

P9-2007-128

О. Н. Борисов, Б. Н. Гикал, И. А. Иваненко,
Н. Ю. Казаринов, Е. В. Самсонов

ДИНАМИКА ПУЧКА В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕНИЯ
В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60

Борисов О. Н. и др.
Динамика пучка в процессе ускорения в изохронном
циклотроне ДЦ-60

P9-2007-128

Рассмотрены динамические характеристики магнитного поля циклотрона ДЦ-60 на основе траекторного анализа. Целью являлась оптимизация условий ускорения в центральной области циклотрона, в основной области ускорения и в области вывода пучков из циклотрона. Анализ проводился для трех характерных режимов ускорения на верхнем (1,65 Тл), среднем (1,43 Тл) и нижнем (1,25 Тл) уровнях магнитного поля. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что сформированное магнитное поле циклотрона ДЦ-60 обеспечивает фокусировку и эффективность ускорения пучков ионов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Borisov O. N. et al.
The Beam Dynamics in the DC-60 Isochronous Cyclotron

P9-2007-128

At the present work the dynamic characteristics of the magnetic field of cyclotron DC-60 are considered on the basis of the trajectory analysis. The purpose of the analysis was the optimization of the acceleration conditions in the central area of the cyclotron, in the main area of acceleration and in the area of the beam extraction from the cyclotron. The analysis was carried out for three characteristic modes of the acceleration: on the upper (1.65 T), average (1.43 T) and lower (1.25 T) magnetic field levels. The calculations and later, the experiments have shown that the formed magnetic field of the DC-60 cyclotron provides the focusing and the good efficiency of the ion beams acceleration.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований разработан и создан изохронный циклотрон ДЦ-60, предназначенный для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду A/Z в диапазоне 6–12 до энергий от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон [1]. Магнитная структура циклотрона позволяет осуществлять плавную регулировку энергии ускоренных пучков в пределах $\pm 25\%$ от номинальной. Это достигается за счет изменения уровня среднего магнитного поля от 1,25 до 1,65 Тл без нарушения фокусировки и эффективности ускорения пучков ионов.

На рис. 1 представлена рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60, которая связывает среднее магнитное поле в центре циклотрона, энергию пучка на радиусе вывода $R = 0,7$ м, частоту обращения ионов и кратность ускоряющего ВЧ-поля. Условия изохронизма при ускорении ионов с $A/Z = 6–12$ в диапазоне уровней магнитного поля 1,25–1,65 Тл обеспечиваются формированием радиально растущего на 5–30 Гс среднего магнитного поля [2–4].

Результаты измерения среднего магнитного поля циклотрона ДЦ-60 представлены на рис. 2.

Фокусирующие свойства магнитного поля обеспечиваются 4-секторной магнитной структурой рабочей области циклотрона, создающей необходимый уровень вариации магнитного поля. Частоты свободных колебаний иона в основной области ускорения (0,2–0,7 м) лежат в диапазоне $1,01 < Q_r < 1,02$ и $0,3 < Q_z < 0,4$ и обеспечивают радиальную и вертикальную фокусировку ускоряемых пучков ионов. В центральной области фокусировка обеспечена радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием ускоряющего ВЧ-поля.

Сектора имеют изменяющуюся азимутальную протяженность от 36° на радиусе 80 мм до 50° на радиусе 805 мм, без спиральности. Зазор между верхним и нижним секторами определяет апертуру ускоряющей области и составляет 33 мм при вертикальном размере ускоряемого пучка ≈ 12 мм. Зависимости флаттера магнитного поля на трех уровнях среднего поля показаны на рис. 3.

Необходимый темп ускорения поддерживается при помощи двух 40-градусных дуантов, размещенных между секторами в противоположных долинах. Оптимальное ускоряющее напряжение на дуантах 50 кВ.

