



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–52

ОУ У-70

Ю.М. Антипов, Н.Е. Анферов, В.А. Батарин, А.В. Василевский, Ю.П. Горин,
А.С. Гуревич, В.В. Давыдов, Ю.Г. Каршев, Г.Ф. Кузнецов, А.П. Мальцев,
С.И. Пилипенко, В.И. Столповский, В.А. Тепляков, Е.Ф. Троянов, Н.Е. Тюрин,
Ю.С. Федотов, Б.А. Фролов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино

В.П. Белов, А.Ю. Константинов, Б.В. Рождественский, Ю.П. Севергин, И.А. Шукейло
НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург

Ю.С. Дмитриенко, В.Е. Ключ, А.Г. Коноплянников, Ю.С. Мардынский, А.Ф. Цыб
Медицинский радиологический научный центр Российской АМН, Обнинск

РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ ЦЕНТРА ПРОТОН-ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В ИФВЭ

Представлено на X Международном совещании
по применению ускорителей заряженных частиц
в промышленности и медицине “УСКОРИТЕЛИ-
2001”, Санкт-Петербург, 1-4 октября 2001 г.

Протвино 2001

Аннотация

Антипов Ю.М., Анферов Н.Е., Батарин В.А. и др. Работы по созданию центра протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2001-52. Протвино, 2001.— 9 с., 7 рис., 3 табл., библиогр.: 5.

Пучки протонов и особенно ионов углерода являются наиболее совершенным инструментом для лечения онкологических заболеваний.

В 1998-2000 гг. сотрудниками ИФВЭ и Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ) в г. Обнинске был разработан проект центра протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ, предполагающий модернизацию существующего ускорительного комплекса ИФВЭ для создания медицинских пучков протонов и ионов углерода.

В данной работе приводятся параметры модернизированного ускорительного комплекса ИФВЭ и сообщается текущее состояние дел по его созданию.

Abstract

Antipov Yu.M. Anferov N.E., Batarin V.A. et al. Proton-Ion Beam Therapy Facility at IHEP: IHEP Preprint 2001-52. — Protvino, 2001. — p. 9, figs. 7, tables 3, refs. : 5.

Vast clinical radiotherapy experience has proved that proton and especially carbon ion beams are the most effective way for cancer treatment.

The parameters of IHEP proton buster synchrotron are very close to the ones optimal for proton-carbon ion beam therapy. proton beam intensity available in present time is substantially more than needed for medical purposes. A modified 100 MeV linac will be used for carbon ions injection to buster synchrotron. Proton and carbon ion beams extracted from buster will then be accumulated in the U-70 synchrotron, that will be use as a storage ring. The beam from the U-70 can be extracted to numerous medical treatment areas placed in one of the experimental halls.

In this report the parameters of modernized accelerator complex and present status of works in this direction are presented.

Введение

Клинические исследования в области лучевой терапии, выполненные в последнее время, доказали, что пучки протонов и особенно ионов углерода являются наиболее совершенным инструментом для лечения онкологических заболеваний. За рубежом планируется создание 6 новых специализированных центров, в которых совместно будут использоваться пучки протонов и ионов.

В составе ускорительного комплекса ИФВЭ (г. Протвино) имеется кольцевой протонный ускоритель (бустер), параметры которого близки к оптимальным для ускорения ионов углерода. Выведенные из бустера пучки протонов или ионов углерода могут быть накоплены в кольцевом ускорителе У-70, а затем выведены в один из экспериментальных залов, в котором можно будет разместить несколько медицинских процедурных помещений. Недалеко от Протвино, в Обнинске, много лет работает Медицинский радиологический научный центр (МРНЦ), имеющий хорошую научную и клиническую базу.

В 1998–2000 гг. совместно сотрудниками ИФВЭ и МРНЦ был подготовлен проект центра протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ, предполагающий модернизацию существующего ускорительного комплекса ИФВЭ для создания медицинских пучков протонов и ионов углерода [1, 2]. В 2001 году к работам по разработке аппаратуры для данного проекта подключился НИИЭФА.

