

## **ПРОЕКТ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МЕДИЦИНСКОГО СИНХРОТРОНА ДЛЯ АДРОННОЙ ТЕРАПИИ**

*Е. М. Сыресин, В. А. Михайлов, А. В. Тузиков, Н. Н. Агапов,  
Е. Д. Донец, Е. Е. Донец, А. В. Елисеев, В. Н. Карпинский,  
А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, И. Н. Мешков, А. Г. Ольшевский,  
Г. В. Трубников, Г. Г. Ходжибагиян, Г. Д. Ширков, С. Г. Ширков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обсуждается проект сверхпроводящего медицинского синхротрона для углеродной терапии на энергию ионов 140–400 МэВ/нукл. Целью проекта является разработка и создание медицинского синхротрона на базе сверхпроводящих технологий, реализованных в ОИЯИ при сооружении ускорительного комплекса нуклотрона. Для инъекции ионов углерода в медицинский синхротрон предполагается использовать линейный ускоритель с переменной фазовой фокусировкой, а для облучения пациентов со всех направлений сверхпроводящее гантри с весом около 150 т.

The project of the superconducting medical synchrotron is discussed for the carbon treatment at an ion energy of 140–400 MeV/nucleon. The project goal is development and construction of the medical synchrotron on basis of the superconducting technology realized in JINR at creation of the acceleration complex Nuclotron. It is proposed to use the interdigital H-mode linear accelerator with alternating phase focusing for the ion injection in the synchrotron and the superconducting carbon gantry at a weight of 150 t for the patient irradiation treatment from any beam directions.

PACS: 29.20.dk; 87.56.bd; 87.53.Jw

### **ВВЕДЕНИЕ**

Адронная терапия пучками тяжелых ядерных частиц (протонов и ионов углерода) является наиболее эффективным направлением радиационной онкологии. Адронная терапия в России может дать существенные преимущества для 50 тысяч пациентов в год. При лечении онкологических заболеваний наибольшими возможностями обладают ионы углерода. Терапия ионами углерода особенно эффективна для пациентов с радиорезистентными опухолями.

Проект сверхпроводящего медицинского синхротрона [1] разработан в ОИЯИ для реализации углеродной терапии. В основе ускорителя лежат технологии, реализованные в ОИЯИ при сооружении сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ — нуклотрона [2, 3] (рис. 1, *а*). Сверхпроводящие прямоугольные дипольные магниты, аналогичные магнитам нуклотрона [2, 3] (рис 1, *б*), адаптированы для оптики медицинского синхротрона и каналов разводки пучков по трем медицинским кабинам. Использование сверхпроводящей

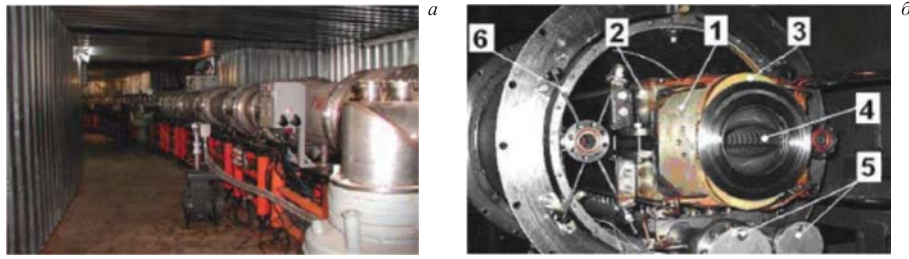


Рис. 1. а) Сверхпроводящий синхротрон ОИЯИ — нуклотрон; б) сверхпроводящие дипольные магниты нуклотрона

технологии позволяет заметно снизить энергопотребление и вес магнитной системы синхротрона и каналов транспортировки пучков. Ее реализация особенно принципиальна при создании гантри для ионов углерода. Первое такое гантри на теплых магнитах медицинского синхротрона НЕВТ (Германия) имеет вес около 600 т. В рамках проекта предполагается создать сверхпроводящее гантри с весом около 150 т.

### ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Сверхпроводящий электронно-лучевой ионный источник планируется использовать для инъекции ионов углерода  $^{12}\text{C}^{4+}$  в ионный линейный ускоритель. Электронно-лучевые источники, реализованные в ОИЯИ, широко используются в ведущих ускорительных центрах для получения высокозарядных ионов. Для снижения на два-три порядка мощности электронных пучков при близком суммарном заряде электронов в источнике в ОИЯИ предложен и реализован электронно-струнный ионный источник (ЭСИС) (рис. 2) [4]. В электронной пушке такого источника формируется электронный пучок с малым током порядка 1 мА, энергией электронов 2–4 кэВ и мощностью  $\sim 5$  Вт. С помощью специального электрода электроны в нем отражаются от потенциального барьера рефлектора и снова возвращаются в источник. В результате они совершают несколько сот продольных осцилляций через электронно-оптическую систему источника, прежде чем покидают его в поперечном направлении. В источнике формируется плотное плазменное образование осциллирующих электронов — линейная электронная струна. В ЭСИС сформированы интенсивные пучки многозарядных ионов, таких как  $\text{C}^{6+}$ ,  $\text{Ar}^{16+}$  и  $\text{Fe}^{24+}$ , с током около 200 мкА при длительности импульса 8 мкс [4].

ЭСИС дополнительно может быть использован для формирования первичных радиоактивных пучков ионов углерода  $^{11}\text{C}^{4+}$  [5], получаемых из радиоактивного метана  $^{11}\text{CH}_4$ , нарабатываемого с помощью внешнего 18 МэВ-ного протонного циклотрона. Интенсивные радиоактивные пучки ионов углерода  $^{11}\text{C}^{4+}$  могут быть использованы для углеродной терапии и одновременно для верификации дозы в опухоли с помощью позитронно-эмиссионной томографии [5].

Согласование пучка с аксептансом линейного ускорителя осуществляется оптической системой канала инъекции из ионного источника: анализирующим магнитом, соленоидом и тремя квадрупольными линзами.