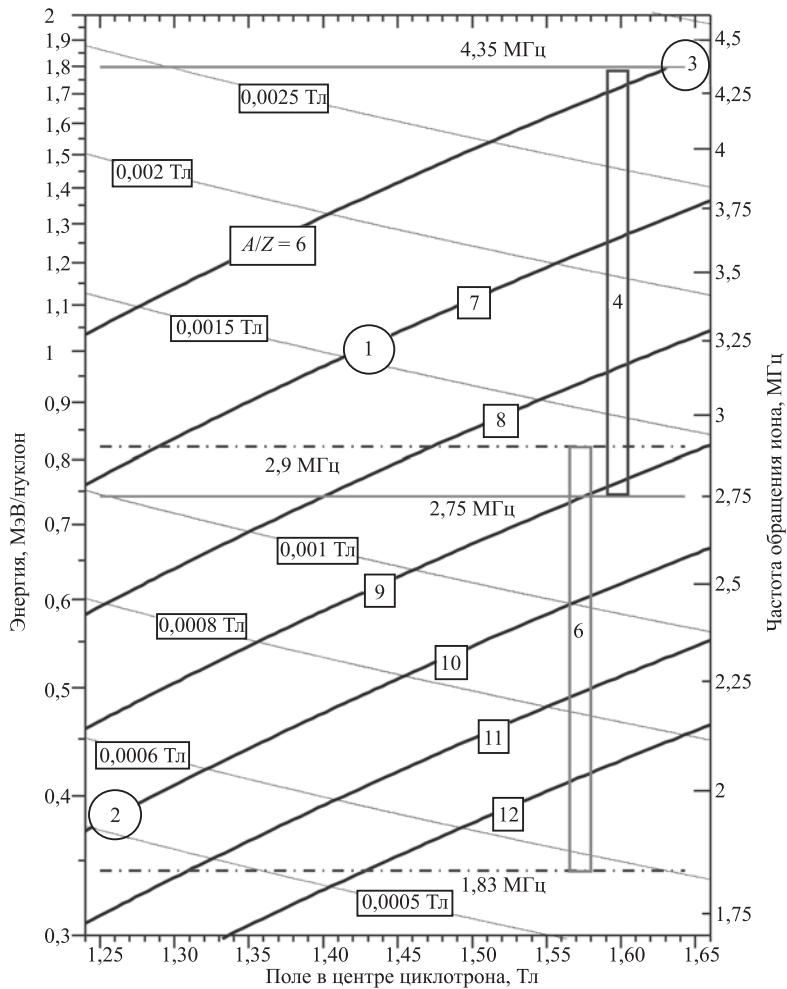


Рис. 1. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60. Пронумерованными кружками показаны характерные режимы ускорения, в которых исследовались динамические характеристики сформированного поля

В ходе численного формирования магнитной структуры циклотрона проведены исследования динамических характеристик магнитного поля на основе траекторного анализа. Целью являлась оптимизация условий ускорения в центральной области циклотрона, в основной области ускорения и в области вывода пучков из циклотрона. Анализ проводился для трех характерных режимов ускорения на верхнем (1,65 Тл), среднем (1,43 Тл) и нижнем (1,25 Тл)