В данной работе дается краткое описание проекта модернизации ускорительного комплекса ИФВЭ и сообщается о текущем состоянии дел.

1. Краткое описание проекта модернизации ускорительного комплекса ИФВЭ

Энергии, интенсивности и способы вывода пучков протонов и ионов для лучевой терапии определяются клиническими требованиями, которые возникли в результате многолетних исследований во многих центрах [3]. Клинические задачи определяют необходимые технические требования к ускорительному комплексу (см. табл. 1).

Таблица 1. Основные технические требования к центру протон-ионной лучевой терапии.

	Протоны	Ионы углерода C ⁺⁶
Максимальная кинетическая энергия	220 МэВ	420 МэВ/нуклон
Максимальная магнитная жесткость [НР]	2,26 Т·м	6,53 Т·м
Вывод пучка из ускорителя	Медленный вывод	
Поперечные размеры пучка на мишени (FWHM)	~8 мм	~4 мм
Максимальная интенсивность пучка на мишени	$5 \times 10^9 \text{ сек}^{-1}$	$2 \times 10^8 \text{ сек}^{-1}$

Существующая в настоящий момент система инжекции протонов в 70–ГэВ протонный синхротрон ИФВЭ включает в себя протонный линейный ускоритель Урал-30 на энергию 30 МэВ и быстроциклирующий протонный синхротрон – бустер. Протоны, выведенные из линейного ускорителя Урал-30, инжектируются в бустер, где ускоряются до энергии 1,32 ГэВ. За 2 секунды в бустере последовательно ускоряются и затем инжектируются в протонный синхротрон 29 сгустков протонов, следующих с частотой ~16 Гц. Основные параметры бустера приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры бустера.

Периметр орбиты	99,16 м
Индукция магнитного поля	0,14÷1,2 Т
Магнитная жесткость	0,80÷6,85 Т·м
Энергия инжекции протонов	30 МэВ
Диапазон энергии ускоренных протонов	200÷1320 МэВ
Максимальная частота работы	16,6 Гц
Интенсивность протонов в импульсе	2÷9·10 ¹¹
Вакуум	10 ⁻⁷ Торр

В настоящее время минимальная энергия протонов, ускоряемых в бустере, 200 МэВ, что хорошо соответствует требованиям протонной лучевой терапии. Достигнутые интенсивности протонного пучка в бустере заметно превышают требуемые для протонной лучевой терапии.

Как видно из табл. 2, в конце цикла ускорения магнитная система бустера удерживает протоны, магнитная жесткость которых практически совпадает с требуемой для ускорения ионов углерода C⁺⁶ при энергии 420 МэВ/нуклон. Итак, магнитная система существующего в ИФВЭ ускорителя-бустера хорошо соответствует требуемой для ионной C⁺⁶ терапии. Хороший вакуум и высокий темп ускорения в бустере являются положительными факторами при ускорении многозарядных ионов.

Перевести линейный ускоритель ЛУ-30 на ускорение ионов углерода нельзя, поэтому нами рассматривается вариант инжекции ионов углерода C⁺⁶ в бустер из линейного ускорителя И-100.

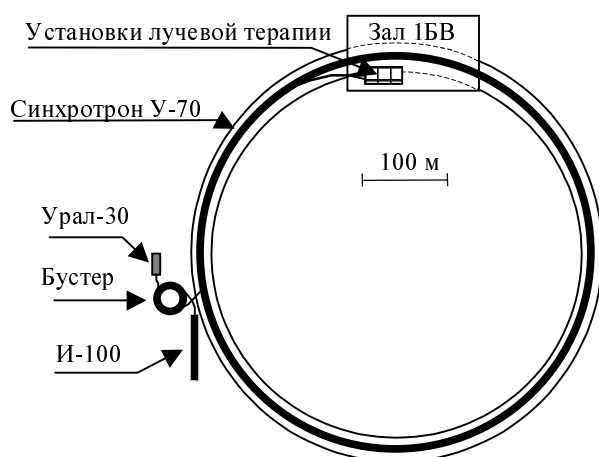


Рис. 1. Схема расположения ускорителей ИФВЭ и планируемых установок для лучевой терапии.

Последовательно все элементы планируемого модифицированного ускорительного комплекса включают: лазерный ионный источник; линейный ускоритель И-100; канал инжекции пучка ионов из И-100 в бустер; линейный ускоритель ЛУ-30; системы ввода пучка в бустер; ускоритель-бустер; канал вывода пучка в кольцевой ускоритель У-70; У-70, работающий в режиме накопителя; систему вывода пучка из У-70.

На рис. 1 показана схема взаимного расположения линейных ускорителей И-100 и ЛУ-30, кольцевого ускорителя-бустера, ускорителя У-70, экспериментального зала 1БВ и планируемых установок для лучевой терапии.

2. Экспериментальные исследования по ускорению легких ионов в линейном ускорителе И-100

2.1. Особенности ускорения легких ионов

Линейный ускоритель И-100 [4] был спроектирован и использовался вплоть до последнего времени 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 двукратного увеличения ускоряющего поля из-за ограничений как по мощности, так и по пробоям. Ускорение ионов можно реализовать, снизив темп ускорения в 2 раза. В этом случае при прохождении частицей ячейки ускоряющей структуры фаза ускоряющего поля изменяется не на 2π (как для протонов), а на 4π (ускорение на кратности $n = 2$). Эффективность ускорения при этом падает из-за уменьшения фактора пролетного времени (подробнее см. в работе [5]). 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 (на кратности $n = 2$ он составляет 0,707 от “стандартного” случая с кратностью $n = 1$). По расчету при неизменной фазе ускорения напряжения U_i во II и III резонаторах должны быть изменены при ускорении дейтронов и различных ионов углерода так, как указано в табл. 3, где U_p – номинальное значение электрического поля при ускорении протонов.

Таблица 3

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

Из табл. 3 видно, что ускорение ионов углерода с $Z = 5,6$ или дейтронов в II и III резонаторах возможно даже при пониженном напряжении, а иона углерода с $Z = 4$ – при допустимом форсировании. Однако в начальной части ускорителя (первые 15–20 трубок дрейфа I-го резонатора) там, где апертуры трубок дрейфа сравнимы с длиной трубок, фактор пролетного времени становится заметно меньшим. “Провисание” электрического поля внутрь 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. Этот неприятный эффект, существующий и при “стандартном” ускорении протонов, особенно сильно проявляется при ускорении ионов на повышенной кратности.

2.2. Экспериментальные исследования режима ускорения дейтронов на второй кратности

В 2000–2001 гг. 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, мы обнаружили области устойчивого и хорошо воспроизводимого ускорения дейтронов. Найденный характер поведения ускорителя оказался “нестандартным”, т.е. не соответствующим нашим первоначальным ожиданиям.

Зависимость коэффициента захвата при ускорении дейтронов (отношение тока на выходе ускорителя после магнитного анализатора к току на входе первого резонатора) от напряжения форинжектора показана на рис. 2. Так как в стандартном режиме энергия инжектируемых протонов равна 700 кВ, масса дейтрона в 2 раза больше протонной, а скорость дейтронов на второй кратности должна быть в 2 раза меньше, то ожидаемое оптимальное напряжение для дейтронов должно быть 350 кВ. Однако, как видно из рис. 2, при этом напряжении инъекции практически никакого захвата нет. В тоже время при существенно больших напряжениях инъекции четко выявляются многочисленные области захвата в ускорение, причем в первом значимом пике (около 390 кВ) коэффициент захвата достигает $\approx 20\%$. Такое “поведение” указыва-

ет на то, что оптимальным является захват не в самом начале ускорителя, а где-то в районе 3–4-й дрейфовой трубки. В таком режиме дейтроны практически без ускорения пролетают первые “неэффективные” промежутки.

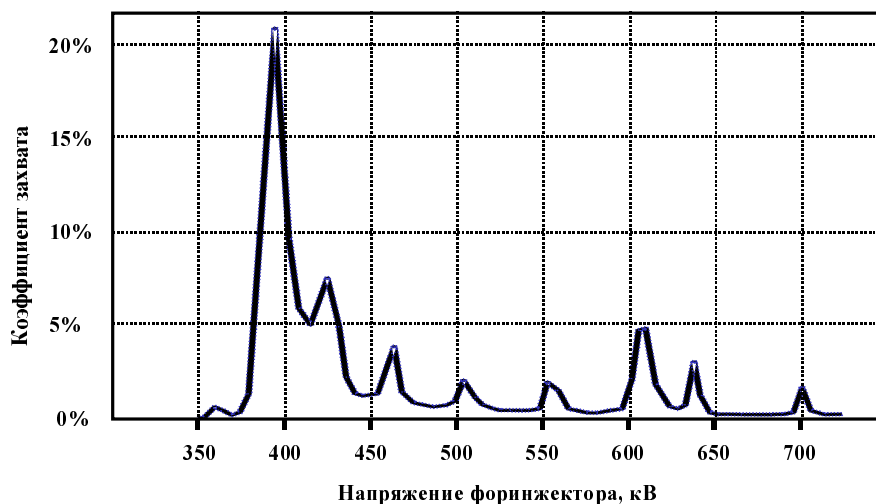


Рис. 2. Зависимость коэффициента захвата дейтронов от напряжения форнижектора.

Исследования выявили также необычную зависимость коэффициента захвата от уровня ускоряющего поля в первом резонаторе. В отличие от “стандартного” монотонного увеличения коэффициента захвата, которое должно происходить при увеличении поля U выше порога, обнаружилась резонансно-подобная зависимость, имеющая максимум при $U_i = 0,87U_p$. Также оказалось, что захват очень критичен к уровню фокусирующего магнитного поля. Уменьшение тока в дрейфовых трубках на 10% в сравнении с номинальным значением приводит к резкому падению интенсивности.

Изучение ускорения ионов дейтерия во втором резонаторе продемонстрировало, что после соответствующего подбора фазы ускоряющего поля во втором резонаторе получается устойчивый режим, слабо зависящий от уровня электрического поля U_i в пределах $0,7 \div 1,0 U_p$. Такое поведение следовало ожидать из вышеупомянутых теоретических оценок. Максимальный выходной ток ускоренных дейтронов составил ≈ 10 мА.

Полученные данные по ускорению дейтронов можно использовать для масштабных оценок режимов ускорения ионов углерода разных зарядностей в 1-м резонаторе. Эти оценки приведены в табл. 4, где V_i и V_p – номинальные значения фокусирующих магнитных полей при ускорении ионов и протонов.

Таблица 4

Ион	d, C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}
U_i/U_p	0,87	1,04	1,30
V_i/V_p	1	1,2	1,5

Как видно, для ионов углерода с $Z = 4$ и $Z = 5$ на кратности $n = 2$ напряжённости ускоряющего электрического и фокусирующего магнитного полей (U_i и V_i) в 1-м резонаторе нужно форсировать. Если для C_{12}^{+5} этот форсаж находится в пределах допустимых технических возможностей, то ускорять ионы углерода с зарядом $Z = 4$ невозможно.

Итак, экспериментальные исследования с ускорением дейтронов на второй кратности показали:

- ускоритель И-100 эффективно ускоряет дейтроны,
- в И-100 возможно ускорение ионов C_{12}^{+5} и C_{12}^{+6} .

2.3. Оптимизация лазерного ионного источника

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 лучше C_{12}^{+6} . Так как ионизационные потенциалы для этих состояний соответственно равны 393 и 490 эВ, то для их эффективного образования требуется плазма с температурой в диапазоне 500÷1000 эВ. Такая высокотемпературная плазма не может быть получена в ионном источнике с дуговым разрядом, и поэтому мы исследовали вариант лазерного ионного источника. В качестве источника лазерного излучения мы использовали газовый CO_2 лазер с длиной волны $\lambda \approx 10$ мкм и выходной энергией ~ 5 Дж. Лазер работает 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 состоит из оптической системы, фокусирующей лазерное излучение на мишень; мишенного механизма, позволяющего менять облучаемую точку мишени, и расширительного дрейфового промежутка. Лазерное излучение фокусируется на графитовой мишени сферическим Si 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. Осциллограммы импульсов тока для различных зарядовых состояний, разделяемых масс-спектрометром, показаны на рис. 3.

Видно, что в начальной части токового импульса (первые 5 мкс) основную часть составляют ионы с зарядом $Z = 5$. Ток ионов с зарядами $Z = 6$ значительно меньше. Причиной этого, вероятно, являются рекомбинационные процессы в плазме. Плотность тока для $Z = 5$ на расстоянии 1,3 м от мишени составила ~ 10 мА/см².

2.4. Ускорение ионов углерода в линейном ускорителе И-100

После изучения особенностей ускорения дейтронов, а также исследования и оптимизации лазерного ионного источника, нам впервые удалось получить устойчивое ускорение 5-зарядных ионов углерода в ускорителе И-100 летом 2001 года. Оптимальные значения напряжения инжекции и уровень ускоряющего ВЧ-поля в первом резонаторе оказались близкими к расчетным масштабным оценкам, основанным на данных по ускорению дейтронов. Без переделок системы питания фокусирующей системы дрейфовых трубок нам не удалось увеличить фокусирующее магнитное поле B_i до оптимального значения ($B_i = 1,2 B_p$). При $B_i = 1,1 B_p$, ионном токе на входе первого резонатора ≈ 40 мА, ток ионов C^{+5} на выходе ускорителя был равен $\approx 1,6$ мА. Осциллограммы токовых сигналов на

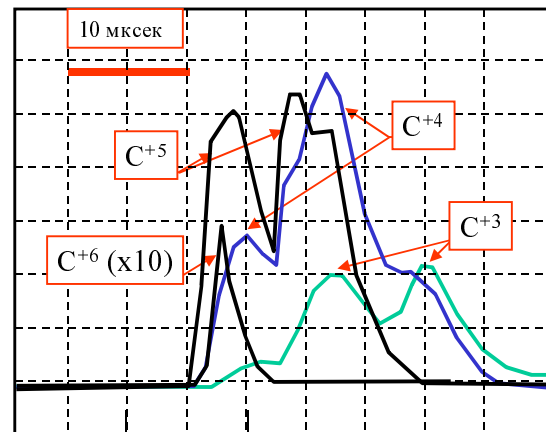


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока для различных зарядовых состояний, разделяемых масс-спектрометром.

входе в I резонатор И-100 и на выходе ускорителя показаны на **рис. 4**. Коэффициент захвата в этом варианте составил соответственно $\approx 4\%$. Меньшая величина захвата объясняется как неоптимальной магнитной фокусировкой, так и несовершенством входной оптики форинжектора при работе с лазерным ионным источником. Мы предполагаем внести должные технические изменения в соответствующие системы в ближайшее время.

Итак, экспериментально доказано, что в И-100 могут устойчиво ускоряться ионы углерода.

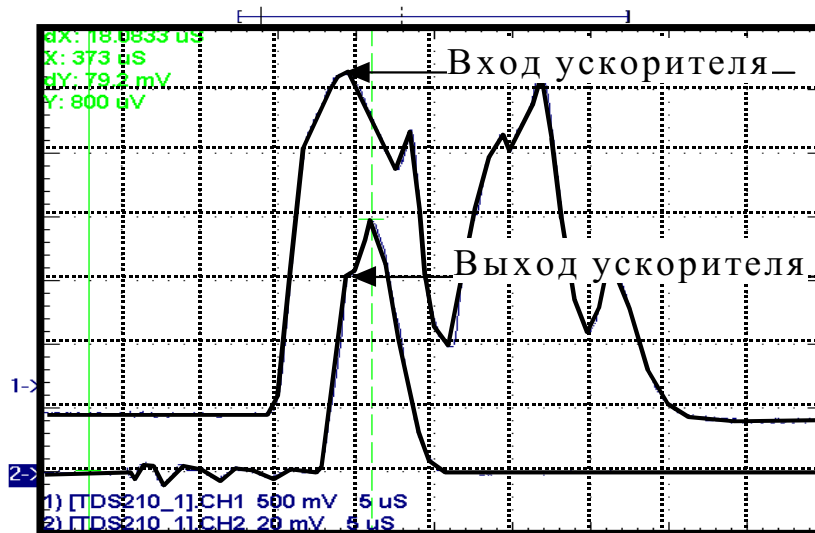


Рис. 4. Осциллограммы токовых сигналов ионов углерода на входе и выходе ускорителя И-100. Скорость развертки – 5 мкс на деление.

3. Проектирование канала перевода пучка из И-100 в бустер

В 2001 году в НИИЭФА совместно с ИФВЭ 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-м прямолинейном промежутке бустера. 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 показано на **рис. 5**.

Планируемый канал перевода пучка из И-100 в бустер (IV на **рис. 4**) включает 8 квадрупольных линз, 4 горизонтальных поворотных диполя и 2 вертикальных корректирующих диполя. 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. Два вертикальных корректирующих диполя (МКВ1 и МКВ2) в конце канала необходимы для посадки вводимого пучка на орбиту бустера. Квадрупольные линзы обеспечивают фокусировку пучка и согласование оптики и дисперсии на входе в бустер. Трасса канала проходит на высоте 1300 мм от уровня чистого пола.

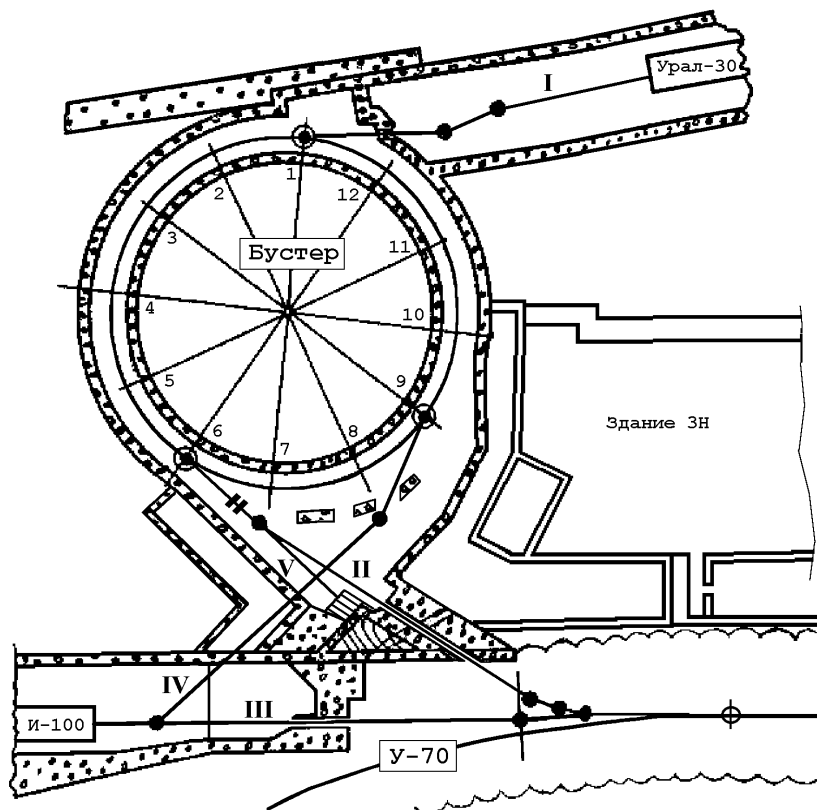


Рис. 5. Схема взаимного расположения бустера, линейных ускорителей Урал-30 и И-100, а также каналов перевода пучков в бустер и вывода пучка из бустера в У-70.

Графики огибающей пучка и дисперсии показаны на **рис. 6**, где также показано расположение двух стенок, через которые проходит трасса пучка канала. Кроме этого, трасса канала (на участке между квадрупольными линзами L5F и L6D) пересекается с каналом перевода пучка протонов из бустера в У-70 (канал II на **рис. 5**) и каналом сброса пучка на поглотитель (канал V). На этом участке организуется пересечение ионопроводов каналов с установкой шибберных затворов.

Трасса ввода пучка в бустер показана на **рис. 7**. Ввод пучка производится в горизонтальной плоскости в 9-й промежуток, под углом 184 мрад относительно орбиты бустера. При этом трасса ввода проходит мимо “щеки” блока 8M2 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. Длина септума предполагается ~0.5 м, толщина токовой перегородки 3 мм. Нож септума располагается на координате +55 мм так же, как у действующего вводного септум-магнита. На место блока 9M1 нужно установить блок с расширенной апертурой и, соответственно, с расширенной вакуумной камерой. Ударный бамп-магнит (УБМ) устанавливается 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 возможна не только однооборотная, но и достаточно эффективная двухоборотная инжекция.

Для настройки канала и контроля за параметрами пучка предусматривается установка измерителей профиля пучка в двух плоскостях: у линз L3F, L5F, L6D, L8D и на входе в септум-магнит, а датчика интенсивности пучка – на участке ввода (около линзы L8D).

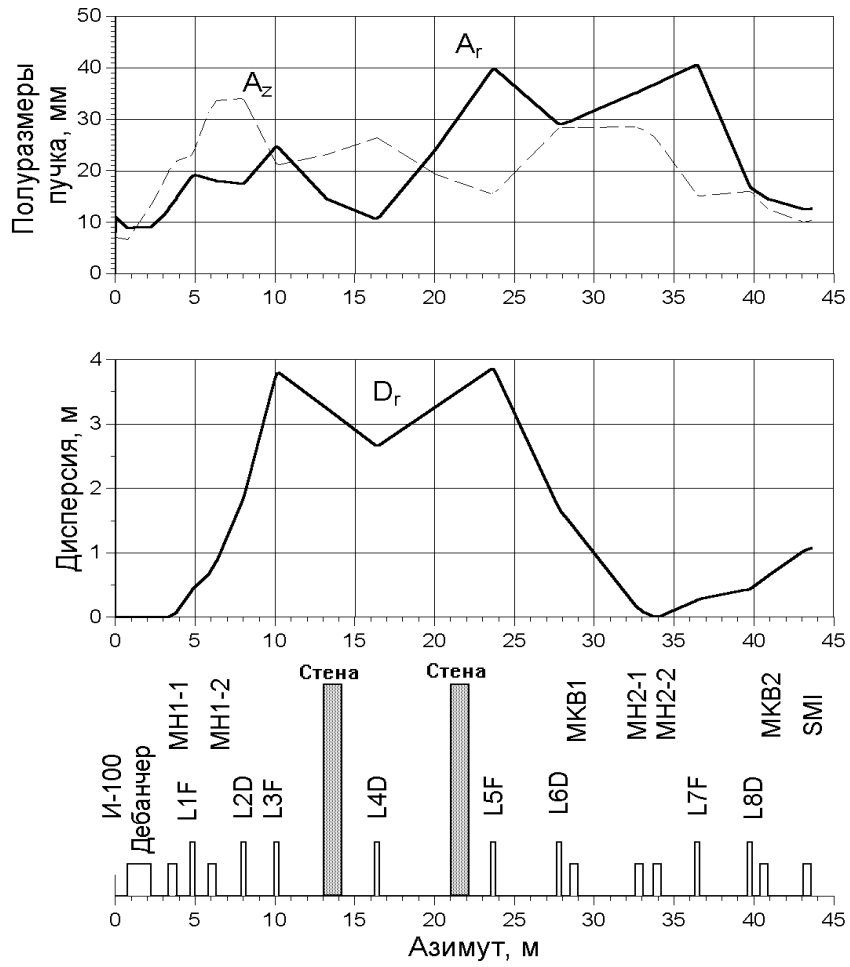


Рис. 6. Полуразмеры пучка и дисперсия в канале перевода пучка из И-100 в бустер.