В качестве инжектора углеродных пучков в синхротрон предполагается использовать линейный ускоритель ИН (Interdigital H-mode) с переменной фазовой фокусировкой [6],



Рис. 2. Электронно-струнный источник ионов углерода ОИЯИ

разработанный фирмой «Сумитомо» (Япония) для комплексов углеродной терапии. Линейный ускоритель [6] состоит из двух подсистем: RFQ — ускорителя и ИЛ — линейного ускорителя. В линаке могут быть ускорены ионы с заряд-массовым отношением  $Z/A < 1/3$ . RFQ ускоряет ионы  $C^{4+}$  до энергии 600 кэВ/нукл. и группирует пучок. Эмиттансы пучка, выведенного из RFQ с помощью квадрупольного триплета, согласованы с параметрами ИЛ-лиака. Для RFQ используется обычная четырехсекционная структура, работающая на частоте 200 МГц, при длине резонатора 2 м и его диаметре 0,3 м. Мощность RFQ составляет 120 кВт. Эффективность транспортировки пучка в нем равна 80%. Поперечная фокусировка в ИЛ-лиаке осуществляется методом переменной фазовой фокусировки ВЧ-структурой, внутри дрейфовой камеры нет других дополнительных фокусирующих элементов. По сравнению с линейными ускорителями ионов другого типа он имеет заметно больший градиент ускорения. Длина ВЧ-резонатора ИЛ-лиака составляет 3 м, его диаметр равен 0,3 м, внутренний радиус дрейфовой камеры 6 мм, в нем установлено 60 ускоряющих электродов, максимальное напряжение на ускоряющем зазоре составляет 440 кВ, максимальное электрическое поле на поверхности изоляторов равно 235 кВ/см. Мощность ИЛ-лиака составляет 360 кВт. Пучок на выходе имеет следующие параметры: 90%-е нормализованные эмиттансы равны  $1,1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{рад}$  (ненормализованные эмиттансы равны  $10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{рад}$ ), относительный разброс по энергии составляет  $\pm 0,4\%$  и  $\Delta\varphi \cdot \Delta E = 1,2 \pi \cdot (\text{кэВ/нукл.}) \cdot \text{нс}$ . Максимальная интенсивность пучка ионов углерода  $C^{4+}$  равна  $390 e \cdot \text{мкА}$ , что в два раза выше, чем требуется для углеродной терапии. Эффективность транспортировки ионов в ИЛ-лиаке составляет 90%.

Канал инжекции из линейного ускорителя в синхротрон обеспечивает транспортировку пучка из линейного ускорителя в синхротрон; согласование параметров пучка со структурными функциями синхротрона; обдирку ионов  $C^{4+}$  на фольге до максимального зарядового состояния  $C^{6+}$ ; сепарацию зарядностей после обдирки на мишени и разгруппировку пучка в дебанчере. Магнитная жесткость канала составляет  $0,864 \text{ Тл} \cdot \text{м}$  для ионов  $C^{4+}$  и  $0,576 \text{ Тл} \cdot \text{м}$  для  $C^{6+}$ . Акцептанс канала равен  $22 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ,  $\beta$ -функции в нем представлены на рис.3. Канал состоит из двух секций: секции обдирки ионов  $C^{4+}$ ; секции сепарации и согласования, предназначенной для транспортировки пучка  $C^{6+}$  до системы инжекции в синхротрон. Секция обдирки представляет собой прямолинейный участок с четырьмя квадрупольными и обдирочной фольгой в конце. Оптика секции

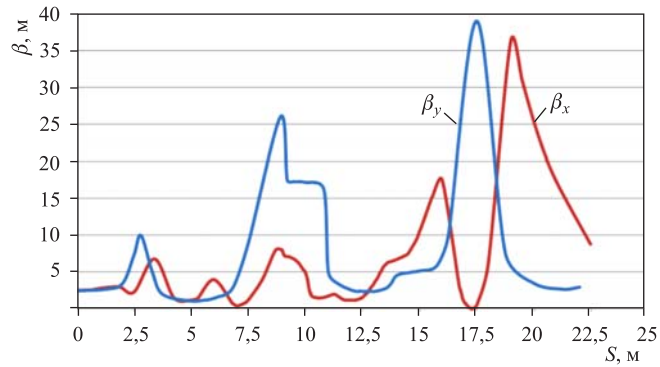


Рис. 3. Бета-функции канала инжекции в синхротрон

обдирки обеспечивает малые размеры пучка на обдирочной мишени. Это позволяет снизить рост эмиттанса пучка вследствие многократного рассеяния на обдирочной мишени. Рост эмиттанса здесь не превышает 10%. Секция сепарации и согласования содержит анализирующий магнит, девять согласующих квадрупольей и дебанчер.

### СТРУКТУРА СИНХРОТРОНА

Структура FODO наиболее предпочтительна с точки зрения ввода, вывода пучка и коррекции замкнутой орбиты в медицинском синхротроне. Магнитная система синхротрона состоит из четырех суперпериодов, каждый из которых включает восемь дипольных

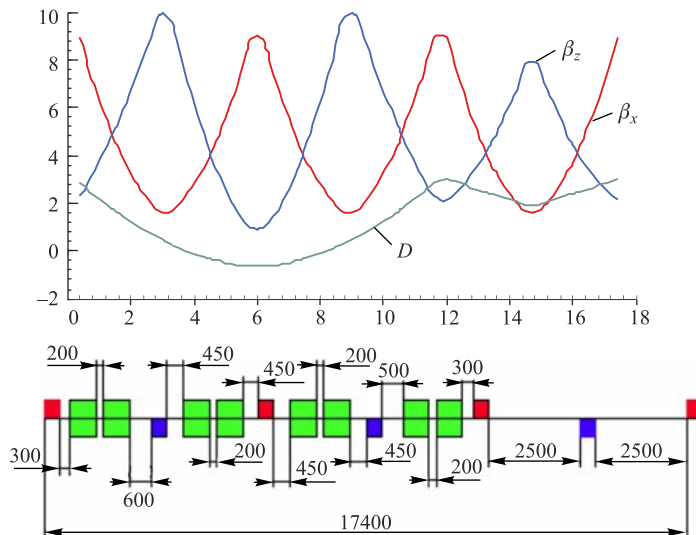


Рис. 4. Динамические характеристики выбранной структуры синхротрона

магнитов, три фокусирующих и три дефокусирующих линзы, мультипольные корректоры для компенсации погрешностей основного поля. Максимальное магнитное поле в диполях составляет 1,8 Тл.

Характеристики сверхпроводящих дипольных магнитов и квадрупольных линз определили периметр синхротрона (69,6 м) и его структуру (рис.4). Максимальная энергия ускоренных ионов равна 400 МэВ/нукл. Интенсивность накопленного пучка ионов углерода  $^{12}\text{C}^{6+}$  составляет  $10^{10}$  частиц, а интенсивность выведенного пучка равна

Таблица 1. Основные параметры магнитной структуры синхротрона

| Общие данные   |                |
|--|----------------|
| Энергия инъекции/ максимальная, МэВ/нукл.                  | 4,2/400        |
| Магнитная жесткость, инъекция/максимальная, Тл·м           | 0,59/6,36      |
| Периметр синхротрона, м                                    | 69,6 м         |
| Кулоновский предел по интенсивности, $\text{C}^{6+}$ /цикл | $6 \cdot 10^9$ |
| Сдвиг бетатронной частоты                                  | 0,02           |
| Длительность одного оборота инъекции, мкс                  | 2,37           |
| Число оборотов при инъекции                                | 20             |
| Эффективность инъекции, %                                  | 50             |
| Длительность ускорения, с                                  | 0,5            |
| Длительность медленного вывода, с                          | 0,5–10         |
| Диапазон энергий медленного вывода, МэВ/нукл.              | 140–400        |
| Эффективность медленного вывода, %                         | 96             |
| Критическая энергия, ГэВ/нукл.                             | 3,1            |
| Структура и магнитные элементы                             |                |
| Количество суперпериодов/ периодов                         | 4/12           |
| Дипольных магнитов/ квадрупольных линз                     | 32/24          |
| Поле в магнитах при инъекции/максимальное                  | 0,17/1,8       |
| Скорость нарастания поля, Тл/с                             | 3,6            |
| Градиент в линзах Ф, инъекция/максимальный, Тл/м           | 0,8/ 8,5       |
| Градиент в линзах Д, инъекция/максимальный, Тл/м           | – 0,7/7,5      |
| Радиус кривизны в дипольных магнитах, м                    | 3,53           |
| Сагитта в дипольных магнитах, мм                           | $\pm 8,7$      |

Таблица 2. Динамические характеристики структуры и пучка

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Частоты бетатронных колебаний  | 3,25                              |
| Хроматичность $\Delta Q_x / (\Delta p/p)$  | – 3,1                             |
| $\Delta Q_z / (\Delta p/p)$  | – 3,2                             |
| Коэффициент уплотнения орбит   | 0,053                             |
| Амплитуда скорректированной орбиты, мм   | 3                                 |
| Акцептанс горизонтальный/вертикальный, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$                     | 180/70                            |
| Эмиттанс инжектируемого пучка $\varepsilon_{x,z}$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$        | 10                                |
| В конце ускорения $\varepsilon_x/\varepsilon_z$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$          | 20/1,5                            |
| Эмиттанс выведенного пучка $\varepsilon_x/\varepsilon_z$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ | 1/1,5                             |
| Импульсный разброс при инъекции  | $\pm 10^{-3}$                     |
| $\Delta p/p$ максимальный/в конце ускорения  | $\pm 2 \cdot 10^{-3}/\pm 10^{-3}$ |

$10^9$  ионов/с. В синхротроне обеспечивается высокая эффективность вывода пучка в широком диапазоне энергий и реализуется оптическая структура с минимальными апертурами сверхпроводящих магнитов и линз.

Горизонтальный и вертикальный эмиттансы инжектируемого пучка равны  $\varepsilon_{x,y} = 10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{рад}$ , его импульсный разброс составляет  $\Delta p/p = \pm 10^{-3}$ . В процессе инжекции и на начальной стадии ускорения из-за ошибок в согласовании канала транспортировки и погрешностей магнитного поля эффективный фазовый объем пучка возрастает. В расчетах принят коэффициент увеличения эмиттансов  $k = 1,3$  для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Импульсный разброс после адиабатического захвата в синхротронный режим ускорения равен  $(\Delta p/p)_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{-3}$ ; искажение замкнутой орбиты

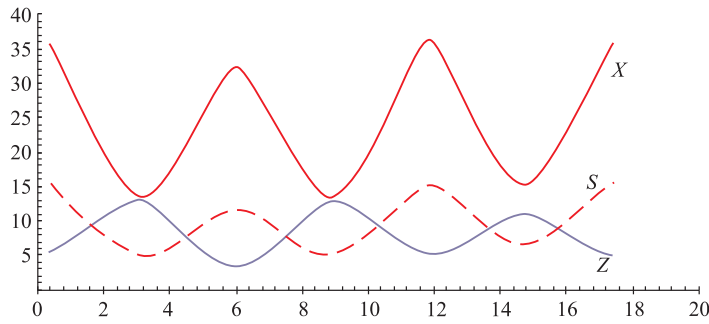


Рис. 5. Проекция огибающих пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях при эмиттансе пучка  $\varepsilon_x = 100 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  и  $\varepsilon_y = 10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$

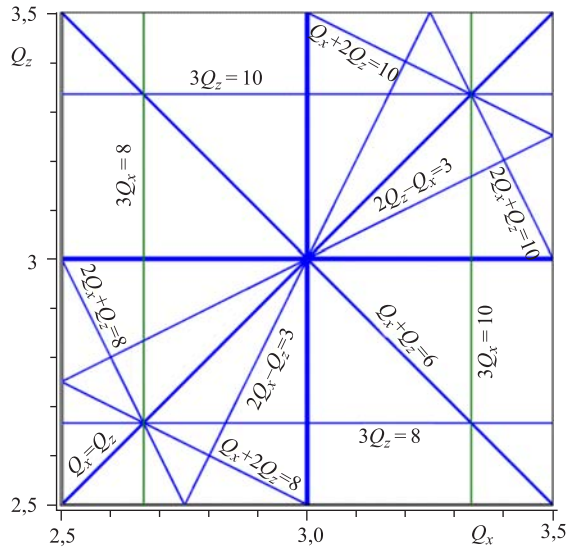


Рис. 6. Диаграмма резонансов до третьего порядка включительно

при условии коррекции первого оборота составляет  $x_{\max} = y_{\max} = 4$  мм. Основные параметры и динамические характеристики выбранной структуры синхротрона приведены в табл. 1, 2 и на рис. 4 соответственно. Проекция огибающих пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях представлены на рис. 5. Значения бетатронных частот в рабочей точке близки к  $Q_{x,z} \approx 3,25$ . Диаграмма резонансов до 3-го порядка включительно приведена на рис. 6.

### ИНЖЕКЦИЯ И МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ИОНОВ ПУЧКА

Для получения требуемой интенсивности пучка используется многооборотная инжекция (20 оборотов) с накоплением ионов в горизонтальной плоскости. Инжектируемые пучки согласованы по поперечному фазовому объему с магнитной структурой синхротрона и нулевой дисперсией в области инжекции. Схема инжекции позволяет осуществлять однооборотный ввод пучка с использованием септум-магнита и инфлекторных пластин ИП3 и ИП4. Инфлекторы осуществляют необходимое изменяющееся во времени локальное искажение равновесной орбиты. В системе инжекции целесообразно использовать инфлекторные пластины, напряжение на которых не превышает 80 кВ, а уровни тепло- и газовыделения значительно меньше, чем в ударных магнитах. Их положение на участке инжекции показано на рис. 7.