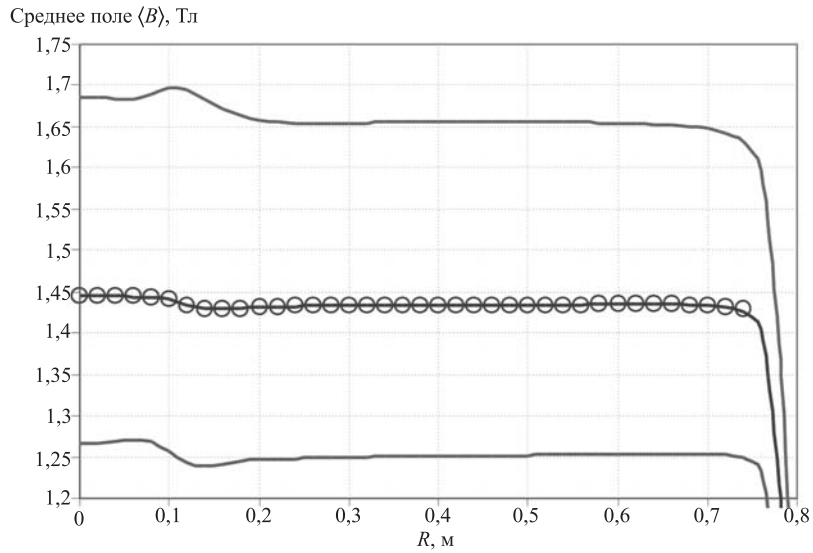


Рис. 2. Измеренное среднее магнитное поле циклотрона ДЦ-60 на трех уровнях возбуждения электромагнита (сплошные линии). Кружки — расчетное изохронное среднее магнитное поле на уровне 1,43 Тл при ускорении ионов с $A/Z = 7$ в режиме № 1 (рис.1)

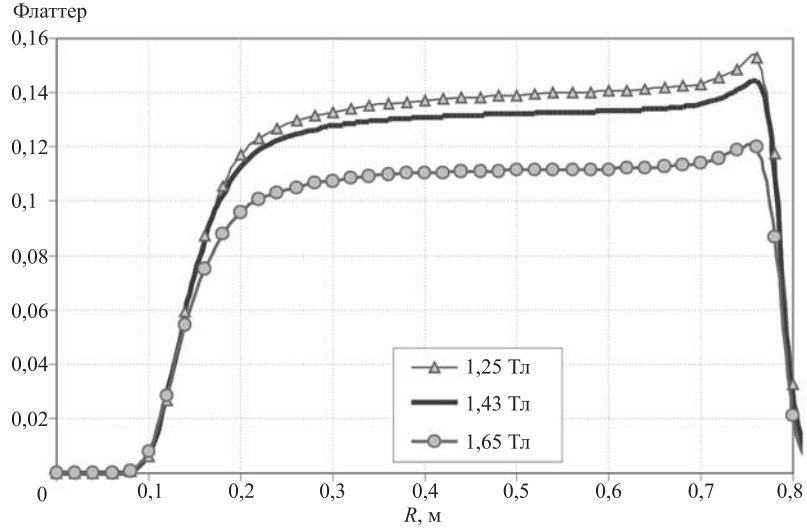


Рис. 3. Радиальное распределение флаттера измеренного магнитного поля для трех уровней среднего поля 1,25, 1,43 и 1,65 Тл

уровнях магнитного поля. Основные параметры характерных режимов ускорения и их положение на рабочей диаграмме представлены на рис. 1 в виде пронумерованных кружков и в таблице.

Характерные режимы ускорения

№ режима	A/Z	B_0 , Тл	Частота генератора, МГц	Кратность ускорения	U_{dee} , кВ	U_{inj} , кВ
1	7	1,43	12,67	4	50	12,1
2	10	1,25	11,616	6	50	9,23
3	6	1,65	17	4	50	18,4

Примечание. U_{dee} — напряжение на дуантах, U_{inj} — напряжение инжекции.

1. РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ С $A/Z = 7$ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА УРОВНЕ 1,43 Тл

Магнитное поле на уровне 1,43 Тл в режиме ускорения иона с $A/Z = 7$ сформировано только за счет железных масс. Как видно из рис. 2 и 4, сформированное магнитное поле находится в хорошем соответствии с изохронным распределением. Точность численного формирования лучше чем 10^{-3} .

