

РАСЧЕТЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ИОННОЙ ГАНТРИ

Е. М. Сыресин¹, Н. А. Морозов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проект медицинского ускорительного комплекса для терапии ионами углерода разрабатывается в ОИЯИ на базе технологии сверхпроводящих магнитов нуклотрона. Ключевая особенность данного проекта связана с разработкой сверхпроводящей гантри. Гантри состоит из двух $67,5^\circ$ -х секций и одной 90° -й секции, включающих в себя идентичные дипольные магниты с малой апертурой (120 мм) и магнитным полем 3,2 Тл. Гантри такого типа предназначена для многократного растрового сканирования с широким углеродным пучком или метода послойного облучения с относительно небольшой шириной расширенного пика Брэгга (несколько миллиметров). В данной работе обсуждаются расчеты сверхпроводящих дипольных магнитов гантри.

The project of medical carbon ion synchrotron was developed in JINR on base of own technology of Nuclotron superconducting magnets. The key element of this complex is superconducting gantry. The gantry consists of two 67.5° and one 90° bending sections, each including two similar dipole magnets of a low aperture (about 120 mm) and magnetic field 3.2 T. Such gantries are intended for multiple raster scanning with a wide carbon beam and the technique of layer wise irradiation with a spread out Bragg peak of several mm. The simulations of dipole magnets are discussed in this work.

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

ПРОЕКТ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОИЯИ ДЛЯ ТЕРАПИИ ИОНАМИ УГЛЕРОДА

Проект медицинского ускорительного комплекса для терапии ионами углерода [1] разработан в ОИЯИ на основе технологии сверхпроводящих магнитов нуклотрона (рис. 1).

Сверхпроводящие магниты позволяют существенно снизить мощность системы электропитания синхротрона, размеры магнитов и их массу. Применение сверхпроводящих технологий особенно важно при проектировании ионной гантри.

Периметр сверхпроводящего синхротрона составляет около 70 м. Магнитная структура состоит из четырех суперпериодов, каждый из которых включает восемь дипольных магнитов, четыре фокусирующие линзы и четыре дефокусирующие линзы, а также мультипольные корректоры. Максимальное магнитное поле в дипольных магнитах соответствует 1,8 Тл.

Многооборотная инжекция реализована в проекте медицинского синхротрона для заполнения горизонтального акцептанса в течение 15 оборотов. Накопленная интенсивность пучка равна 10^{10} ионов углерода C^{6+} за импульс. Рабочая точка соответствует

¹E-mail: syresin@nu.jinr.ru

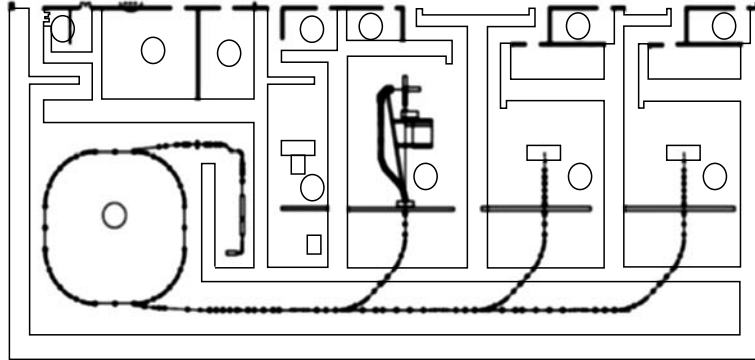


Рис. 1. Схема ускорительного медицинского комплекса для терапии ионами углерода

бетатронным числом $Q_{x,z} \approx 3,25$. Нелинейный резонанс третьего порядка $3Q_x = 10$ используется для медленного вывода пучка из синхротрона. Время медленного вывода варьируется от 0,5 до 10 с. Интенсивность выведенного пучка частиц составляет 10^9 с^{-1} .

Ионные пучки с энергией в интервале от 140 до 400 МэВ/нуклон транспортируются к трем медицинским кабинам, одна из которых снабжена системой сверхпроводящей гантри.

