

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СЕКТОРНОГО ЦИКЛОТРОНА ДЛЯ АДРОННОЙ ТЕРАПИИ

В. Л. Смирнов¹, С. Б. Ворожцов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе обсуждается возможность создания магнитной системы циклотрона на базе сверхпроводящих секторных магнитов. Данный циклотрон является основным (бустерным) ускорителем установки, предназначенной для получения углерода $^{12}\text{C}^{6+}$ с энергией 400 МэВ/нуклон с целью применения в адронной терапии. Результаты предварительных исследований по разработке такой установки приведены в предшествующих публикациях. В статье рассматриваются различные варианты возможных конфигураций магнитной системы бустерного ускорителя в зависимости от уровня поля. Также выполнен анализ влияния положения и формы сверхпроводящих обмоток на характеристики магнитного поля. Сделан выбор наиболее оптимальной структуры магнитной системы циклотрона.

In this work possibility of creation of a cyclotron magnetic system on the basis of superconducting sector magnets is discussed. This cyclotron is the main accelerator (booster) of the setup intended for receiving $^{12}\text{C}^{6+}$ ions with energy 400 MeV/nucleon for hadron therapy. Results of preliminary study on development of this facility are given in the previous publications. In this work various options of possible configurations of magnetic system of the booster depending on field level are considered. The analysis of a dependence of characteristics of the magnetic field on location and form of superconducting coils is also described. The choice of the most optimum structure of the cyclotron magnetic system is made.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Задача создания ускорителей для получения пучков углерода с энергией 400–450 МэВ/нуклон видится все более актуальной в настоящее время. До сих пор для адронной терапии в качестве источника заряженных частиц применялись в основном синхротроны [1–3]. Изучение возможностей изохронных циклотронов, широко используемых для протонной терапии, может оказаться более эффективным как альтернатива синхротронам. Существующие проекты компактных сверхпроводящих циклотронов для адронной терапии наряду с преимуществами имеют существенные недостатки [4]. Установка на базе каскада циклотронов с применением сверхпроводящего секторного циклотрона в качестве основного (бустерного) ускорителя [5] потенциально выглядит более

¹E-mail: vsmirnov@jinr.ru

перспективной для данного приложения. Результаты предварительных исследований по разработке такого комплекса ускорителей, предназначенного для получения углерода $^{12}\text{C}^{6+}$ с энергией 400 МэВ/нуклон, приведены в [6]. В настоящем исследовании рассматривается возможность создания сверхпроводящего секторного магнита для этой установки. Все расчеты магнитного поля выполнялись при помощи трехмерной программы Opera3D.

1. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СЕКТОРНЫЙ МАГНИТ

Проектирование установки на базе сверхпроводящего секторного циклотрона предполагает соблюдение ряда условий. Во-первых, ускоритель должен иметь как можно меньшие размеры и вес. Поэтому целесообразно проектировать его для работы с максимально высоким магнитным полем. Во-вторых, энергию инжекции, т.е. магнитную жесткость первой орбиты пучка в циклотроне, необходимо выбирать достаточно умеренную для того, чтобы инжектор имел приемлемые размеры и относительную простоту конструкции. В-третьих, конструкция магнитной системы должна быть практически реализуемой, т.е. параметры сверхпроводящей обмотки (плотность тока и действующие пондеромоторные силы) должны соответствовать поставленной задаче. При этом необходимо, чтобы пространство между секторами допускало установку элементов ускоряющей системы, инжекции пучка и т.д. [7]. Отдельной задачей выступает создание такой структуры, которая наряду с обеспечением изохронности магнитного поля позволяет ускорять пучок с минимальным количеством пересечений опасных резонансов. Задача создания такого ускорителя исследовалась при разных уровнях магнитного поля и при различном количестве секторов. Для решения поставленной задачи выполнялись исследования, начиная с максимального уровня азимутально-среднего магнитного поля, соответствующего значению циклотронной единицы 3 Тл. Будем сокращенно называть этот параметр «уровень поля». Далее, поле уменьшалось по мере оптимизации системы для получения реалистичной конструкции магнита.

2. МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ С УРОВНЕМ ПОЛЯ 2–3 Тл

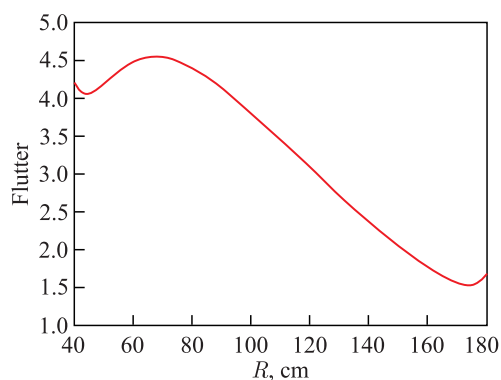


Рис. 1. Флаттер магнитного поля в циклотроне с уровнем поля ~ 3 Тл

В первоначальном варианте магнитная структура при уровне поля 3 Тл была рассчитана в четырехсекторном варианте с целью получения максимально возможного флаттера магнитного поля. Однако за счет заметного изменения флаттера вдоль радиуса (рис. 1) частота аксиальных бетатронных колебаний Q_z уменьшается от 2,2 в начале ускорения до 0,8 на конечном радиусе, что приводит к пересечению рабочей точкой нескольких опасных резонансов, включая $Q_z = 2$, $2Q_z = 3$ и $Q_z = 1$. При этом изохронное поле на радиусе инжекции за счет поправки от флаттера снижается от 3 до 2,4 Тл.

Для подавления столь заметного изменения Q_z с увеличением радиуса в магнитную структуру была введена пространственная вариация поля с максимальным углом спирали 30° на конечном радиусе (рис. 2), что привело к снижению вариации частоты Q_z с увеличением радиуса в 1,5 раза (рис. 3). Основные параметры этого режима приведены в табл. 1. Достигнутое снижение вариации аксиальной частоты все еще недостаточно с точки зрения поперечной устойчивости пучка в процессе ускорения. Кроме того, максимальное поле в зазоре секторного магнита — 10 Тл и инженерная плотность тока в сверхпроводящей обмотке — 170 А/мм^2 , что намного превышает безопасный с точки зрения перехода проводника обмотки в резистивное состояние (квенч) предел. Снижение

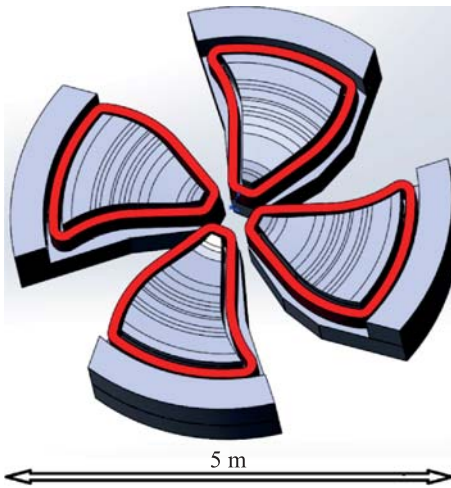


Рис. 2. Магнитная структура бустера при уровне магнитного поля 3 Тл и угле спирали 30°

Таблица 1. Основные параметры циклотрона с уровнем поля 3 Тл и углом спирали 30°

Параметр	Значение
Тип иона	$^{12}\text{C}^{6+}$
Число секторов	4
Среднее магнитное поле: инжекция/вывод, Тл	2,4/4,5
Энергия: инжекция/вывод, МэВ/нуклон	30/400
Радиус: инжекция/вывод, см	40/160
Воздушный зазор между секторами, мм	14–140
Габариты: диаметр × высота, м	$4,7 \times 1,5$
Общий вес (секторные магниты), т	120

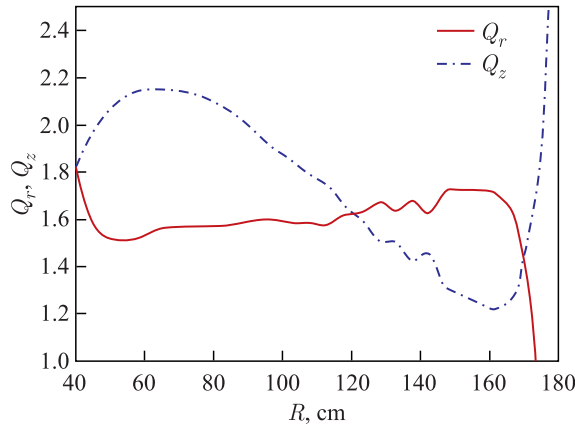


Рис. 3. Частоты свободных колебаний частиц в циклотроне с уровнем поля 3 Тл и углом спирали 30°

плотности тока за счет увеличения поперечного сечения обмотки ограничено доступным для этой цели пространством, определяемым необходимостью размещения криостата в данной области. Все эти негативные факторы приводят к необходимости уменьшения уровня поля.

В дальнейшем изучались возможности имплементации различных изменений магнитной системы при условии возврата к более простой радиально-секторной форме обмотки, а именно:

- 1) введение изгиба обмотки в аксиальном направлении при уровне поля 3 Тл;
- 2) введение угла между плоскостями верхней и нижней обмоток $\sim 8^\circ$ при уровне магнитного поля 3 Тл;
- 3) увеличение количества секторов до шести при уровне поля 3 Тл;
- 4) введение центральной кольцевой обмотки и снижение уровня поля до 2,5 Тл;
- 5) уменьшение уровня поля до 2 Тл.

Итогом всех произведенных модификаций явилось снижение плотности тока в сверхпроводящей обмотке до приемлемого значения 65 А/мм^2 . При этом поставленная задача — снижение вариации частоты аксиальных колебаний до достаточного уровня — все еще не была достигнута. Эффект вводимых изменений можно пояснить следующим образом.

1. Изгиб обмотки в аксиальном направлении (рис. 4) приводит к уменьшению флаттера магнитного поля и, соответственно, частоты Q_z в области максимального аксиального зазора между обмотками.

2. Введение угла раствора между обмотками также приводит к уменьшению флаттера на средних радиусах диапазона ускорения пучка. Однако это вызывает падение уровня поля в этой области.

3. Увеличение количества секторов ведет к снижению флаттера во всем диапазоне радиусов, и, как следствие, происходит сдвиг радиальной зависимости частоты Q_z в сторону меньших значений.

4. Центральная кольцевая обмотка (рис. 5) призвана компенсировать эффект падения уровня поля за счет увеличения аксиального расстояния между обмотками на начальных радиусах.

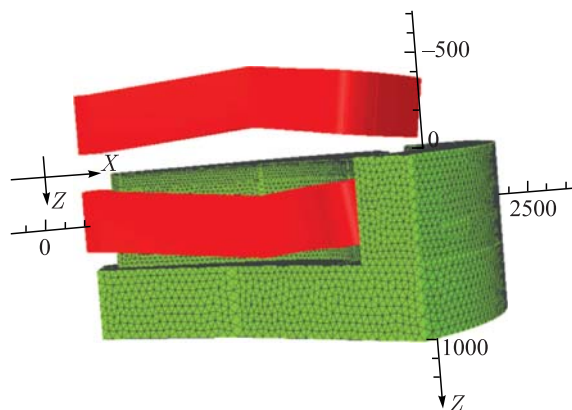


Рис. 4. Сверхпроводящая обмотка с изгибом в аксиальном направлении для циклотрона с уровнем поля 2,5 Тл

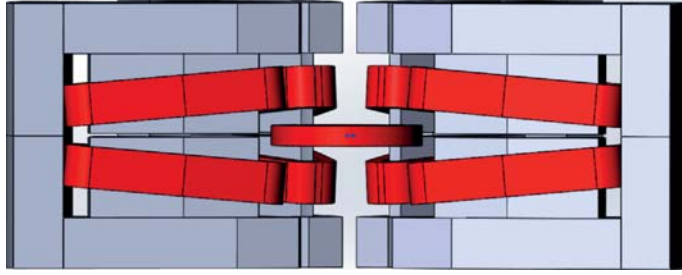


Рис. 5. Магнитная структура с центральной обмоткой циклотрона с уровнем поля 2 Тл