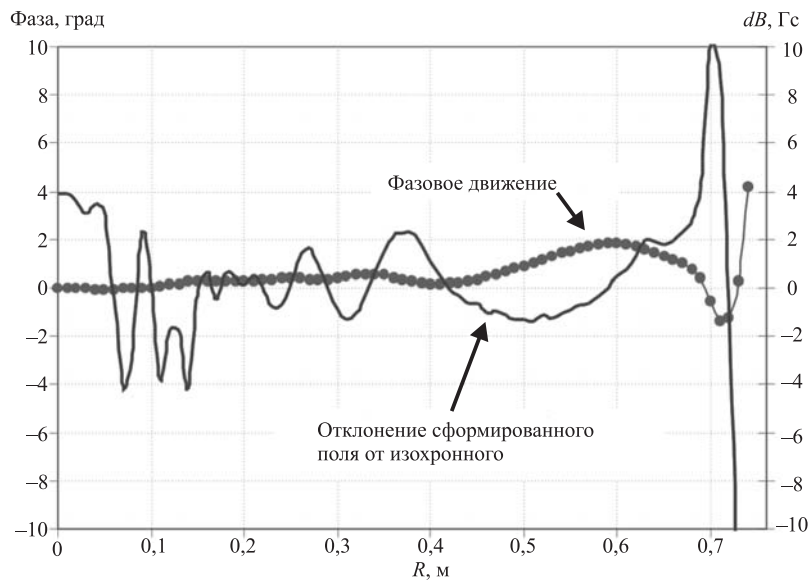


Рис. 4. Равновесная фаза ускоряемого иона с отношением массы к заряду $A/Z = 7$ в сформированном магнитном поле на уровне 1,43 Тл и отклонение сформированного магнитного поля от изохронного

В связи с этим оптимизация магнитного поля при помощи концентрических корректирующих катушек не требуется. Проведенный расчет динамики рассматриваемых ионов показал, что дрейф фазы, вызванный отличием сформированного магнитного поля от изохронного распределения (рис. 4), находится в пределах $\pm 2^\circ$ ВЧ, что может рассматриваться как очень хороший результат.

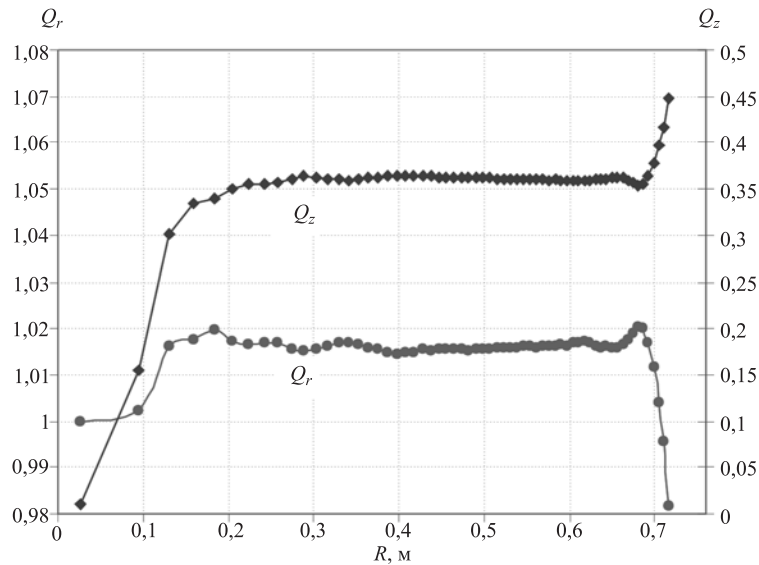


Рис. 5. Частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний иона с отношением массы к заряду $A/Z = 7$ в сформированном магнитном поле на уровне 1,43 Тл

Фокусирующие свойства магнитного поля в основной области ускорения обеспечиваются азимутальной вариацией поля, при которой частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний иона имеют значения $1,015 < Q_r < 1,02$ и $0,3 < Q_z < 0,4$ и расположены далеко от резонансов $Q_z = 0,5$ и $2Q_z = Q_r$ (рис. 5). При апертуре рабочей области 33 мм фокусировка обеспечивает вертикальный размер пучка не более 12 мм при ускорении до радиуса вывода $R = 0,7$ м.

Сформированное магнитное поле на уровне 1,43 Тл позволяет осуществлять эффективный захват в ускорение и создает оптимальные условия движения пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 7$ в центральной области циклотрона. