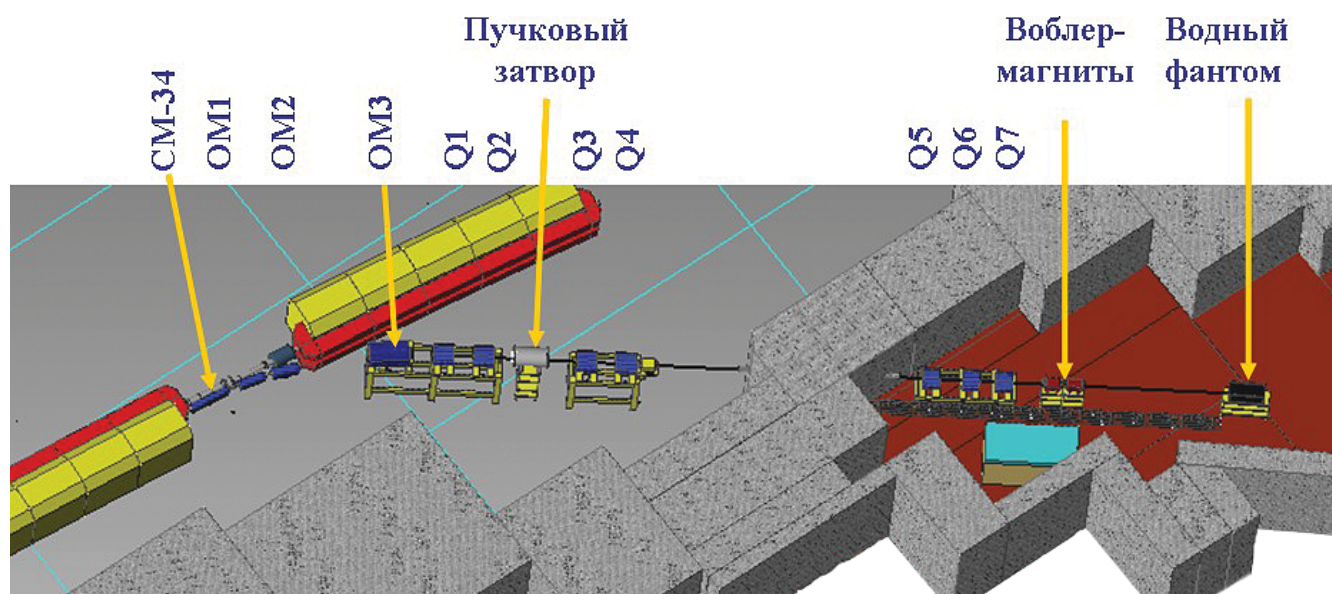


Рис. 3.2.3.1 Полная схема магнитооптического канала №25

Технические характеристики квадруполой канала №25

Параметр	Q1÷Q4	Q5÷Q7
Градиент индукции магнитного поля, Тл/м	16,2	15
Диаметр апертуры, мм	75	100
Длина полюсного наконечника, мм	580	500
Число катушек	4	4
Число витков в обмотке	10 x 4 = 40	4 x 37 = 148
Средняя длина витка, м	1,64	1,64
Размер проводника, мм	13 x 11, ф6	13 x 11, ф6
Максимальный ток возбуждения, А	1000	420
Охлаждение водяное, расход воды, литров/минуту (не менее)	4,68	8
Перегрев воды в обмотке (не более), °С	32	20
Сопротивление обмотки, Ом	0,02	0,038
Индуктивность, мГн	3,1	22,8
Масса активной стали, кг	700	680
Масса меди в обмотках, кг	68	238

Таблица 3.2.3.1

3.3 Формирование дозного поля

Предполагается, что на первом этапе работ в ЦИЛТ будет применяться та же методика формирования дозового поля на пациенте, которая применялась в нескольких центрах в Японии наиболее продолжительное время, а именно методика облучения широким пучком с использованием воблер-магнитов.

Идея этого метода показана на Рис. 3.3.1. Схема размещения оборудования показана на Рис. 3.3.2.

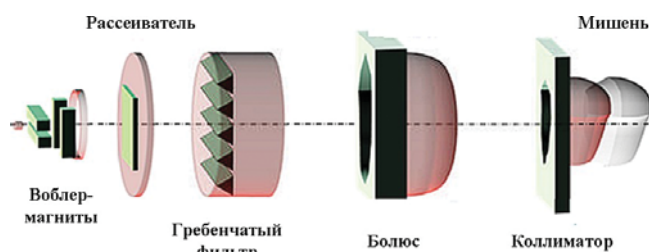


Рис. 3.3.1. Идея метода облучения широким пучком

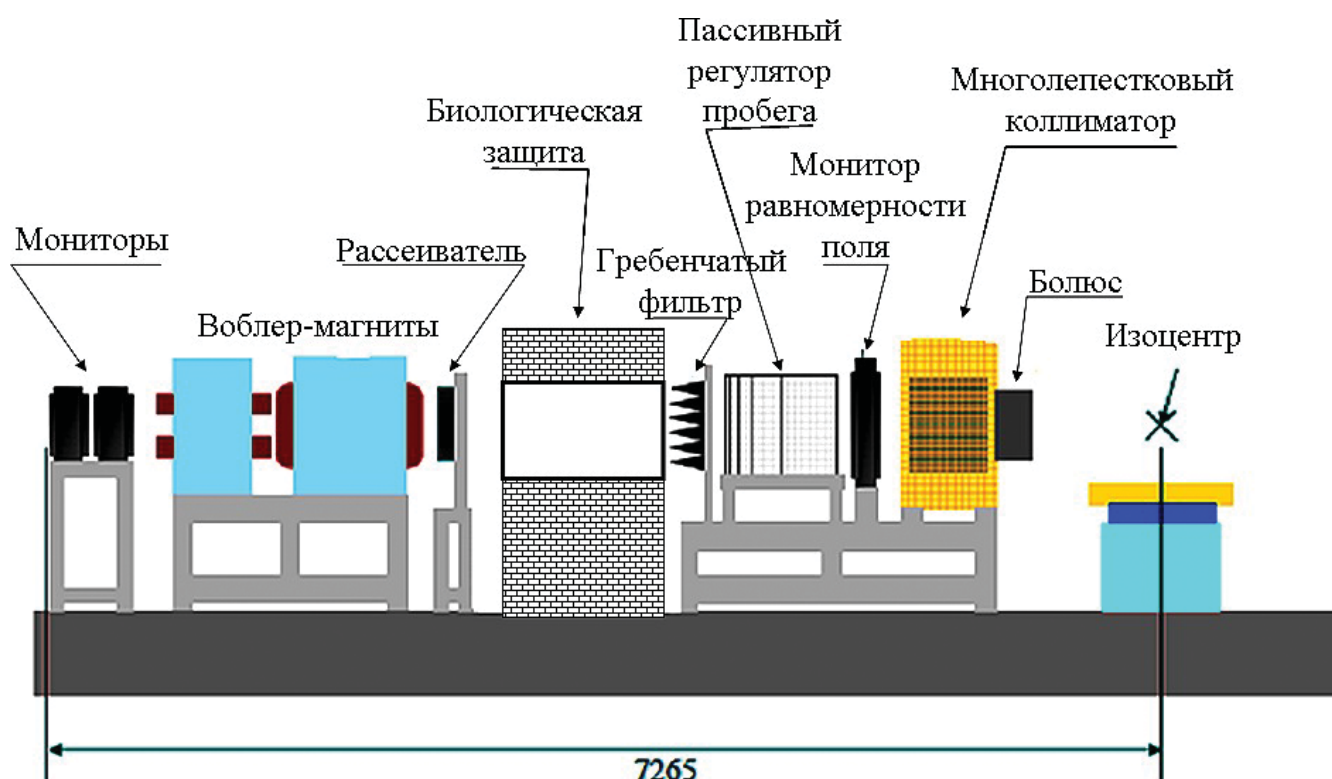


Рис. 3.3.2. Размещение оборудования при облучении широким пучком

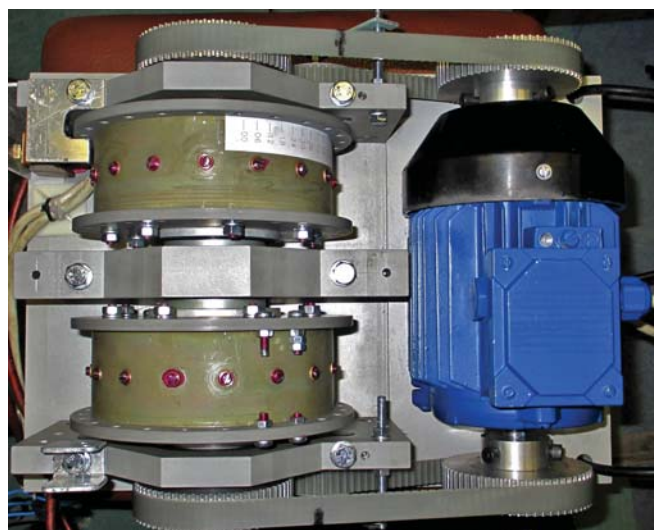


Рис. 3.3.3. Вид сверху на созданный вариант воблер-магнита.

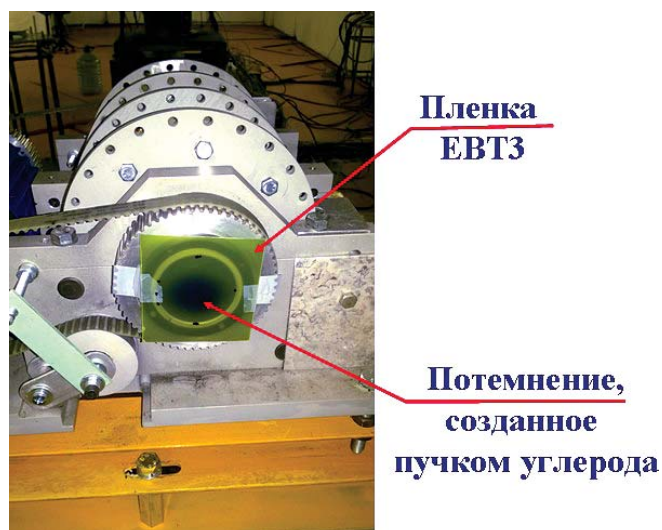


Рис. 3.3.4. Юстировка воблер-магнитов на пучке с помощью радиационно чувствительной пленки EB73

Пучок ионов углерода, подведенный к медицинскому каньону магнитооптическим каналом, проходит сначала через два воблер-магнита. Эти магниты осуществляют кольцевую развёртку пучка.

Помещённый после воблер-магнитов рассеиватель расширяет пучок до необходимой величины. Амплитуда кольцевой развёртки и толщина рассеивателя зависят от размеров опухоли.

Гребенчатый фильтр расширяет брегговский пик. Коллиматор и компенсатор (болюс) должным образом формируют пучок в поперечном и продольном направлениях.

Ступенчатый пассивный регулятор пробегает используется для точной подстройки энергии пучка.

В 2013 году силами сотрудников ГНЦ ИФВЭ на канале №25 была создана система кольцевого сканирования (Препринт ИФВЭ 2014 - 8 и публикация в журнале «Приборы и техника эксперимента», 2015, № 4).

В существующем в настоящее время устройстве используется синхронное механическое вращение двух идентичных соосных цилиндрических магнитных дипольных структур.

Сборка постоянных дипольных магнитов (Рис. 3.3.3 и Рис. 3.3.4) может монтироваться с разным угловым раствором между направлением магнитных полей в магнитах, что позволяет варьировать силу воблер-магнита.

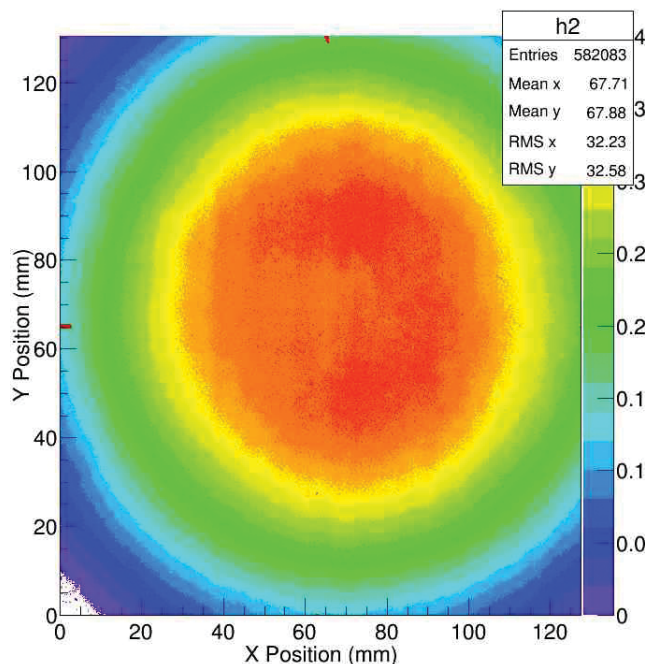


Рис. 3.3.5. Дозное распределение, сформированное в районе водного фантома с помощью воблер-магнитов

Для обеспечения кольцевого сканирования пучком и формирования равномерного дозного поля используется механическое вращение сборки магнитов с частотой до 50 Гц.

Данная система формирования равномерного поля является экономически доступной и относительно простой в изготовлении и настройке. Она с успехом применялась, и далее будет использоваться в исследованиях для облучения биологических объектов (смотри Рис. 3.3.5).

Однако использование такой системы при облучении пациентов не вполне эффективно.

Это связано с необходимостью оперативной перестройки системы воблер-магнитов, которая неизбежно потребует при изменении энергии пучка, а также при изменении размеров необходимого поля облучения, что необходимо при клиническом использовании пучка.

Более того, в зоне равномерности (при указанных выше размерах пучка) находится лишь $\approx 25\%$ всей интенсивности пучка.

Вышеперечисленные недостатки существующей воблер-системы привели к разработке новой системы формирования равномерного дозового поля.

Предлагаемая система формирования равномерного дозового поля

В этом новом методе предполагается использовать воблер-магниты с пилообразной формой тока. Такой метод позволяет сформировать равномерное дозное поле прямоугольной формы.

На Рис. 3.3.6 представлен расчет размера пучка и размера плоской части пучка в зависимости от расстояния от конца последней линзы триплета.

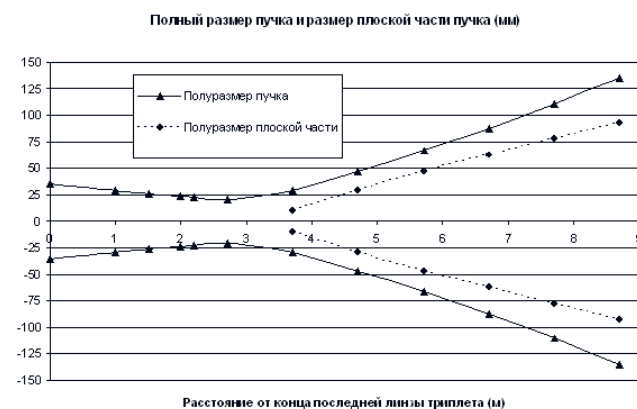


Рис. 3.3.6. Расчетные размеры пучка и плоской части пучка в зависимости от расстояния, отмеряемого от конца последней линзы триплета

Такая же информация даётся и в виде таблицы (Таблица 3.3.1), при этом измерение расстояний проводятся от конца воблер-магнита. В последней колонке Таблицы 3.3.1 представлена доля интенсивно-

сти пучка в плоской части. Как видно из таблицы, на расстоянии от воблера >2 м коэффициент использования пучка в 2-3 раза выше, чем для существующего механического воблер-магнита.

Расстояние от воблера (м)	Исходный диаметр пучка (мм)	Полный размер пучка (мм)	Размер плоской части пучка (мм)	Доля интенсивности в плоской части %
1	32	58	20	27
2	30	95	58	60
3	34	134	93	68
4	42	176	124	70
5	56	220	156	70
6	65	270	186	70

Таблица 3.3.1

4 Параметры углеродного пучка

В 2011 году был впервые в ГНЦ ИФВЭ осуществлен медленный вывод углеродного пучка из ускорителя У-70 с необходимой для медицинского применения энергией и интенсивностью (Рис. 4.1).

Параметры пучка ионов углерода в различных элементах ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ приведены в Таблице 5.1.

Осциллограмма, иллюстрирующая временную структуру пучка ионов углерода,

выводимого из У-70 в канал №25 показана на Рис. 4.2.

Интенсивность циркулирующего пучка в У-70 – нижний луч, интенсивность выводимого пучка в канал №25 – третий сверху. Из Рис. 4.2 видно, что выводимый пучок имеет хорошую временную структуру.

На Рис 4.3 показано распределение интенсивности пучка ядер углерода, выводимых в канал №25



Рис. 4.1. Прохождение пучка ядер углерода, выведенных из ускорителя У-70, через пластический сцинтиллятор. Пробег пучка в сцинтилляторе ≈ 32 см. Картинка получена в экрана ТВ монитора.

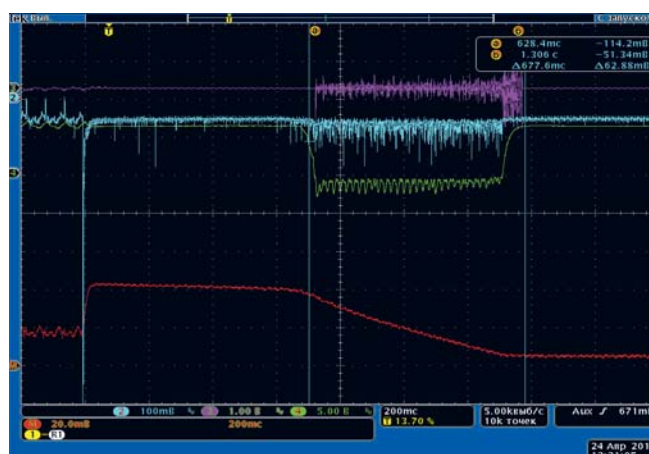


Рис. 4.2. Осциллограмма, характеризующая временную структуру вывода пучка из У-70 в канал №25

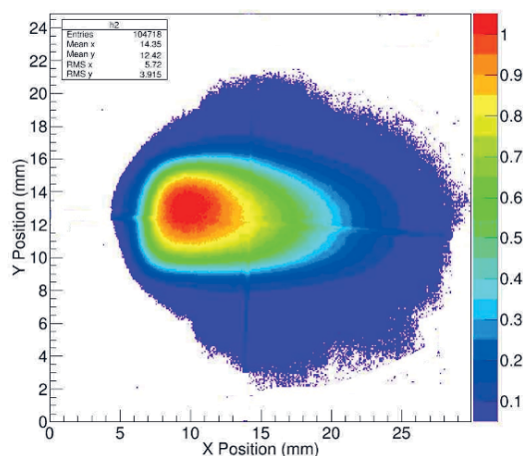


Рис. 4.3. Распределение интенсивности пучка ядер углерода, выводимых в канал №25.

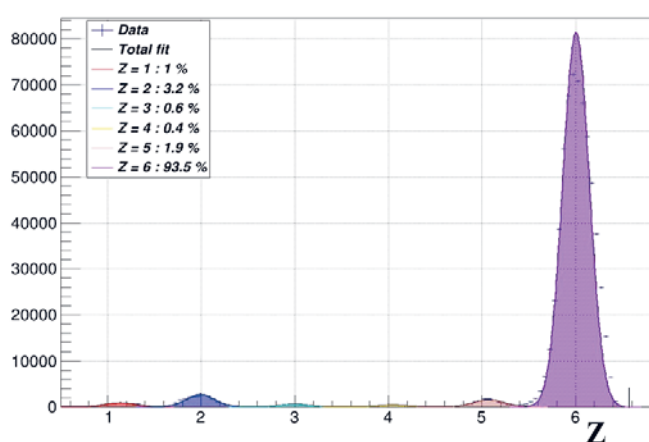


Рис. 4.4. Распределение частиц по заряду в конце канала №25

Параметры пучка ионов углерода в различных элементах ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ

	И-100	У-1,5	У-70	Канал №25
Кинетическая энергия ядер на входе, МэВ/нуклон	0,28	16,7	450	200÷450
Кинетическая энергия ядер на выходе, МэВ/нуклон	16,7	450	200÷450	200÷450
Интенсивность на выходе, ядер/цикл	$3 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Длительность пучка на выходе, сек	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,6	0,6
Длительность цикла минимальная, сек	4			

Таблица 3.2.2.1

(на выходе магнита ОМ2). Распределение получено при помощи радиочувствительной пленке ЕВТЗ.

Из Рис.4.3 видно, что пучок выводимый в канал №25, имеет небольшие размеры ($\approx 10 \times 15$ мм² (верт. \times гор.)), близкие к расчётным, что позволяет проводить пучок по каналу без заметных потерь.

На Рис. 4.4 показано распределение частиц по заряду. Это распределение получено путем экспериментального измерения ионизационных потерь

в тонком кристаллическом детекторе. Детектор был помещён в центр пучка в районе водного фантома.

Из рисунка видно, что основная часть пучка – это ядра углерода ($Z=6$). Небольшая примесь других ионов ($Z<6$) связана с фрагментацией ядер углерода, возникающей при взаимодействии ядер углерода с воздухом (канал пока не вакуумирован), а также оборудованием канала.

Таким образом, на ускорительном комплексе ИФВЭ реализован вывод пучка ионов углерода промежуточных энергий из ускорителя У-70 в экспериментальный зал. Энергия пучка, его интенсивность, временная структура и другие параметры полностью соответствуют задаче создания условий для ионной лучевой терапии.

5 Временный радиобиологический стенд (ВРБС) Создание, цели, задачи, результаты



Рис. 5.1. Зона временного радиобиологического стенда на канале №25

В 2013 году был осуществлен медленный вывод пучка ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон на радиобиологический стенд, расположенный на новом канале №25 (Рис.5.1).

Ионизационные камеры, сцинтилляционные экраны с ТВ мониторами, водяной фантом, радиочувствительная пленка, дозиметрические приборы позволили в апреле 2013 года определить характеристики выведенного углеродного пучка (Рис. 5.2), фоновые условия и доказать, что созданный радиобиологический стенд на канале №25 пригоден для радиобиологических исследований.

В 2013÷2016 годах начались совместные ГНЦ ИФВЭ и МРНЦ МЗ России комплексные биомедицинские и физико-дозиметрические исследования пучка ионов углерода на канале №25 ускорителя У-70 (Рис. 5.3÷5.5).

В ходе радиобиологических исследований на пучке ионов углерода уже получены результа-

ты, озвученные на международных конференциях. (Рис. 5.6).

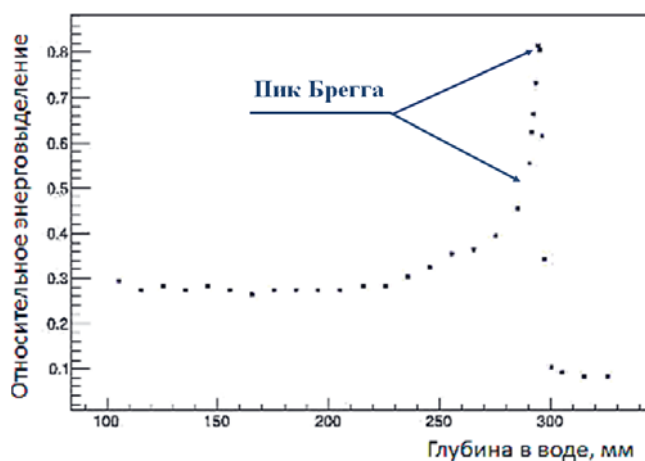


Рис.5.2. Распределение относительного энерговыделения в углеродном пучке, измеренные в водном фантоме ионизационной камерой

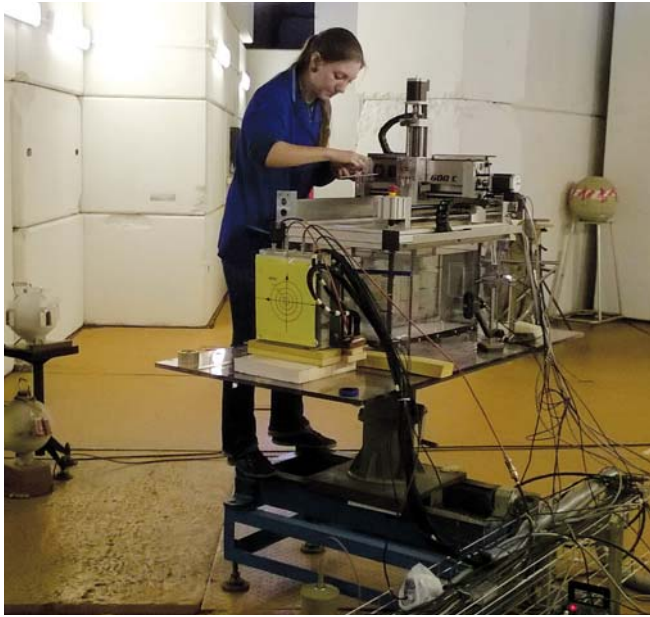


Рис. 5.3 Сотрудники МРНЦ, медицинский физик (слева) и радиобиолог (справа) устанавливают биообъекты в водном фантоме

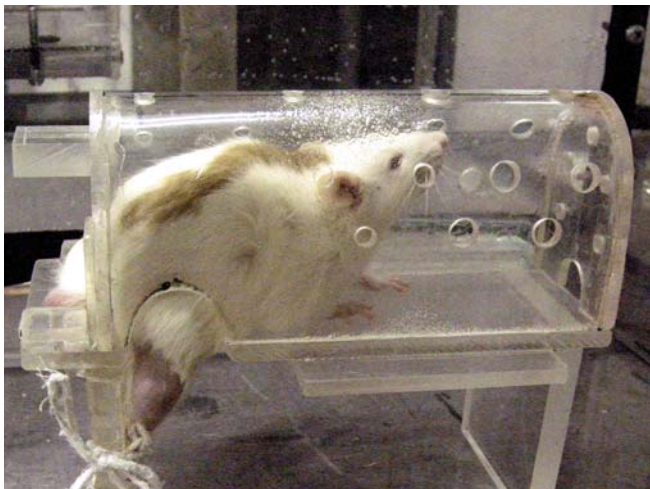


Рис. 5.4. Лабораторное животное, подготовленное к облучению ионами углерода на ВРБС



Рис. 5.5. Облучение лабораторного животного ионами углерода на 25 канале. Картинка с экрана телевизионного монитора.

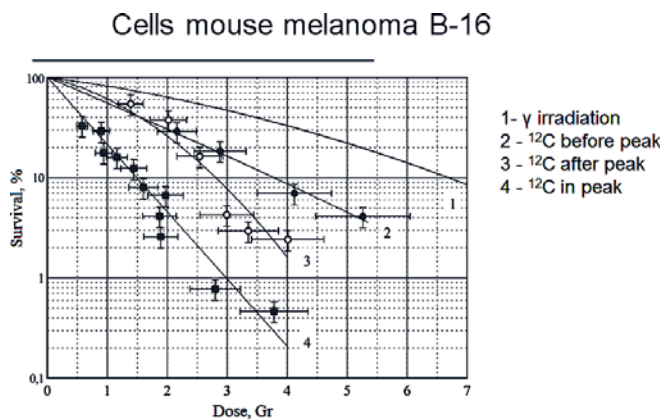


Рис. 5.6. Кривая выживаемости клеток мышинной меланомы B16

Таким образом, в ГНЦ ИФВЭ уже создана реальная возможность проведения совместно с медиками МРНЦ и других медицинских центров необходимых радиобиологических и медицинских исследований для наработки методик лечения пучком ионов углерода.

6 Медицинский комплекс ЦИЛТ

6.1 Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф.Цыба

Ускорительный комплекс, позволяющий ускорять и выводить в процедурные помещения пучки ионов углерода – это сложный и совершенный инструмент, который функционально подобен хирургическому скальпелю. Однако для того, чтобы успешно применять такой «скальпель» требуются высококвалифицированные медики и биологи, работающие в хорошо оснащенном медицинском учреждении.

К счастью, такое медицинское учреждение, недалеко от Протвино в г.Обнинске имеется – это Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф.Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский радиологический центр» (далее для краткости МРНЦ).

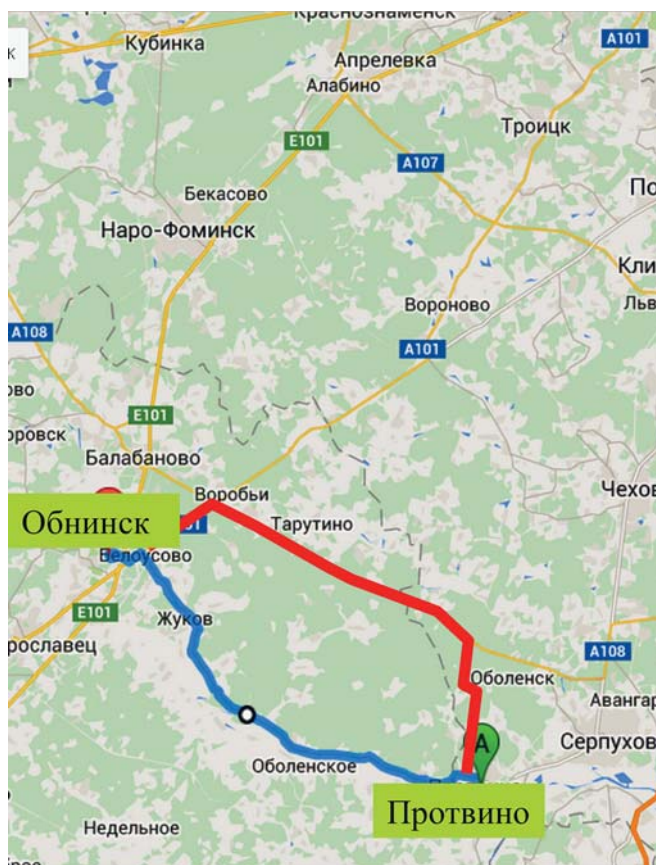


Рис. 6.1.1. Схема транспортных связей городов Протвино и Обнинск

Города Обнинск и Протвино удобно расположены (50 км по неперегруженной дороге, меньше одного часа езды, две возможные трассы), что позволяет оперативно перемещать пациентов между госпиталем и лучевым центром (Рис.6.1.1).

В МРНЦ были проведены радиобиологические исследования и выработка методик лечения первых пациентов на действующих сегодня протонных лучевых установках в Объединенном Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ, г. Дубна), в ИТЭФ (г.Москва) и в ИЯФ (г.Троицк).

В 2016 году в МРНЦ введен в строй первый в России компактный протонный терапевтический комплекс на базе протонного синхротрона, изготовленного в г.Протвино в Физико-техническом центре ФИАН.

МРНЦ имеет развитую исследовательскую и лечебную радиологическую базу, ведет лечение пациентов лучевыми (гамма, электроны, нейтроны, протоны), фармпрепаратами, химиотерапевтическими и хирургическими методами.

В стационаре МРНЦ ежегодно проходят обследование и лечение свыше 5000 больных, из них около 70% с новообразованиями.

МРНЦ – единственный в России медицинский центр, обладающий практическим опытом протонной и нейтронной терапии, что позволяет специалистам этого центра в полном объеме оценивать проблемы, связанные с внедрением ионной лучевой терапии.

МРНЦ имеет большой комплекс диагностического и лабораторного оборудования:

- несколько компьютерных томографов;
- ЯМР томограф;
- современные гамма камеры;
- ультразвуковые аппараты;
- радиоизотопное диагностирование и др.

Фактически, сегодня МРНЦ является не только научным радиологическим учреждением, но и крупным радиологическим госпиталем (400 коек).

МРНЦ был и остается основной базой в нашей стране для отработки различных новых технологий лучевой терапии.

Объединением усилий физиков и ускорительщиков ИФВЭ, а также медиков и биологов МРНЦ в создании Центра ионной лучевой терапии достигается сочетание необходимых составляющих – это:

- ускорительный комплекс ИФВЭ,

- радиологический госпиталь МРНЦ с возможностями диагностирования,
 - необходимые площади для амбулаторного и стационарного отделений,
 - квалифицированный персонал ИФВЭ и МРНЦ.
- Все это должно обеспечить только высокий уровень научных исследований и лечения на пучках ионов углерода в ЦИЛТ, но и существенную экономию средств.

6.2 Этапы проекта ЦИЛТ

Проект ЦИЛТ предлагается реализовать в 2 этапа:

На первом этапе (2014-2018 г.г.) предполагается создание полномасштабного канала ионов углерода, радиобиологического стенда и одного клинического медицинского каньона. Завершением первого этапа является первый пациент, прошедший курс лечения на пучке углерода в ИФВЭ. Стоимость первого этапа – 500 млн. руб.

На втором этапе (2018-2020 г.г.) предполагается создание экспериментально-клинического центра ионной лучевой терапии (Рис. 6.2.1) с пропускной способностью до 800 пациентов в год.

Основные задачи второго этапа:

1. Создание комплекса медицинских углеродных пучков в составе:

- 2 горизонтальных пучка;
1 пучок под углом 45° в вертикальной плоскости;
3 медицинских каньона.
2. Медицинская зона для подготовки пациентов в здании 8, прилегающем к экспериментальному залу.
3. Стационарное отделение (30 коек) для пациентов, требующих постоянного медицинского наблюдения.
4. Диагностический блок.

В 2012-2013 г.г. ГНЦ ИФВЭ совместно с НИИЭФА (г. С. Петербург) были разработаны основные магнитооптические элементы для регулярной части медицинских и радиобиологических каналов ЦИЛТ.

Стоимость второго этапа – 1 000 млн. руб.

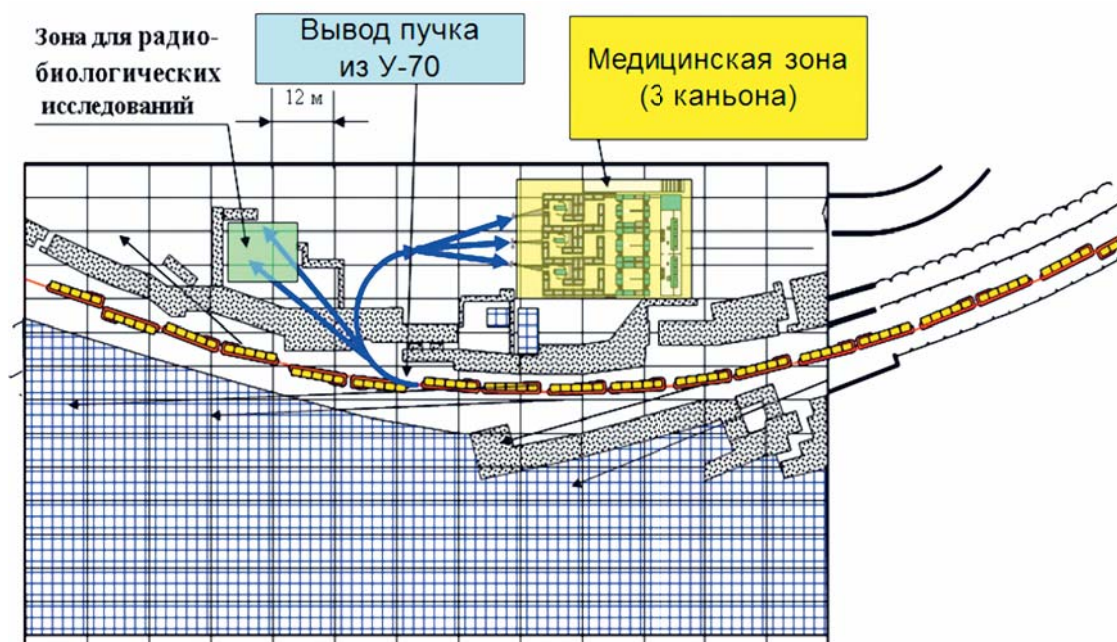


Рис. 6.2.1 Полномасштабный вариант экспериментально-клинического центра ионной лучевой терапии на базе ускорительного комплекса У-70

Очевидно, что второй этап может быть реализован лишь при серьезной поддержке на федеральном уровне.

7 Первая очередь ЦИЛТ

Цели и задачи 1 очереди

Из всего проекта предлагается выделить первую очередь для практической наработки методики лечения, чтобы на следующем этапе использовать полученный опыт для создания специализированных больших ионных лучевых установок.

С этой целью в 2016 году в ГНЦ ИФВЭ был подготовлен проект – предложение для программы Фарма 2020. Проект-предложение был направлен в НИЦ КИ для включения в программу Фарма 2020.

Проект называется «Техническое перевооружение части инфраструктуры ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино) под создание 1 очереди экспериментально-клинического Центра ионной лучевой терапии (ЦИЛТ) на базе существующего укорительного комплекса с медицинским соисполнителем МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала НМИРЦ Минздрава России (г.Обнинск)»

Целью указанного Проекта является освоение технологии лечения пучком ионов углерода радиорезистентных онкологических новообразований и создание опытной экспериментально-клинической однокабинной лучевой установки с пропускной способностью до 200 пациентов в год.

При этом надо осознавать, что существующая инфраструктура ГНЦ ИФВЭ позволяет на следующем этапе расширить Центр еще на 3 процедурные кабины (с полной пропускной способностью Центра до 1000 пациентов в год).

Ниже перечислены задачи, которые необходимо решить при сооружении первой очереди (однокабинная лучевая установка):

1. Создание электромагнитной системы формирования равномерного поперечного дозного поля с максимальным размером 20x20 см² с неоднородностью не более 5%. Планируется создать эту систему в 2017 году.
2. Разработать и создать (или закупить при достаточном финансировании) кресло и стол для

облучения пациента с прецизионной регулировкой по 6 степеням свободы.

3. Разработать и создать детекторы диагностики пучка и минимальный набор дозиметрического оборудования:

- ионизационные камеры общей интенсивности пучка;
- падовая ионизационная камера на 256 каналов;
- система видеонаблюдения (и записи) профилей пучка и зоны ВРБС;
- интегрирующие дозиметры ионизирующего излучения с нейтронным каналом для персонала установки (3-5 шт.);
- ТЛД дозиметрия со своей считывающей установкой;
- клинический дозиметр для углеродного пучка.

4. Создать лазерную систему позиционирования мишени:

- закупка трех лазерных излучателей и сопутствующего оборудования.

5. Создать рентгеновскую систему позиционирования:

- приобретение и ввод в работу цифрового рентгеновского аппарата и средств управления.

6. Разработка программного обеспечения системы планирования облучения:

- модуль работы с 3D объектами и рабочее место врача;
- модуль физических расчётов дозового распределения для выбранной геометрии облучения;
- модуль управления станками ЧПУ для изготовления коллиматоров и болюсов.

7. Разработка программного обеспечения управления каналом 25 и установкой ВРБС (считывание всех сигналов систем управления каналом и установкой, управление оборудованием, архивация, диагностика и т.д.).

8. Создание комплекса аппаратуры для активного изменения энергии ионного пучка. Предпо-

лагается активно менять энергию ионов углерода в U-70 в диапазоне 200÷450 МэВ/нуклон и выводить в канал №25 семь фиксированных энергий.

9. Монтаж медицинской зоны в экспериментальном зале 1БВ, радиобиологического стенда и

одного медицинского каньона. Капитальный ремонт частей зд. 1БВ и зд. 8 для создания медицинской подготовительной инфраструктуры.

На рис. 7.1 представлена схема размещения оборудования для первой очереди ЦИЛТ.

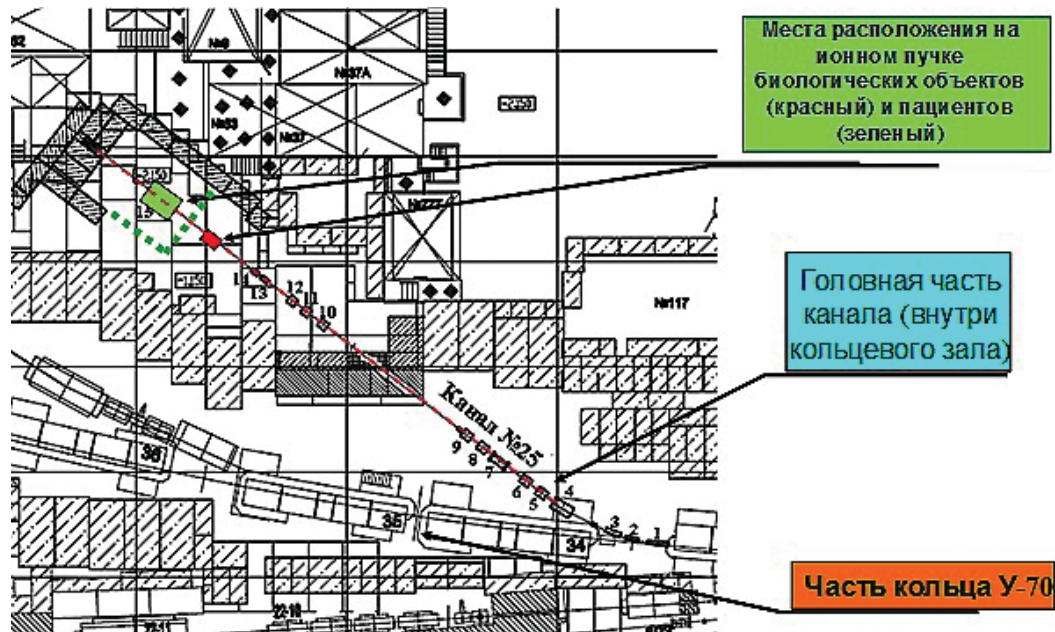


Рис. 7.1. Размещение оборудования для первой очереди ЦИЛТ

8 Облучение пациентов

8.1 Планируемый поток пациентов

При оценке возможного максимального планируемого потока пациентов в Центре ионной лучевой терапии будем исходить из следующего годового графика работы ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ:

- комплекс работает на фундаментальные исследования 2 сеанса в год;
- продолжительность сеанса для фундаментальных исследований – 1,5 месяца;
- остановки на большие праздники – 2 раза по 0,5 месяца (в январе и мае);
- остановка на профилактику – 2 месяца в год;
- все оставшееся время (6 месяцев) ускоритель работает с пучком ионов углерода с максимальной кинетической энергией 450 МэВ/нуклон;
- потребителями углеродного пучка в этом режиме будут: медицина, радиобиология, физика.

График работы ускорителя в этой «медицинской» моде (6 месяцев) будет:

- 6 рабочих дней в неделю на медицину по 12 часов в день (2 смены по 6 часов; с 8 до 20 часов);
- ночное время и выходной (воскресенье) – работа на радиобиологию, физику, профилактические работы.

1) C-ion RT is successful in the not treatable by other means

- Advanced Head & Neck cancers
- Large skull base cancers
- Inoperable sarcoma
- Post-op recurrent rectal cancer
- Re-irradiation after photon radiotherapy

All 16 fractions
In 4 weeks

2) Promising results are obtained in C-ion hypofractionated RT

- Lung cancer (Single irradiation)
- Liver cancer (Two fractions)
- Pancreatic cancer (8-12 fractions)
- High risk prostate cancer (16 fractions)

Рис. 8.1. Данные о количестве фракций, используемых при лечении различных онкологических заболеваний в последнее время в центре HIMAC, Chiba (Япония)

Полное время работы на медицину в год при этом составит:

$$26 \text{ недель} \times 6 \text{ дней} \times 12 \text{ часов} = 1872 \text{ часа.}$$

В ЦИЛТ будут 3 медицинских каньона +1 экспериментально-клинический. Предположим, что время процедуры облучения (укладка, облучение) составит 30 минут (в Японии – 20 минут).

Это означает, что в 1 час будет совершаться 8 процедур. С учётом вышесказанного полное количество процедур (фракций) в год после начального периода «запуска» ЦИЛТ составит $1872 \text{ часов} \times 8 \text{ фракций в час} = 14\,976 \text{ фракций в год.}$

Отечественный опыт ионной лучевой терапии отсутствует, поэтому для определения проектной пропускной способности ЦИЛТ воспользуемся современной информацией о количестве применяемых фракций в центре HIMAC, Chiba (Япония) и предположим, что и в ЦИЛТ со временем будет освоена аналогичная технология лечения.

На Рис. 8.1 представлены данные о количестве фракций, используемых при лечении различных онкологических заболеваний в последнее время в этом центре.

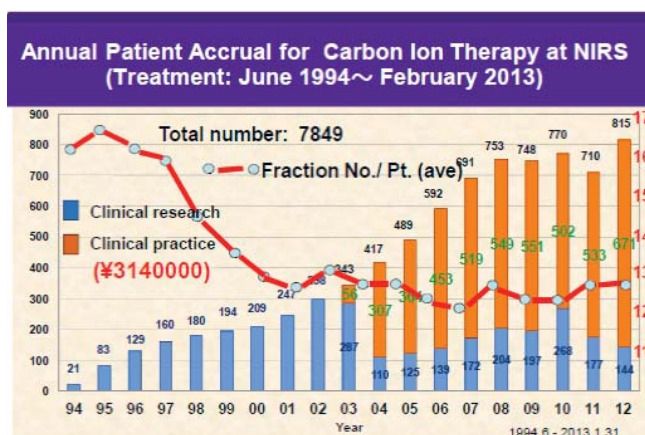


Рис. 8.2 Годовые изменения количества пролеченных пациентов и средних значений фракций на пациента в центре HIMAC, Chiba (Япония).

Из Рис. 8.1 видно, что в зависимости от вида онкологии количество фракций меняется от 16 (максимум) до одной.

На Рис. 8.2 есть кривая, показывающая годовые изменения среднего количества фракций в центре HIMAC, Chiba (Япония) в течение времени (за последние 20 лет).

Из Рис. 8.2 видно, что за последние 10 лет среднее количество фракций практически не менялось и находится на уровне 12-13.

Будем и в наших расчетах полагать, что в ЦИЛТ после освоения методики углеродной лучевой терапии среднее количество фракций будет находиться на уровне 13 фракций. Тогда проектная пропускная способность ЦИЛТ составит

$$14\ 976 : 13 = 1152$$

Итак, оценка максимальной проектной пропускной способности ЦИЛТ составляет ≈ 1000 пациентов в год для 4-х кабинного комплекса и ≈ 200 для однокабинного.

8.2 Оценка стоимости лечения

При оценке стоимости облучения пациентов, проходящих лечение в МРНЦ или направляемых на облучение из МРНЦ) на ускорителе в Протвино при расчете стоимости курса ионной терапии необходимо учитывать:

- затраты МРНЦ на проведение планирования терапии, укладки и фиксации пациентов и т.п. при многофракционированном облучении (не менее 200 000 рублей за одного пациента);
- при стационарном лечении пациентов – затраты на размещение пациентов в палатах МРНЦ, затраты на транспортировку пациентов с бригадой врачей из Обнинска в Протвино (50 км) (не менее 100 000 рублей за одного пациента);
- при амбулаторном лечении пациентов – затраты на транспортировку бригады врачей из Обнинска в Протвино (50 км) (не менее 50 000 рублей за одного пациента);
- затраты ГНЦ ИФВЭ на обслуживание ускорительного комплекса для обеспечения бесперебойного облучения потока пациентов (не менее 300 000 рублей за одного пациента).

Медицинский соисполнитель проекта – МРНЦ им. А.Ф. Цыба обладает всеми необходимыми компетенциями, разрешением на проведение клинических испытаний новой медицинской техники для лучевой терапии, а также стабильным потоком пациентов, из которых ≈ 1000 пациентам может быть показана ионная терапия.

Пациенты для облучения на созданной в результате реализации первой очереди ЦИЛТ лучевой углеродной установке будут определяться медицинскими радиологами МРНЦ (г. Обнинск).

В 2016 году МРНЦ приступил к лечению пациентов на собственном протонном ускорителе. Получаемый опыт работы сотрудников МРНЦ на протонном пучке, безусловно, позволит успешно освоить методики лечения и углеродным пучком как обычных, так и резистентных онкологических образований.

Реализация первой очереди ЦИЛТ при имеющихся наработках на углеродном пучке ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ оценивается при достаточном и своевременном финансировании в 2-3 года.

Ориентировочная стоимость услуги лечения одного пациента в центре ионной лучевой терапии составляет от 650 000 рублей.

В настоящее время, в соответствии с «Дорожной картой» развития ядерной медицины в России, разрабатываются предложения для Минздрава России по тарифам на протонно-ионную терапию для оплаты квот высокотехнологической медицинской помощи.

Возможно коммерческое оказание услуг по ионной терапии на основе действующего соглашения о взаимодействии между МРНЦ и ИФВЭ, в т.ч. для пациентов из стран СНГ, а также из-за границы. Такое коммерческое оказание услуг может быть реализовано по схеме хозяйствующего общества (ИФВЭ – МРНЦ - ИНВЕСТОР). Первые оценки годового оборота такой компании представлены в Таблице 8.2.1 и выглядят вполне привлекательными для потенциальных инвесторов (особенно на Этапе 2).

№№	Статьи затрат	Этап 1 (200 пациентов) 2019-2020 годы			Этап 2 (800 пациентов) 2021 год и далее		
		Всего	распределение по хозяйству		Всего	распределение по хозяйству	
			ИФВЭ	МРНЦ/и инвестор		ИФВЭ	МРНЦ/и инвестор
1	2	4	5	6	7	8	9
1	ФОТ	23,7	16,3	7,4	50,9	35,1	15,8
2	Отчисления в страховые фонды	7,2	4,9	2,3	15,4	10,6	4,8
3	Стоимость электроэнергии	29,6	29,3	0,3	32,8	32,3	0,5
4	Аренда помещений	2,3	2,3	-2,3	4,5	4,5	-4,5
5	Амортизация	24,0	2,5	21,5	90,0	10,0	80,0
6	Расходные материалы	2,0	1,0	1,0	8,0	4,0	4,0
7	Прямые затраты	86,4	56,3	30,1	197,0	96,4	100,6
8	Накладные расходы	32,3	11,3	21,0	78,8	38,5	40,3
9	Итого себестоимость	118,7	67,6	51,1	275,8	134,9	140,9
10	Прибыль	5,8	0,7	5,1	83,4	27,0	56,4
11	Итого полная себестоимость	124,5	68,3	56,2	359,1	161,9	197,2
12	НДС, (18%- ИФВЭ): (10% -медики)	17,9	12,3	5,6	48,8	29,1	19,7
13	Полная стоимость лечения потока пациентов (в год)	142,4	80,6	61,8	408,0	191,1	216,9

Ориентировочная средняя стоимость лечения пациента на коммерческой основе (для нерезидентов РФ) составит (млн. руб.)

Средняя стоимость лечения пациента (млн. руб.)	0,71	0,40	0,31	0,51	0,24	0,27
---	------	------	------	------	------	------

Таблица 8.2.1

9 График сооружения первой очереди

Оценка необходимых объемов финансирования (в ценах 2016 года)

Наименование мероприятия	Начало	Окончание	Стоимость, млн. руб.			
			2017	2017	2017	Итого
Создание 1 очереди экспериментально-клинического Центра ионной лучевой терапии на базе ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино) с медицинским соисполнителем – МРНЦ им. А.Ф.Цыба – филиала НМИРЦ Минздрава России	2017	2019	275	210	65	550
1. Работы по адаптации и автоматизации ускорительного комплекса под создание 1-кабинной лучевой установки на углеродном пучке (включая закупку и создание пучкового диагностического оборудования)	2017	2019	40	30	20	90
2. Дооснащение канала транспортировки пучка ионов углерода магнитооптическим оборудованием	2017	2019	50	30	10	90
3. Закупка промышленных и специализированных источников питания для магнитной оптики канала	2017	2019	30	30	10	70
4. Закупка медицинской техники: стол и кресло для укладки пациента, управляемые коллиматоры, средства иммобилизации, система планирования облучения.	2017	2018	60	50		110
5. Доклинические, физико-дозиметрические исследования, разработка программного обеспечения ЦИЛТ, включая систему планирования. Утверждение методик лечения в Минздраве России.	2017	2019	25	25	15	65
6. Закупка сертифицированного дозиметрического оборудования	2017	2018	25	15		40
7. Монтаж медицинской зоны в экспериментальном зале 1БВ, радиобиологического стенда и одного медицинского каньона	2017	2018	15	10		25
8. Капитальный ремонт частей зд. 1БВ и зд. 8 для создания медицинской подготовительной инфраструктуры.	2017	2019	30	20	10	60

Оценка необходимых объемов финансирования (млн. руб.)

Мероприятия		
Техническое перевооружение части инфраструктуры ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино) под создание 1 очереди экспериментально-клинического Центра ионной лучевой терапии (ЦИЛТ) на базе существующего ускорительного комплекса с медицинским соисполнителем МРНЦ им. А.Ф. Цыба - филиала НМИРЦ Минздрава России (г. Обнинск)	НИОКР	105
	СМР	85
	Оборудование	220
	Медицинская техника	110
	Прочее	30
Итого		550

Заключение

Проект ЦИЛТ на базе ускорительного комплекса ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» с медицинским сопровождением МРНЦ им. А. Ф. Цыба объективно является самым реальным и близким по срокам реализации «углеродным» проектом в России.

Создание ЦИЛТ позволит отработать и внедрить перспективную методику лечения пучком ионов углерода, а также разработать в тесном сотрудничестве медицинского и физического сообществ проект для тиражирования с оптимальными медико-физическими и стоимостными параметрами.

В итоге Россия выйдет в число стран, представляющих своим гражданам передовую и эффективную методику лечения онкологических заболеваний.

ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» и МРНЦ им. А. Ф. Цыба за прошедшие годы прошли значительный путь, решили практически все ускорительные проблемы и создали предпосылки для перехода к клиническому использованию углеродного пучка.

Следует отметить, что этап освоения новой современной методики лучевой терапии, в котором используется оборудование физического научного центра, первоначально предназначенного в основном для решения фундаментальных и прикладных физических задач, является логичным и поддерживается научной общественностью.

Именно таким образом осваивалась методика ионной лучевой терапии в США, Японии, Германии, Китае, также ранее происходило освоение методики протонной лучевой терапии и в нашей стране (ОИЯИ, ИТЭФ, ПИЯФ).

Реализация первой очереди ЦИЛТ позволит освоить технологию лечения наиболее сложных (резистентных) раковых опухолей, приступить к поточному лечению пациентов углеродным пучком, практическому обучению лучевых терапевтов и выработать оптимальные технические и медицинские требования к типовому клиническому ионному центру для разработки и широкого внедрения в России.



НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
Россия, 142281, Протвино, Площадь науки, дом 1
www.ihep.ru