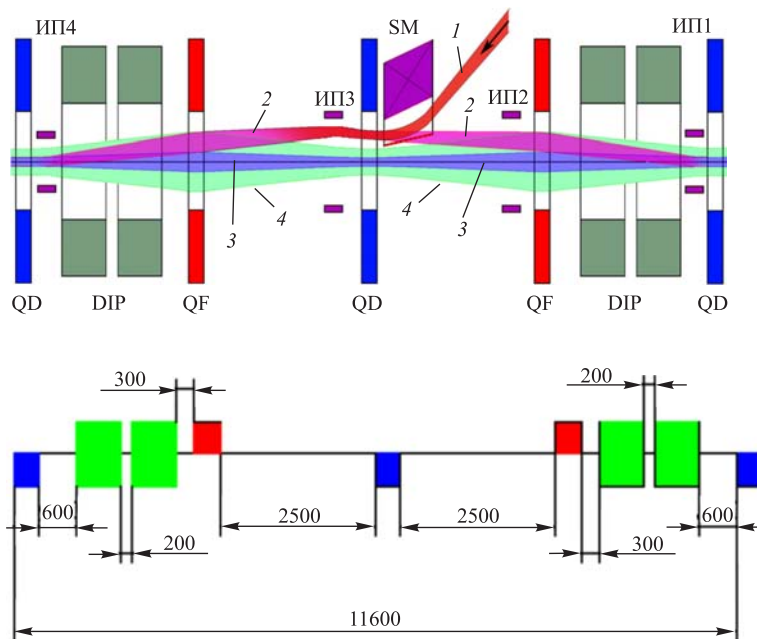


Рис. 7. Схема инжекции пучка, положение орбиты и огибающей пучка: 1 — инжектируемый пучок; 2 — отклоненный пучок; 3 — циркулирующий пучок после первой инжекции; 4 — после инжекции. QD, QF — квадрупольные линзы; DIP — дипольные магниты; SM — инжекционный септумный магнит; ИП 1–4 — инфлекторные пластины

Для обеспечения многооборотной инжекции и медленного вывода часть горизонтального акцептанса структуры будет отведена для создания динамического бампа в окрестности ввода и вывода пучка. В результате эмиттанс пучка не должен превышать  $120 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

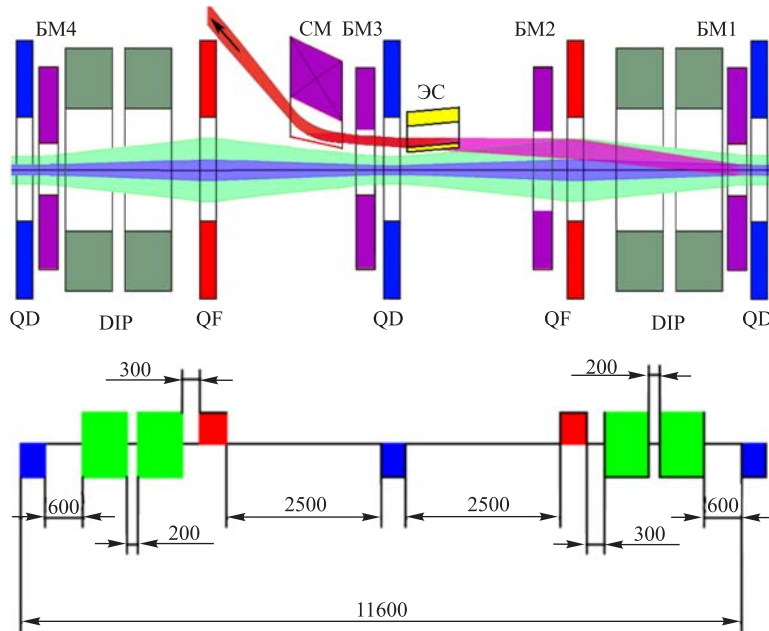


Рис. 8. Схема медленного вывода ионов углерода из синхротрона

Таблица 3. Параметры системы медленного вывода

| Параметр   | Значение            |                   |
|--|---------------------|-------------------|
| Диапазон энергий, МэВ/нукл.  | 140                 | 400               |
| Магнитная жесткость, Тл · м  | 3,54                | 6,36              |
| Эмиттансы циркулирующего пучка $\epsilon_x/\epsilon_y$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ | 36/2,7              | 20/1,5            |
| Импульсный разброс   | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ |
| Эмиттанс выведенного пучка $\epsilon_x/\epsilon_y$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$     | 2,0/5               | 1,7/2             |
| Длительность вывода, с   | 0,5–10              | 0,5–10            |
| Эффективность медленного вывода, %   | 95                  | 96                |
| Коэффициент однородности тока выведенного пучка, %   | 95                  | 95                |
| Эффективные длины квадрупольных линз и секступолей, м  | 0,25                | 0,25              |
| Максимальные значения производных квадратичных нелинейностей, Тл/м <sup>2</sup>                  | 15                  | 40                |
| Максимальные значения градиентов в ЛК1–ЛК4, Тл/м   | 0,9                 | 0,15              |
| Эффективные длины ЭС и МЛ, м   | 1,0                 | 1,0               |
| Напряженность электрического поля в ЭС, МВ/м   | 3,5                 | 6                 |
| Индукция магнитного поля в МЛ, Тл  | 0,3                 | 0,6               |



В соответствии с выбранной в синхротроне горизонтальной частотой бетатронных колебаний  $Q_x \cong 3,25$  для медленного вывода целесообразно использовать ближайший резонанс третьего порядка  $3Q_x = 10$ . Рабочая точка смещается к полосе этого резонанса при изменении токов в обмотках структурных квадрупольных линз. Одновременно с помощью секступольных линз создается 10-я гармоника квадратичной нелинейности. Медленное смещение частоты бетатронных колебаний внутри резонансной полосы производится за счет программируемого изменения токов в дополнительных квадрупольных линзах. Вывод пучка осуществляется с помощью электростатического септума и сверхпроводящего септум-магнита.

Размещение этих элементов в кольце ускорителя (рис. 8) и схема их электропитания должны обеспечивать высокое качество и независимость настройки параметров выведенного пучка. Поэтому необходимые возмущения магнитного поля оптимально создавать с помощью двух пар секступолей и четырех квадрупольных линз. Основные параметры системы медленного вывода приведены в табл. 3.

### МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Технология изготовления магнитов нуклотрона была предложена и реализована в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ [2, 3]. Она отличается высокой эффективностью и надежностью при относительной простоте и низких затратах. Дипольный магнит [2, 3] представляет собой прямой магнит типа «оконная рама» с «холодным» ярмом из листовой трансформаторной стали. Основные параметры дипольных магнитов приведены в табл. 1 и 4. На рис. 1, б представлен дипольный магнит внутри криостата. Магнит закреплен в криостате с помощью восьми стержней таким образом, что после его охлаждения от комнатной до гелиевой температуры положение в пространстве оптической оси магнита остается неизменным. Диаметр вакуумного кожуха криостата составляет 540 мм. Между вакуумным кожухом и магнитом расположен тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота. Снизу к магниту прикреплены питающий и отводящий гелиевые коллекторы. Обмотка магнита изготовлена из трубчатого сверхпроводящего кабеля, разработанного в ЛФВЭ ОИЯИ для магнитов нуклотрона. Внутри кабеля имеется охлаждающий канал для циркуляции потока двухфазного (кипящего) гелия. Обмотка помещена в зазор железного ярма магнита, которое воспринимает пондеромоторные силы, действующие на обмотку. Ярмо изготовлено из листов электротехнической стали толщиной 1 мм, скрепленных между собой с помощью сварки со стальными уголками и пластинами. Ярмо охлаждается потоком гелия после обмотки.

При охлаждении гелием магнитная система синхротрона будет разделена на два полукольца. В каждом полукольце цепочка из 16 дипольных магнитов и 12 квадрупольных линз параллельно подсоединяется к питающему и отводящему гелиевым коллекторам. Гидравлические сопротивления структурных магнитов и неструктурных элементов подобраны так, чтобы при работе в цикле на выходе каждого из параллельных охлаждающих каналов величина массового паросодержания гелия составляла около 90%.

Параметры квадрупольных линз со сверхпроводящей обмоткой и шихтованным «холодным» ярмом с гиперболическими полюсами приведены в табл. 1 и 5.

Оценка допусков на погрешности магнитного поля структурных элементов производилась из условия минимального воздействия погрешностей на пучок. Для коррекции

Таблица 4. Характеристики дипольного магнита

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Количество магнитов   | 32 + 1                |
| Эффективная длина магнита, м  | 0,7                   |
| Скорость изменения магнитного поля, Тл/с                                | 3,6                   |
| Неоднородность магнитного поля $\Delta B/B$ на $R = 30$ мм              | $\pm 6 \cdot 10^{-4}$ |
| Апертура по вакуумной камере, мм  | 128 × 64              |
| Угол поворота, град   | 11,25                 |
| Радиус кривизны орбиты, м   | 3,53                  |
| Зазор между полюсами (горизонт. × вертикаль), мм                        | 150 × 66              |
| Длина железного ярма, м   | 0,65                  |
| Ширина ярма, м  | 0,31                  |
| Высота ярма, м  | 0,228                 |
| Физическая длина магнита, м   | 0,9                   |
| Масса магнита, кг   | 260                   |
| Ток при максимальном магнитном поле, кА                                 | 12,1                  |
| Число витков в обмотке/на полюс   | 8/4                   |
| Индуктивность, мГн  | 0,15                  |
| Потери энергии за цикл при $B_{\max} = 1,5$ Тл, Дж                      | 10                    |
| Полная длительность цикла, с  | 3–11                  |
| Динамические тепловыделения (включая камеру), Вт                        | $\leq 9,4$            |
| Диаметр кабеля с изоляцией, мм  | 8,2                   |
| Длина кабеля в обмотке, м   | 15                    |
| Длина кабелей электрической связи магнитов, м                           | 3                     |
| Перепад давления между питающим и отводящим гелиевыми коллекторами, кПа | $\leq 25$             |
| Максимальная температура гелия в обмотке, К                             | 4,65                  |

таких погрешностей в синхротроне отведено два малых свободных промежутка, расположенных вблизи линз  $\Phi$  и  $D$ , что обеспечивает независимость коррекции орбиты для горизонтальной и вертикальной плоскости, а также коррекцию хроматичности и рабочей точки. Проведенные оценки показали возможность использования неявнополюсных корректоров с тонкослойными сверхпроводящими обмотками и косвенным охлаждением. В одном таком элементе располагается четыре типа корректирующих обмоток, а всего требуется шесть типов «прямых» и «косых» полей: дипольных, квадрупольных, секстипольных и, возможно, октупольных.

Основными источниками искажения орбиты являются: разброс индукций  $\langle \Delta B_y/B \rangle_{\text{ом}}$  в дипольных магнитах, поворот их медианной плоскости вокруг оси на угол  $\langle \alpha_s \rangle_{\text{м}}$  и поперечные смещения продольных магнитных осей квадрупольных линз. При  $\langle \Delta B/B \rangle_{\text{ом}} = 5 \cdot 10^{-4}$ ;  $\langle \alpha_s \rangle_{\text{м}} = 5 \cdot 10^{-4}$  и  $\langle \alpha_x \rangle = \langle \alpha_y \rangle = 0,1$  мм максимальные отклонения вертикальной проекции орбиты составят около 5 мм. Следует также отметить, что заметный вклад на уровне 4 мм в искажение орбиты в вертикальной проекции вносит седьмая гармоника.

При инжекции ошибки в повторяемости магнитного поля в диполях приведут к смещениям равновесной орбиты от цикла к циклу. Для технически реализуемого допуска на повторяемость уровня магнитного поля  $\langle \Delta B_y/B \rangle_{\text{ом}} = 4 \cdot 10^{-4}$  максимальное отклонение горизонтальной орбиты составит 1 мм. Влияние систематических и случайных погрешностей магнитного поля на характеристики бетатронных колебаний исследова-

Таблица 5. Основные характеристики квадрупольной линзы

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Количество линз в синхротроне   | 24 + 2                |
| Максимальный градиент магнитного поля/ минимальный, Тл/м                | 8,5/0,8               |
| Эффективная/ физическая длина линзы, м                                  | 0,4/0,6               |
| Скорость изменения градиента магнитного поля, (Тл/м)/с                  | 17                    |
| Неоднородность градиента магнитного поля $\Delta G/G$                   | $\pm 6 \cdot 10^{-4}$ |
| Расстояние от оси до полюса, м  | 0,048                 |
| Апертура по вакуумной камере, мм  | 130 × 64              |
| Ширина/высота ярма  | 0,226/0,226           |
| Масса линзы, кг   | 80                    |
| Ток при максимальном градиенте поля, кА                                 | 8,2                   |
| Число витков в обмотке/на полюсе  | 4/1                   |
| Индуктивность, мкГн   | 24                    |
| Потери энергии за цикл при $G = 10$ Тл/м, Дж                            | 2,5                   |
| Полная длительность цикла, с  | 3–11                  |
| Динамическое тепловыделение, Вт   | 0,6                   |
| Статический теплоприток в сборе с МПК, Вт                               | 3,0                   |
| Общие тепловыделения, Вт  | 3,6                   |
| Длина кабеля в обмотке, м   | 7                     |
| Длина кабелей электрической связи магнитов, м                           | 9                     |
| Перепад давления между питающим и отводящим гелиевыми коллекторами, кПа | $\leq 25$             |
| Максимальная температура гелия в обмотке, К                             | 4,65                  |

лось по стандартной методике. Для выбранного положения рабочей точки  $Q_{x,y} \cong 3,25$  суммарная величина сдвигов бетатронных частот не должна превышать  $\Delta Q_{x,y} \leq 0,05$ . С учетом возможностей управления токами в системе электропитания структурных элементов допуски на систематические погрешности магнитного поля распределились следующим образом. Для  $\Delta Q_{x,z} < 0,01$  точность поддержания токов в линзах составляет  $\Delta G/G_{ф.д} < 10^{-3}$ . Допуски на секступольную и октупольную нелинейности магнитных полей дипольных магнитов и квадрупольных линз при  $\Delta Q(2, 3)_{x,z} < 0,01$  находятся из неравенств  $(\Delta B/B)_{2,м} + 0,3(\Delta B/B)_{2,л} < 9 \cdot 10^{-4}$  и  $(\Delta B/B)_{3,м} + 0,2(\Delta B/B)_{3,л} < 5 \cdot 10^{-4}$ . Для нелинейностей высших порядков при  $\Delta Q_{x,y} < 6 \cdot 10^{-4}$  ( $4 < n < 10$ ) величина допуска на каждую из них составляет  $(\Delta B/B)_{n,л,м} < 3 \cdot 10^{-4}$ .

Очевидно, что выполнить перечисленные ограничения для технически реализуемых допусков возможно только при условии коррекции хроматичности, по крайней мере, при низких энергиях, когда импульсный разброс в пучке превышает величину  $(\Delta p/p)_{\max} > 10^{-3}$ . Для обеспечения заданной периодичности структуры в кольце синхротрона целесообразно разместить восемь корректирующих секступольных линз по две в идентичных точках каждого суперпериода. Обмотки корректоров, расположенных вблизи квадрупольных линз  $\Phi$ , должны быть объединены в одну электрическую цепь, а вблизи линз  $D$  — в другую. При размещении корректоров с эффективной длиной  $l_k = 0,25$  м в малых прямолинейных промежутках производные поля соответственно равны  $(\partial^2 B_y / \partial x^2)_1 = 2,4 B\rho \times \text{Тл/м}^2$  и  $(\partial^2 B_y / \partial x^2)_2 = -8,4 B\rho \times \text{Тл/м}^2$ . Эти величины сравнительно просто могут быть достигнуты с помощью неявнополюсных сверхпроводящих мультипольных

корректоров. Вопрос о коррекции постоянной составляющей октупольной нелинейности будет решен после расчетов динамического акцептанса.

При построении системы электропитания магнитной системы медицинского синхротрона за основу принято последовательное соединение структурных дипольных магнитов и квадрупольных линз. Основной источник системы питания формирует ток (до 12 кА) с заданной скоростью роста поля 3,6 Тл/с. Для гибкой регулировки рабочей точки ускорителя имеются два дополнительных источника питания существенно меньшей мощности. Один из них позволяет одновременно изменять градиент поля в фокусирующих и дефокусирующих квадрупольных линзах, другой — только в дефокусирующих. Для эвакуации запасенной энергии из сверхпроводящих элементов в случае срыва сверхпроводимости применены ключи эвакуации энергии, соединенные последовательно с цепью магнитов и линз. Последовательно соединенные в две цепи дипольные магниты и квадрупольные линзы через ключи подключены к источнику по симметричной относительно питающего напряжения схеме. Индуктивности групп и величина резисторов гашения выбраны таким образом, чтобы напряжение относительно потенциала «земли» на тоководах при эвакуации энергии не превышало 500 В. Мощный источник питания состоит из параллельно включенных тиристорных выпрямителей, запитанных от высоковольтной сети 6 кВ через распределительное устройство. Каждый из источников является 12-фазным выпрямителем с номинальными параметрами 180 В × 6,3 кА, причем фазные напряжения источников сдвинуты друг относительно друга на 15°. Совместно источники питания образуют 24-фазный регулируемый тиристорный выпрямитель с номинальными выходными параметрами 180 В × 12,6 кА, что позволяет получить скорость роста поля 3,6 Тл/с. Пиковая мощность источника равна 2,5 МВт. Фильтровые дроссели совместно с активным фильтром снижают уровень пульсаций тока до требуемой величины. Дополнительный источник тока в фокусирующие квадрупольные линзы с выходными параметрами 25 В × 400 А через ключи эвакуации энергии подключен к цепи последовательно соединенных линз. Аналогично подключается источник тока с выходными параметрами 15 В × 300 А через ключи к цепи дефокусирующих квадрупольных линз.

В измерительных магнитах установлены индукционные датчики магнитного поля, сигнал с которых поступает в устройства диагностики и управления.

## РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ В СИНХРОТРОНЕ

Ускоряющая система медицинского синхротрона предназначена для ускорения ионов  $C^{6+}$ , инжектируемых из линейного ускорителя при энергии 4,2 МэВ/нукл., до энергий 140–400 МэВ/нукл. с последующим выводом ускоренных ионов в каналы вывода пучка к медицинским кабинам. ВЧ-резонатор, заполненный ферритом, находится в прямолинейной секции сверхпроводящего синхротрона при комнатной температуре. Параметры ускоряющей системы синхротрона приведены в табл. 6. Система должна обеспечивать следующие режимы работы: адиабатический захват (АЗ) пучка, ускорение и подготовку пучка к медленному выводу (табл. 7).

Необходимость адиабатического захвата определяется схемой инжекции в синхротрон. Схема предполагает многократную однооборотную инжекцию, после которой инжектированный распущенный пучок занимает весь периметр синхротрона. Захват ионов в сепаратрису происходит при постоянной средней энергии частиц и состоит

Таблица 6. Параметры ускоряющей системы

|  |             |
|--|-------------|
| Диапазон перестройки частоты, МГц                              | 0,815–6,157 |
| Номер гармоники  | 2           |
| Внешний диаметр резонатора, м                                  | < 1,2       |
| Размеры вакуумной камеры, мм                                   | 160 × 70    |
| Длина резонатора, м  | ≤ 2         |
| Количество резонаторов   | 1           |
| Минимальная амплитуда напряжения при адиабатическом захвате, В | 50          |
| Максимальная амплитуда напряжения при ускорении, кВ            | 2,0         |

Таблица 7. Характерные параметры для ускорения  $^{12}\text{C}^{+6}$  с 4,2 до 400 МэВ/нукл.

| Параметр                       | Инжекция              | После АЗ                 | Максимум $dB/dt$        | Вывод                   |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Время, с                       | 0                     | 0,025                    | 0,375                   | 0,725                   |
| Число частиц                   | $10^{10}$             | $10^{10}$                | $10^{10}$               | $10^{10}$               |
| $B\rho$ , Тл · м               | 0,59                  | 0,59                     | 3,46                    | 6,3                     |
| Частота обращения, кГц         | 413                   | 413                      | 2094                    | 3077                    |
| Магнитное поле, Тл             | 0,168                 | 0,168                    | 0,817                   | 1,8                     |
| Напряжение ВЧ, кВ              | 0,05                  | 0,3                      | 2,0                     | 0,3                     |
| Частота ВЧ, кГц                | 816                   | 816                      | 4188                    | 6157                    |
| Синхронная фаза ВЧ, град       | 0                     | 0                        | 30                      | 0                       |
| Энергия, МэВ/нукл.             | 4,2                   | 4,2                      | 134,5                   | 400                     |
| Количество банчей              | 2                     | 2                        | 2                       | 2                       |
| Rms банча по длине, м          | —                     | 1,84                     | 1,1                     | 1,75                    |
| Rms банча по энергии, МэВ      | 0,025                 | 0,09                     | 0,65                    | 0,6                     |
| $\Delta p/p$ ( $\pm 2\sigma$ ) | $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ | $\pm 1,79 \cdot 10^{-3}$ | $\pm 4,3 \cdot 10^{-4}$ | $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| Высота сепаратрисы, МэВ        | 0,064                 | 0,32                     | 2,2                     | 2,0                     |
| $\Delta p/p$ по сепаратрисе    | $6,4 \cdot 10^{-4}$   | $3,2 \cdot 10^{-3}$      | $7,3 \cdot 10^{-4}$     | $2,5 \cdot 10^{-4}$     |
| Синхротронный тьюн             | $6 \cdot 10^{-4}$     | $2,4 \cdot 10^{-3}$      | $8,0 \cdot 10^{-4}$     | $10 \cdot 10^{-4}$      |
| Пиковый ток, мА                | 4                     | 30                       | 255                     | 234                     |

в медленном повышении высокочастотного напряжения на столе магнитного поля. Начальное напряжение выбирается таким образом, чтобы соответствующая ему площадь продольного акцептанса была меньше начального эмиттанса пучка. Эффективность АЗ приближается к 100 % при времени захвата, равном нескольким десяткам миллисекунд, без существенного увеличения эмиттанса пучка. Выбор конечного напряжения зависит от желаемого соотношения площадей акцептанса и эмиттанса. При конечном напряжении ВЧ в 300 В это соотношение равно 2. В конце АЗ некогерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний, вызванный пространственным зарядом, меньше 0,02.

Ускорительный цикл полностью определяется одновременным изменением магнитного поля и амплитуды ВЧ-напряжения. Максимальная скорость роста магнитного поля определяет требование к амплитуде напряжения на ускорительных станциях. Для цикла с синусоидальным изменением магнитного поля с  $dB/dt_{\text{нач}} = dB/dt_{\text{кон}} = 0$  и длитель-

ностью 0,7 с, при котором энергия частиц изменяется с 4,2 до 400 МэВ/нукл., а максимальная скорость роста поля достигает уровня 3,6 Тл/с, амплитуда ускоряющего напряжения и синхронная фаза не превышают 2 кВ и 35° соответственно.

Начальная амплитуда ВЧ-напряжения при ускорении определяется ее значением в конце процесса АЗ (300 В). Во избежание потерь частиц достаточно варьировать амплитуду ВЧ таким образом, чтобы площадь продольного акцептанса сохранялась постоянной.

## КАНАЛЫ РАЗВОДКИ ПУЧКОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Каналы разводки пучков высокой энергии обеспечивают транспортировку пучков к трем медицинским кабинам: одной с системой гантри и двум другим с фиксированным положением пучка; получение требуемого размера пучка в изоцентре независимо от параметров пучка (энергии ионов и эмиттанса), выведенного из синхротрона; независимость размеров пучка на изоцентре от угла поворота гантри; диагностику пучка и быстрый сброс пучка на поглотитель в случае возникновения такой необходимости. Каналы состоят из следующих частей: секции уравнивания эмиттансов; секции согласования; секций перевода в кабину; секций перевода между кабинами; изоцентрического гантри и каналов с фиксированным положением пучка.

Параметры Твисса на выходе из синхротрона равны  $\beta_x/\beta_y = 8,9/2,18$ ,  $\alpha_x/\alpha_y = -2,39/0,44$  и  $D_x/D'_x = (-3,09 - 0,3)/(-0,45 - 0,15)$ . Выведенный из синхротрона пучок имеет несимметричные фазовые портреты по горизонтальному и вертикальному направлениям. Ненормализованный горизонтальный эмиттанс определяется резонансной системой медленного вывода синхротрона и не зависит от энергии вывода. Ненормализованный вертикальный эмиттанс адиабатически снижается с увеличением энергии вывода. Так при выводе пучка ионов с энергией 170 МэВ/нукл. и 400 МэВ/нукл. его ненормализованные эмиттансы, соответственно, равны  $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0,5/2,4 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  и  $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0,5/1,5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Для удобства системы планирования пучок в изоцентре должен иметь круглую форму с диаметром 4–10 мм, особенно это важно при использовании системы гантри, когда облучение пациента ведется с разных направлений. Облучение опухоли производится как методом пассивного, так и методом активного сканирования. Максимальный размер сканирования составляет  $20 \times 20$  см.

Оптическая структура канала разводки пучка приведена на рис.9. Выведенный из синхротрона пучок доворачивается на угол 100 мрад и переводится на прямую, параллельную прямолинейному промежутку вывода из синхротрона. Секция уравнивания эмиттансов служит для формирования пучков с одинаковыми горизонтальным и вертикальным эмиттансами и задания параметров пучка на рассеивающей фольге, завершающей секцию. Значение  $\beta_y$  фиксировано и равно 3 м. Значение  $\beta_x$  зависит от отношения горизонтального и вертикального эмиттансов выведенного пучка. На рассеивающей фольге происходит скачок горизонтальной бета-функции. Секция согласования предназначена для приведения в соответствие параметров пучка с оптикой гантри и кабин с фиксированным положением пучка. Чтобы пучок был согласован с гантри независимо от угла ее поворота, на выходе секции оптические параметры пучка делаются равными по горизонтальному и вертикальному направлениям. Секция содержит пять квадруполей. Секция перевода пучка в медицинскую кабину содержит чопер, ахроматический поворот на 90° и два согласующих триплета. Ахромат включает в себя два переключающих дипольных