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ИОННАЯ ГАНТРИ

Система гантри предназначена для вращения вокруг пациента устройства транспортировки и формирования пучка ионов углерода и обеспечения облучения пациента с любого направления. Применение гантри для терапии ионами углерода позволяет увеличить количество рекомендованных к облучению локализаций с 7 до 30 %. Чтобы снизить массу и габариты углеродной гантри, в NIRS (Япония) реализована гантри на базе сверхпроводящей технологии [2]. Сверхпроводящие магниты гантри в проекте ОИЯИ планируется

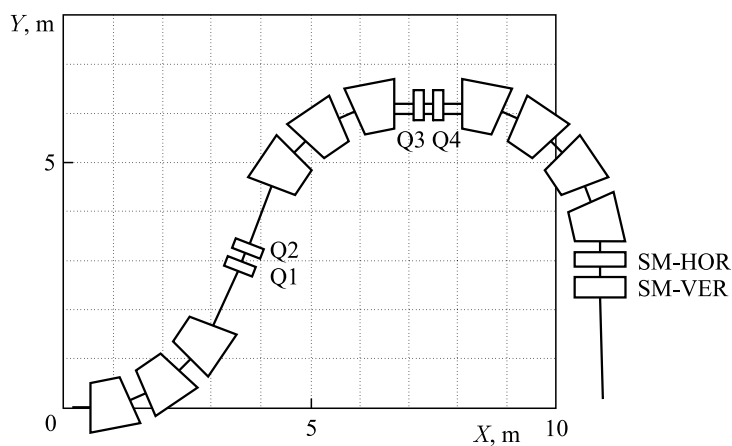


Рис. 2. Схема сверхпроводящей ионной гантри

изготовить на основе криокулеров фирмы Sumitomo (Япония), в которых криокулерная головка охлаждается циркулирующим с помощью компрессора газообразным гелием высокой чистоты. Заливка гелия в криокулер происходит примерно раз в полгода.

Гантри ОИЯИ (рис. 2) [3, 4] состоит из двух 67,5°-х секций и одной 90°-й секции, включающих в себя идентичные дипольные магниты с малой апертурой (120 мм). Размер гантри составляет 10,5 × 6,5 м. Два дуплета квадрупольных линз (Q1–Q2), (Q3–Q4) располагаются между дипольными магнитами. Квадрупольные линзы имеют эффективную длину 2 м и градиенты Q1–Q2 — 9,5 Тл/м, Q3–Q4 — 10,5–13,5 Тл/м.

За последним магнитом устанавливается насадка для формирования пучка (нозл) достаточно протяженной длины. Она включает в себя сканирующие по вертикали и горизонтали магниты, рассеиватель, гребенчатый фильтр, клинообразный фильтр с изменяемой толщиной и монитор положения пучка. Все это оборудование размещается между последним дипольным магнитом и изоцентром. В результате расстояние от изоцентра до выходного края последнего дипольного магнита составляет около 3,5 м. Сканирующие магниты обеспечивают область сканирования в изоцентре ± 10 см. Горизонтально сканирующий магнит (SM-HOR) находится на расстоянии 2,7 м от изоцентра, длина магнита равна 0,3 м, максимальное магнитное поле составляет 0,8 Тл. Вертикально сканирующий магнит (SM-VER) находится на расстоянии 2,1 м от изоцентра, его максимальное магнитное поле равно 0,8 Тл, а длина составляет 0,4 м.

Пучок ионов углерода на входе в гантри имеет следующие параметры: максимальная энергия ионов углерода 400 МэВ/нуклон, среднеквадратичный вертикальный и горизонтальный размер пучка 6/3 мм, разброс относительной энергии ионов 0,1%. Транспортировка ионного пучка через магниты гантри показана на рис. 3.

Гантри такого типа предназначены для многократного растрового сканирования с широким углеродным пучком или метода послыонного облучения с шириной расширенного пика Брэгга в несколько миллиметров. Использование двух сканирующих магнитов с частотой сканирования по x 10 Гц и по y 20 Гц и рассеивателя малой толщины (предназначенного для формирования квазикруглых широкоапертурных пучков в изоцентре)

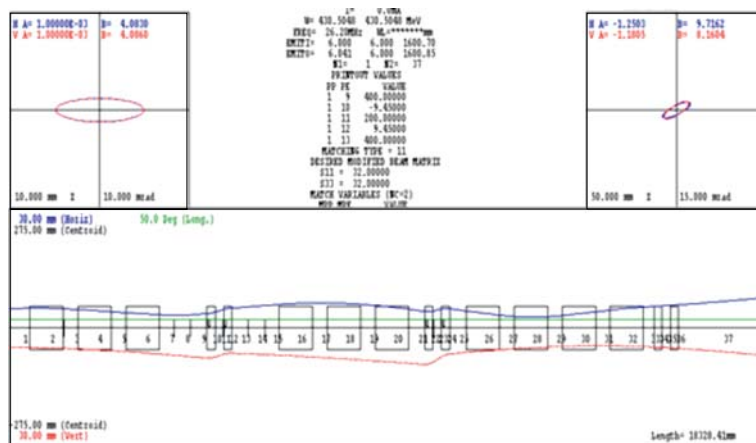


Рис. 3. Транспортировка ионного пучка через магниты гантри при относительном разбросе энергии ионов 0,1%

в несколько раз повышает эффективность использования пучка (до 40 %) по сравнению с системой двойного рассеивания.

Достоинством данной системы гантри является более простая технология изготовления сверхпроводящих дипольных магнитов с малой апертурой и малой массой. Масса всех дипольных магнитов в этом случае составляет около 10–15 т. Недостатком этой системы является относительно большой радиус фермы гантри, составляющий около 6,5 м.

В рамках проекта предполагается азимутальное вращение гантри на угол $0-180^\circ$, при этом позиционер обеспечит вращение в плоскости по углу $\varphi = 0-360^\circ$. В этом случае осуществляется как облучение пациента с любого направления, так и диагностика пучка при вращении гантри в диапазоне углов 180° .

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ДИПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ

Особенностью сверхпроводящих дипольных магнитов гантри является их вращение вокруг пациента. Так как магниты должны вращаться, стандартные решения погруженных в жидкий гелий магнитов в данном случае неприменимы. Малоапертурные дипольные сверхпроводящие магниты гантри планируется изготовить по технологии железно-токовых магнитов с током 200–300 А.

Параметры дипольных магнитов гантри приведены в табл. 1. Дипольные магниты имеют токовое распределение по $\cos(\psi)$. Общее число витков (на полюс) 2841, рабочий ток 220 А (магнитное поле 3,2 Тл). Уровень максимального поля в ярме 2,25–2,11 Тл. Между обмоткой и сердечником магнита предполагается установить специальный бандаж, фиксирующий положение сверхпроводящей обмотки. Масса ярма составляет около 500 кг, холодной массы — около 650 кг. Магниты гантри планируется изготовить на базе криокулера фирмы Sumitomo SRDK-415 D мощностью 1,5 Вт при температуре 4,4 К. В криокулере реализуется холодильный цикл Гиффорда–Макмагона, рабочим телом является гелий с высокой чистотой.

Таблица 1. Параметры сверхпроводящих дипольных магнитов гантри

Параметр	Величина
Количество дипольных магнитов	8
Тип магнита, распределение тока	$\cos(\psi)$
Количество секторов обмотки	10
Общее число витков (на полюс)	2841
Рабочий ток, А	220
Магнитное поле, Тл	3,2
Жесткость магнитного поля, Тл·м	6,63
Радиус поворота, м	2,07
Угол поворота	$22,5^\circ$
Rms размеры пучка (1σ), σ_y/σ_x , мм	6/3
Горизонтальная однородность магнитного поля, мм	± 16
Однородность магнитного поля	$\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$
Однородности интеграла поля	10^{-3}
Внутренний/внешний радиусы обмотки, мм	61/72
Внутренний/внешний радиусы ярма, мм	78/178
Диаметр внутренней теплой вакуумной камеры пучка, мм	40
Радиус внешней вакуумной камеры магнита, мм	258/273

Отметим, что в статическом режиме криокулер используется для охлаждения 1 т холодной массы. Для каждого дипольного магнита планируется установить две криоголовки, чтобы обеспечить как статический, так и динамический режим изменения магнитного поля. Мощность динамических потерь магнитного поля включает в себя мощность динамических потерь в обмотке, гистерезисные потери в обмотке, матричные потери в обмотке, кабельные потери в обмотке, мощность гистерезисных потерь в магнитопроводе (ярме) сверхпроводящей обмотки, потери в азотном экране из-за вихревых токов. В случае использования магнитов ОИЯИ уровень динамических потерь ожидается менее 1,5 Вт.

Магнитное поле у головки криокулера не должно превышать 500 Гс, а в тоководах — 1 кГс. Предполагаемая оптимальная температура сверхпроводящих обмоток $T_{op} = 4,5$ К, максимальное повышение температуры равно $\Delta T = 0,5$ К ($\max \Delta T < 1$ К) при изменении магнитного поля.

Скорость изменения магнитного поля составит 2 Тл/мин. В течение 1 с поле изменится на 0,03 Тл, далее в течение 3–4 с реализуется плато, когда происходит облучение изослоя опухоли, затем цикл повторяется. Одним из ключевых аспектов являются расчеты мощности потерь для динамического режима изменения поля.

Особенностью гантри является то, что надо обеспечить циркуляцию газообразного гелия с комнатной температурой при вращении гантри от компрессора к головкам криокулеров. Если криоголовка может вращаться вместе с магнитами, то в соответствии с требованиями фирмы Sumitomo компрессор криокулера должен всегда находиться в горизонтальном состоянии. Это связано с наличием в компрессоре нескольких масляных контуров, для которых важно обеспечение горизонтального положения компрессора. Потенциальное решение — ферма с гантри должна осуществлять вращение на 180° как по часовой стрелке, так и против нее. Такое решение при гибких гелиевых шлангах длиной 30–35 м, закручивающихся и раскручивающихся при вращении криоголовки по часовой стрелке и против нее вместе с магнитами гантри, позволяет компрессору оставаться всегда в горизонтальном положении.

Обмотка возбуждения была разбита на секторы, количество витков в каждом секторе приведено в табл. 2 для двух вариантов. Однородность магнитного поля для исходного и модифицированного варианта обмотки показана на рис. 4. Относительная однородность магнитного поля $2 \cdot 10^{-4}$ обеспечивается в апертуре магнита $R \sim 10$ мм для исходного варианта обмотки (рис. 4). Ошибки магнитного поля $\delta B/B \cong 2 \cdot 10^{-4}$ приводят к 10 %-му смещению пучка на выходе дипольного магнита. Видно, что модифицированный вариант имеет существенно лучшую область однородности, чем исходный. Относительная однородность магнитного поля 10^{-4} обеспечивается в апертуре магнита $R \sim 15$ мм для модифицированного варианта обмотки (см. рис. 4).

Таблица 2. Количество витков в секторах сверхпроводящей обмотки

Номер сектора	Количество витков	
	Исходный вариант	Модифицированный вариант
1	146	133
2	142	78
3	135	103
4	124	126
5	111	99
6	95	21
7	76	49
8	56	64
9	34	108
10	11	87
11	—	48
12	—	26

Трехмерные расчеты магнитного поля в дипольных магнитах выполнены с помощью кода ОПЕРА (рис. 5). Геометрия обмотки задавалась наборами дуг окружности различного радиуса. Ядро магнита изогнуто в соответствии с требуемым радиусом. Внешняя стальная вакуумная камера состоит из кусков труб с внутренним диаметром 516 мм.

Максимум магнитного поля соответствует 3,2 Тл. Распределение магнитного поля вдоль поперечной координаты представлено на рис. 6.

Однородность магнитного поля на осевой линии магнита приведена на рис. 7. Исходный угол яра магнита 11,25°. Изменение угла яра магнита до 0° (рис. 8) имеет положительное, но явно недостаточное влияние на однородность интеграла магнитного поля (рис. 7). Главный эффект оказали манипуляции с формой обмотки магнита.

Для коррекции однородности интеграла магнитного поля в конструкцию обмотки магнита были внесены следующие изменения: с правой стороны магнита секции обмотки

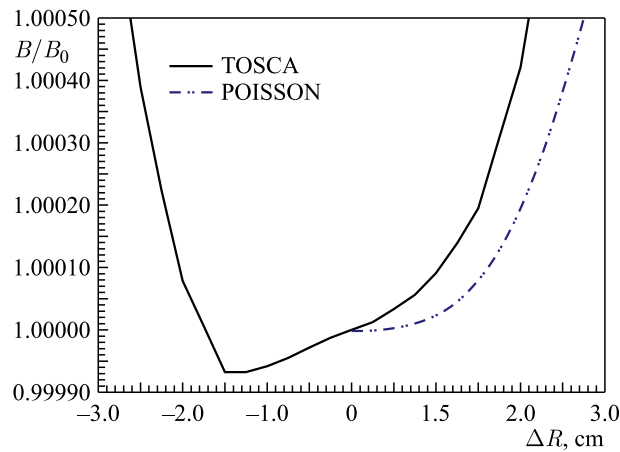


Рис. 7. Однородность магнитного поля вдоль поперечной оси магнита

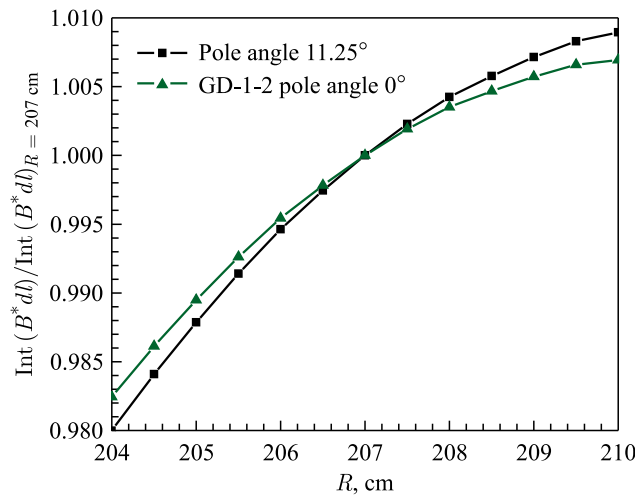


Рис. 8. Нормализованное распределение продольного интеграла магнитного поля

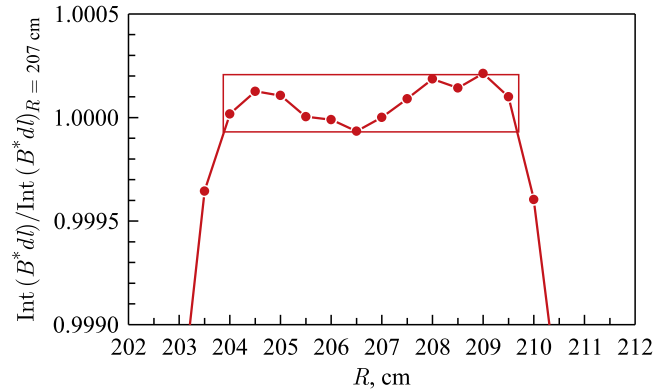


Рис. 9. Финальное нормализованное распределение продольного интеграла магнитного поля

1–7 были смещены в вертикальном направлении на 1,5 мм (от средней плоскости); с левой стороны магнита секции обмотки 1–2 были приближены к центру магнита на 10 мм. Смещение обмотки на 10 мм к центру сокращает диаметр внутренней вакуумной камеры до 40 мм от медианной плоскости.

Относительная вариация интеграла магнитного поля равна $\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$ (рис. 9) для поперечной апертуры $\Delta X = \pm 3$ см.

Дипольный магнит наряду с дипольной компонентой имеет квадрупольную компоненту с максимальным градиентом $k = 1/B \times dB/dr = 0,0036 \text{ м}^{-2}$ и секступольную компоненту с максимальным градиентом $k' = 1/BR \times d^2B/dr^2 = 1,1 \text{ м}^{-3}$. Величины этих компонент достаточно малы, и они не вносят заметного вклада в увеличение размера пучка при его транспортировке в магнитной системе гантри.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыресин Е. М. и др. Проект сверхпроводящего медицинского синхротрона для адронной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 2(172). С. 328.
2. Iwata Y. et al. Design of Superconducting Rotating-Gantry for Heavy Ion Therapy // IPAC 2012, New Orleans, USA, 2012. P. 4080.
3. Костромин С. А., Сыресин Е. М. Тенденции в ускорительной технике для адронной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 7(184). С. 1346.
4. Syresin E., Morozov N., Shvidkiy D. Comparisons and Simulations of Superconducting Dipole Magnets for JINR Ion Gantry // IPAC14, Dresden, Germany, 2014. WEPRO092. P. 2174.

Получено 1 апреля 2016 г.