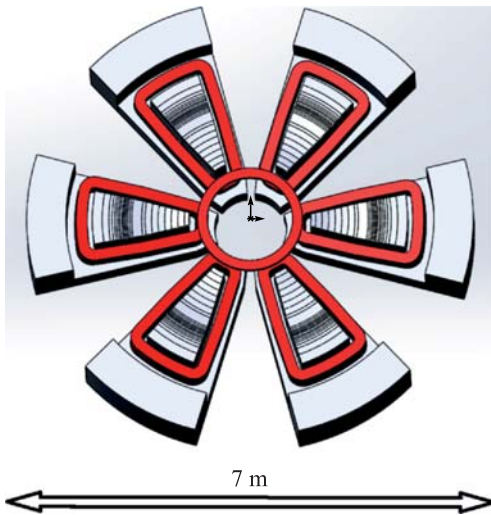


Рис. 6. Шестисекторная магнитная структура с уровнем поля 2 Тл и центральной обмоткой. Плоскости секторных обмоток расположены под углом 8° друг к другу

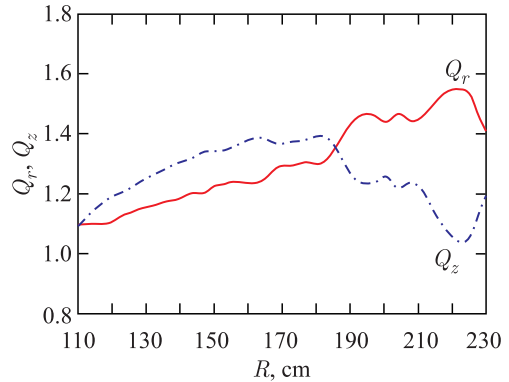


Рис. 7. Частоты свободных колебаний частиц для структуры, показанной на рис. 6

Хотя структура с шестью секторами, уровнем поля 2 Тл и внутренней кольцевой обмоткой (рис. 6) уже допускает приемлемое значение плотности тока в обмотках, рабочая точка находится вблизи опасного резонанса $Q_z = 1$ ($4Q_z = 4$) в зоне конечных радиусов, где количество оборотов достаточно велико (рис. 7). Да и сама структура с использованием дополнительной центральной обмотки довольно проблематична с практической точки зрения. Общий вес магнитов с обмотками составляет 300 т, а диаметр ускорителя — 6,8 м. Максимальное поле в зазоре секторного магнита достигает 8,5 Тл.

3. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ПРИ УРОВНЕ ПОЛЯ 1,6 Тл

Компенсация недостающего магнитного поля на средних радиусах диапазона ускорения за счет увеличения азимутального размера секторов позволяет исключить центральную обмотку из магнитной системы. Однако требование достаточного простран-

ства между соседними секторами для размещения криостата обмотки (50–70 мм) и ВЧ-системы при условии минимального аксиального расстояния между обмотками не ниже 120 мм приводит к необходимости снижения уровня поля до 1,6 Тл. При этом радиус вывода иона с энергией 400 МэВ/нуклон увеличивается до 280 см, а внешний диаметр циклотрона достигает 8 м (рис. 8). Необходимое уменьшение флаттера магнитного поля на средних радиусах достигается выпуклой формой обмотки в этой зоне, что также является благоприятным фактором для снижения пондеромоторных сил, действующих на обмотку. Величина магнитной индукции в сечении обмотки достигает 7,2 Тл. Максимальное поле в зазоре секторного магнита составляет 7 Тл, в ярме — 2,7 Тл, в полюсных наконечниках — 8 Тл. Основные параметры ускорителя рассмотренной структуры приведены в табл. 2.

Внешние размеры ярма отдельного сектора: $3,1 \times 2,0 \times 2,2$ м. Вес сектора ~ 52 т. Плотность тока в сверхпроводящей обмотке с поперечным сечением 170×330 мм составляет 62 А/мм². Угол раствора между обмотками равен 8° . Аксиальное профилирование полюсной накладкой и полюса обеспечивает необходимую изохронную зависимость среднего магнитного поля от радиуса (рис. 9, 10).

Наличие дополнительного пространства между соседними секторами позволяет варьировать азимутальный размер сектора, что в комбинации с положением обмотки допускает формирование такой карты магнитного поля, флаттер которой растет (рис. 11), а вариация частоты Q_z минимальна (рис. 12). Изменение азимутального размера обмотки приводит к сдвигу частоты во всем диапазоне радиусов. Таким образом, становится возможным исключить пересечение рабочей точкой опасных резонансов, связанных с аксиальной ча-



Рис. 8. Магнитная система бустерного циклотрона с уровнем поля 1,6 Тл

Таблица 2. Основные параметры циклотрона с уровнем поля 1,6 Тл

Параметр	Значение
Тип иона	$^{12}\text{C}^{6+}$
Число секторов	6
Частота ВЧ, МГц	73,56
Гармоника ВЧ	6
Среднее магнитное поле: инжекция/вывод, Тл	1,64/2,11
Максимальное магнитное поле: инжекция/вывод, Тл	4,22/6,40
Энергия: инжекция/вывод, МэВ/нуклон	70/400
Радиус: инжекция/вывод, см	143/278
Азимутальный размер сектора, °	40–30
Воздушный зазор между секторами, мм	88–135
Габариты: диаметр \times высота, м	$8 \times 2,2$
Общий вес (секторные магниты), т	310

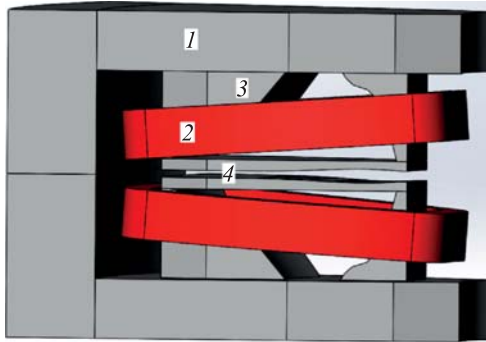


Рис. 9. Секторный магнит циклотрона с уровнем поля 1,6 Тл: 1 — ярмо; 2 — сверхпроводящая обмотка; 3 — полюс; 4 — полюсная накладка

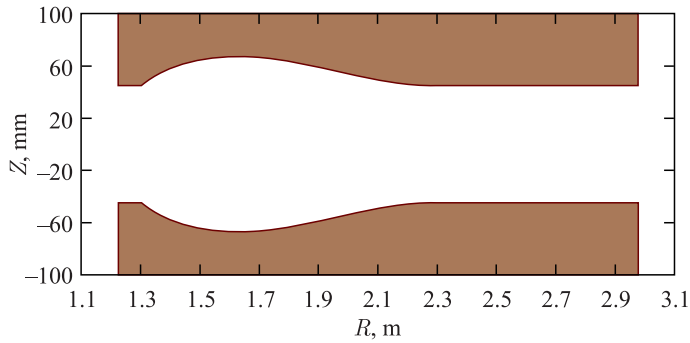


Рис. 10. Аксиальное профилирование полюсной накладки

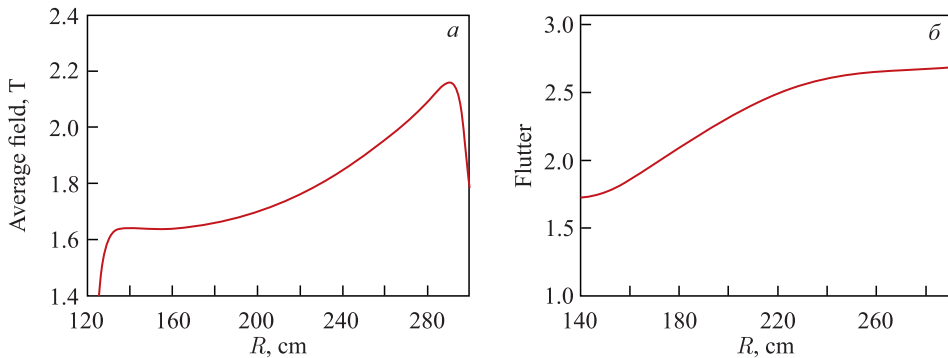


Рис. 11. Зависимости азимутально-среднего магнитного поля (а) и флаттера (б) от радиуса циклотрона с уровнем поля 1,6 Тл

стойкой бетатронных колебаний ($Q_z = 1$, $2Q_z = 3$, $Q_r - Q_z = 0$). К сожалению, все еще не удается избежать пересечения резонансов $2Q_z - Q_r = 1$ и $2Q_r - Q_z = 2$, опасность которых предстоит в дальнейшем исследовать.

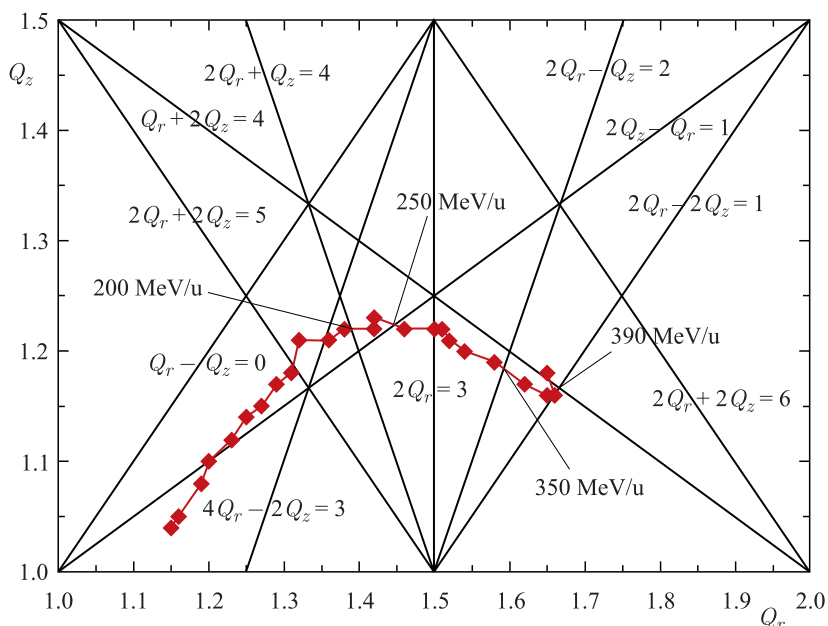


Рис. 12. Операционная диаграмма циклотрона с уровнем поля 1,6 Тл

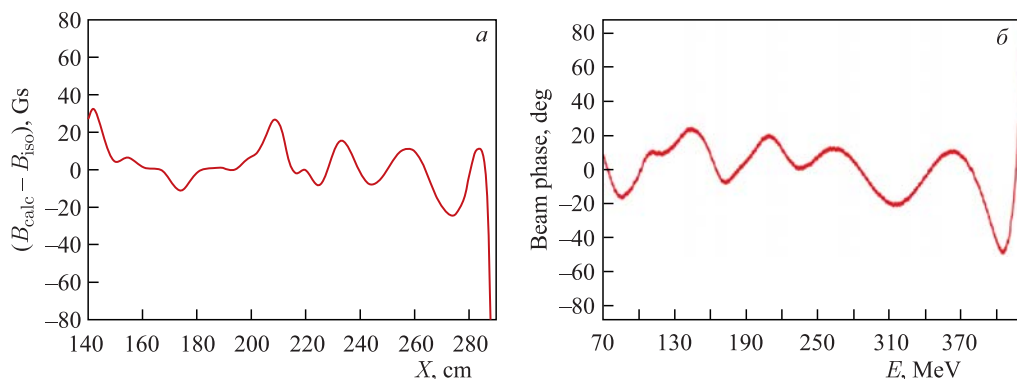


Рис. 13. а) Отклонение поля вдоль осевой линии секторного магнита от такого значения, при котором обеспечивается изохронизация карты магнитного поля. б) ВЧ-фаза пучка

При использовании алгоритма изохронизации магнитного поля, описанного в работе [6], удалось добиться отклонения ВЧ-фазы пучка от оптимальной величины не более чем на $\pm 30^\circ$. Отклонение величины магнитной индукции вдоль центральной линии сектора от требуемого значения колеблется в диапазоне ± 2 мТл (рис. 13).

При расчете ВЧ-фазы пучка набор энергии задавался аналитически. Считалось, что на каждой орбите в трех долинах расположены ускоряющие зазоры с амплитудой ВЧ-поля 200 кВ. Набор энергии вычисляется с учетом фазы ВЧ-частицы при прохождении соответствующего зазора. Количество оборотов центральной частицы при этом составляет 1240.

4. СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВВОДА ПУЧКА В БУСТЕРНЫЙ ЦИКЛОТРОН

В работе [6] выбрано значение энергии инжекции в бустерный циклотрон 70 МэВ/нуклон. Система ввода пучка в этот ускоритель (рис. 14) включает в себя 4 магнитных канала (рис. 15) и электростатический дефлектор. Центральное поле в каналах 1,2, 1,4, 1,4 и 0,8 Тл. Четвертый магнитный канал имеет в своей конструкции обмотку, пересекающую медианную плоскость и отделяющую циркулирующий пучок от инжектируемого (септум). Напряженность электрического поля на дефлекторе выбрана 80–90 кВ/см с возможностью небольшой настройки для обеспечения приемлемого центрирования вводимого пучка.

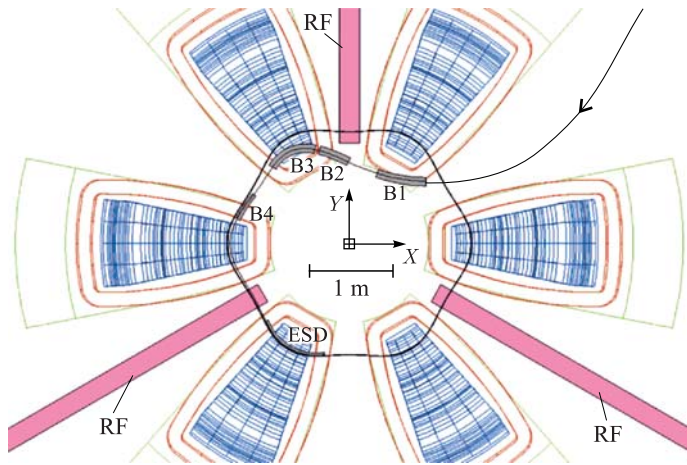


Рис. 14. Ввод пучка в бустерный циклотрон

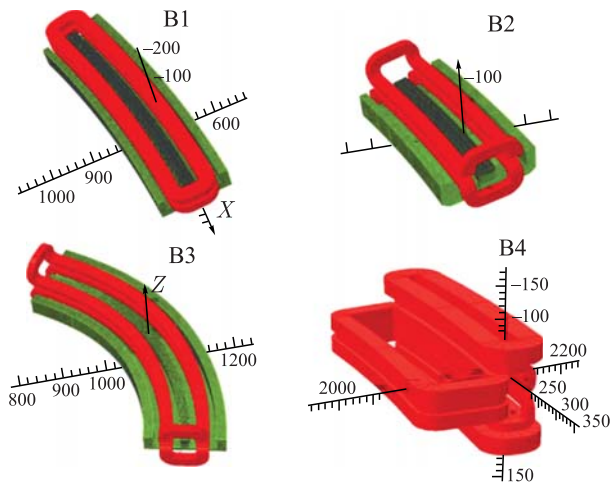


Рис. 15. Магнитные каналы для ввода пучка в бустер

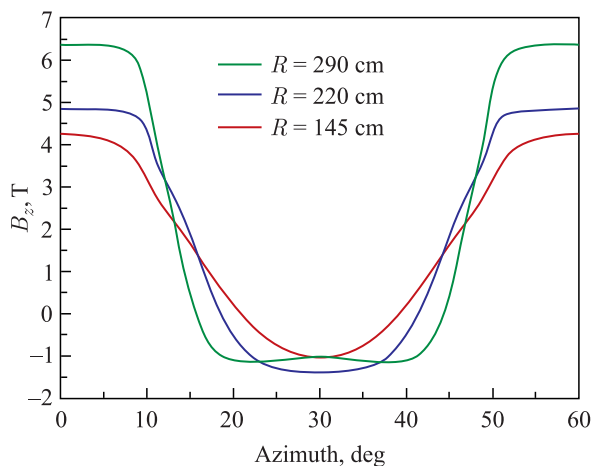


Рис. 16. Распределения магнитного поля вдоль азимута для различных радиусов

Создание структуры каналов, которые имеют растущие или спадающие магнитные поля, позволяет компенсировать дефокусирующий эффект основного поля на поперечные характеристики пучка. Аксиальное расстояние между стенками криостатов обмоток секторного магнита в области инжекции пучка ~ 400 мм, что достаточно для расположения магнитных каналов в этом пространстве. Кроме того, расстояние между полюсами секторного магнита в зоне расположения третьего магнитного канала достаточно велико для того, чтобы можно было установить этот канал между полюсами. При этом не возникает проблемы с формированием требуемого изохронного поля, поскольку основной вклад в поле циклотрона привносится за счет сверхпроводящих обмоток. Направления магнитной индукции в секторах и долинах противоположны. Значение его максимально в области средних радиусов и достигает $\sim 1,4$ Тл (рис. 16). В зоне ввода пучка вблизи начальной орбиты индукция также высока: $\sim 1,2$ Тл.

Траектория пучка в долине отлична от прямой линии, причем пучок при прохождении долины двигается попеременно в растущем и в спадающем магнитном поле, чем обеспечивается знакопеременная фокусировка частиц. Для эффективной инжекции пучка в ускоритель необходимо на входе в долину сформировать пучок таким образом, чтобы разброс по углам был минимальным. Для анализа динамики частиц были выбраны следующие параметры пучка в точке входа в долину вблизи конечного радиуса: поперечные эмиттансы $2\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, поперечные размеры 5 мм, твист-параметр α равен нулю. Разброс по углам при этом меньше ± 1 мрад. Разделение внутренних орбит на входе в электростатический дефлектор составляет ~ 4 мм. При этом потери частиц на септуме дефлектора находятся на уровне $\sim 15\%$ при растущей толщине септума вдоль его длины от 0,2 до 0,5 мм. При трассировке инжектируемого пучка его поперечные размеры в процессе ввода в бустер не превышают ± 6 мм. Размеры пучка при прохождении дефлектора оказываются достаточно приемлемыми (± 4 мм). Таким образом, для апертуры дефлектора ~ 10 мм потери частиц при прохождении этого устройства малы. Все вышесказанное свидетельствует о достаточном соответствии разработанных элементов ввода пучка в ускоритель требованиям, накладываемым со стороны динамики частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена начальная проработка конструкции сверхпроводящего секторного магнита наряду со структурными элементами системы ввода пучка в бустерный циклотрон для ускорения ионов углерода с энергией 400 МэВ/нуклон. Магнитное поле достигает максимального значения $\sim 6,4$ Тл в медианной плоскости секторного магнита на радиусе вывода для обеспечения необходимой изохронной карты поля установки. Особенностью магнита является использование радиального градиента магнитного поля, создаваемого наклоном сверхпроводящих обмоток. Дальнейшие разработки касаются создания механической модели магнита для изучения возможностей компенсации значительных электромагнитных усилий, возникающих в рассматриваемой структуре. Разработанные элементы системы ввода пучка отвечают всем необходимым требованиям, накладываемым со стороны динамики частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ondreka D., Weinrich U.* The Heidelberg Ion Therapy (HIT) Accelerator Coming into Operation (GSI, Germany) // Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 2008. P. 979.
2. *Rossi S.* // Eur. Phys. J. Plus. 2011. V. 126, No. 8. P. 78.
3. *Jian Shi et al.* Slow Extraction Design of HIMM // Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, 2013. P. 2567.
4. *Smirnov V. L., Vorozhtsov S. B.* Modern Compact Accelerators of Cyclotron Type for Medical Applications // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47, No. 5. P. 863–883.
5. *Schippers J. M. et al.* A Novel Design of a Cyclotron Based Accelerator System for Multi-Ions Therapy // Proc. of HIAT09, Venice, Italy, 2009.
6. *Smirnov V., Vorozhtsov S.* A Coupled Cyclotron Solution for Carbon Ions Acceleration // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (CYCLOTRONS'16), Zurich, Switzerland, 2016.
7. *Sanfilippo S. et al.* Design Study of a 3.5 T Superconducting Sector Magnet in a 450 MeV/nuc. Booster Cyclotron for Carbon Ion Therapy // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21, No. 3. P. 1838–1843.

Получено 17 ноября 2016 г.