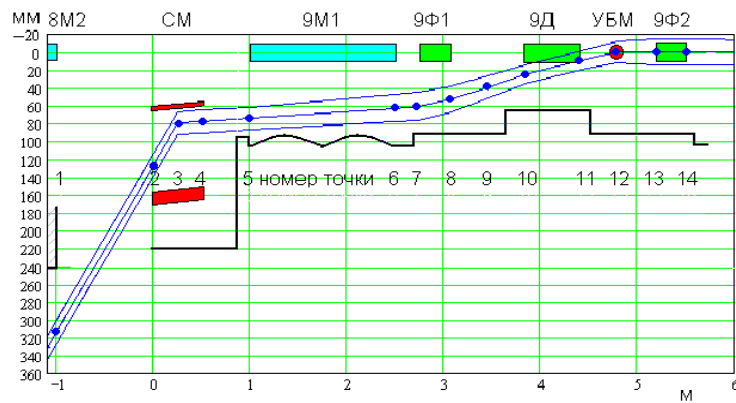


Рис. 7. Трасса ввода пучка в бустер.

Заключение

Многочисленными исследованиями в зарубежных и отечественных лабораториях доказано, что самым совершенным методом лучевой терапии онкологических заболеваний является терапия пучками протонов и особенно ионов углерода. Проектирование и строительство новых центров, сочетающих методы протонной и ионной лучевой терапии, ведется в Японии, Германии, Италии, Австрии и Китае.

1998–2000 гг. совместно сотрудниками ИФВЭ и МРНЦ был подготовлен проект центра протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ, предполагающий модернизацию существующего ускорительного комплекса ИФВЭ для создания медицинских пучков протонов и ионов углерода. Оценка стоимости создания центра ионной терапии на базе ИФВЭ и МРНЦ находится на уровне ~10% стоимости создания самостоятельного центра протон-ионной лучевой терапии.

В результате экспериментальных исследований на ускорителе И-100, выполненных в 2000–2001 гг. практически доказана возможность ускорения в нем дейтронов и ионов углерода.

В 2001 г. НИИЭФА совместно с ИФВЭ приступил к инженерному проектированию канала перевода частиц из ускорителя И-100 в бустер.

Планируемая дальнейшая модернизация И-100 и создание канала перевода пучка из И-100 в бустер позволят заметно расширить возможности ускорительного комплекса ИФВЭ.

Новые возможности ускорительного комплекса могут быть использованы как в прикладных целях, так и в фундаментальных исследованиях.

Список литературы

- [1] Ю.М.Антипов, А.В.Василевский, А.П.Воробьев и др. Медицинский облучательный центр с пучком ионов углерода на базе ускорительного комплекса ИФВЭ. Сборник докладов. XVI Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998. Том 2, с. 212.
- [2] Ю.М.Антипов, А.В.Василевский, А.П.Воробьев, А.С.Гуревич и др. Центр протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ. (Развитие проекта). Сборник докладов. XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000 .
- [3] Использование ускорителей заряженных частиц для протонной терапии. Доклад совещания группы советников. Документ F1-AD-1010. Международное агентство по атомной энергии, Вена, 7-10 июля 1998 г.
- [4] И.М.Капчинский, А.М.Мальцев, В.К.Плотников. Расчетные значения физических параметров линейного ускорителя И-100. – Препринт ИФВЭ 67-38. Серпухов, 1967.
- [5] Ю.М.Антипов, Б.А.Фролов, Ю.П.Горин, А.П.Мальцев, С.И.Пилипенко, В.А.Тепляков, В.С.Ваньев, А.В.Василевский. Ускорение ионов в линейном ускорителе И-100. Сборник докладов. XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000.

Рукопись поступила 11 декабря 2001 г.