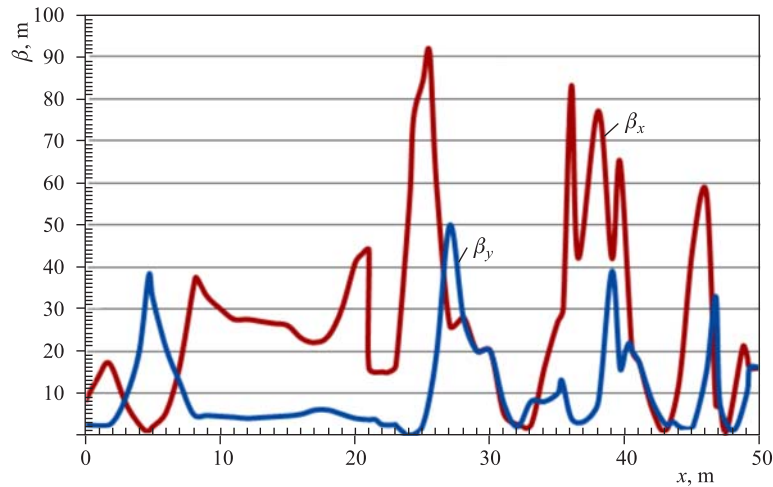


Рис. 9. Бета-функции канала разводки пучков ионов высокой энергии из синхротрона

магнита, в которых разветвляется вакуумная камера. При выключенных переключающих диполях осуществляется перевод пучка к следующей кабине. Набег фаз в секции равен  $2\pi$  по горизонтали и  $\pi$  по вертикали. Оптика секции не перестраивается. Чопер содержит четыре дипольных магнита. Когда диполи отключены, пучок попадает на поглотительную мишень. При включенных диполях пучок транспортируется параллельно оси канала. Длина чопера составляет 3,6 м. Секция перевода между кабинами служит для транспортировки пучка к следующей секции перевода в кабину. Она имеет общую часть с секцией перевода в кабину: чопер и согласующий триплет. Набег фаз в секции равен  $2\pi$  по горизонтали и  $\pi$  по вертикали. Изоцентрическое гантри вращает пучок вокруг пациента на угол от 0 до  $180^\circ$ . Еще на угол от 0 до  $180^\circ$  поворачивается позиционер с пациентом, обеспечивая облучение пациента под любым углом от 0 до  $360^\circ$ . Оптика гантри осуществляет ахроматический перевод пучка к опухоли. Она обеспечивает равные бета-функции и нулевые альфа-функции на опухоли. При регулировке размера пучка на опухоли параметры оптической системы гантри перестраиваются так, чтобы обеспечить равенство альфа- и бета-функций на входе гантри. Система активного сканирования содержит два сканирующих магнита, отклоняющих пучок по горизонтали и вертикали. В обеих плоскостях сканирование производится под углом, не превышающим 1 мрад при максимальном отклонении пучка на 10 см. Система сканирования располагается на участке перед последним  $90^\circ$ -м дипольным магнитом. Расстояние от выхода последнего магнита до изоцентра равно 2 м. Канал с фиксированным положением пучка служит для облучения опухоли с фиксированного направления. Его оптика обеспечивает равные бета-функции и нулевые альфа-функции на опухоли. Расстояние от выхода последней квадрупольной линзы до опухоли равно 2 м.

В табл. 8 приведены параметры магнитных элементов канала разводки пучков к медицинским кабинам. Магниты изготавливаются по технологии магнитов нуклотрона [2, 3]. Квадрупольные линзы имеют апертуру  $100 \times 80$  мм, их длина составляет 0,4 м, а максимальный градиент равен 20 Тл/м. При указанных апертурах горизонтальный аксептанс канала составляет  $20 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , вертикальный аксептанс равен  $9 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

Таблица 8. Дипольные магниты каналов разводки пучков

| Тип           | Длина, м | Макс. магнитное поле, Тл | Угол поворота, рад | Апертура, мм | Примечание                                  |
|---------------|----------|--------------------------|--------------------|--------------|---|
| Прямой        | 0,7      | 1,8                      | $\pi/16$           | 100 × 80     | Регулярный магнит синхротрона               |
| Прямой        | 0,36     | 1,8                      | 0,1                | 100 × 80     | Поворот на угол вывода пучка из синхротрона |
| Прямой        | 0,2      | 1,1                      | 0,033              | 100 × 80     | Магниты чопера                              |
| Прямой, С-тип | 0,7      | 1,8                      | $\pi/16$           | 100 × 80     | Переключающий магнит                        |
| Секторный     | 2,8      | 1,8                      | $\pi/4$            | 100 × 80     | Используется в гантри                       |
| Прямой        | 0,8      | 0,65                     | < 0,08             | 100 × 80     | Горизонтальный сканирующий магнит           |
| Прямой        | 0,4      | 0,65                     | < 0,04             | 100 × 80     | Вертикальный сканирующий магнит             |
| Секторный     | 2,5      | 4                        | $\pi/2$            | 300 × 300    | Используется в гантри                       |

### СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ ГАНТРИ

ОИЯИ в сотрудничестве с фирмой ИВА разработали сверхпроводящий циклотрон С400 и гантри для ионов углерода в рамках проекта Archarde [7, 8]. В рамках проекта сверхпроводящего синхротрона геометрия гантри была модифицирована по сравнению с проектом Archarde, ее диаметр был уменьшен с 9,2 до 7,2 м, а длина увеличена с 12,7 до 14,6 м, вес гантри составил около 150 т. Система сверхпроводящего гантри (рис. 10) предназначена для того, чтобы вращать устройство транспортировки и формирования углеродного пучка вокруг позиционера с пациентом в диапазоне углов 0–180°. Независимое вращение гантри в комбинации с вращением позиционера пациента на угол 0–180° позволяет облучать пациента с любого направления.

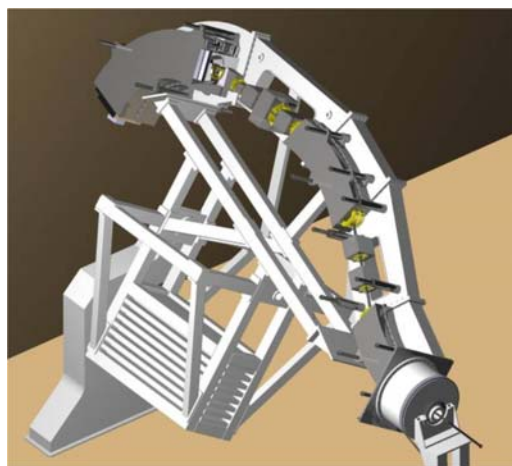


Рис. 10. Сверхпроводящее гантри ионов углерода



Сверхпроводящий дипольный магнит гантри имеет следующие параметры: магнитное поле равно 3,2 Тл, относительная неоднородность поля на апертуре  $20 \times 20$  см составляет  $2 \cdot 10^{-4}$ , что обеспечивает погрешность сканирования менее 0,5 мм, скорость подъема поля равна 1 Тл/мин, время перехода от одного поля к другому составляет 90 с, радиус поворота магнита равен 2 м, его вес — 28 т, запасенная энергия достигает 8,5 МДж. Для охлаждения сверхпроводящего магнита используются четыре криокулера фирмы Сумитомо (Япония).

Работа частично выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках гранта № 16.516.11.6118.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syresin E. M. et al. // RUPAC'10. 2010. P. 77.
2. Kovalenko A. D. // Usp. Fiz. Nauk. 2007. V. 177, No. 8. P. 914.
3. Smirnov A. A., Kovalenko A. D. // Part. Nucl., Lett. 2004. V. 1, No. 6. P. 11.
4. Donets E. D. et al. // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 2, Part II. P. 896.
5. Donets D. E. et al. // IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. THPEC067.
6. Noda K. et al. // Rad. Res. 48 Suppl. A. 2007. V. 43.
7. Jongen Y. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 624. P. 47.
8. Jongen Y. // ECPM 06, Nice, 2006.

Получено 29 июня 2011 г.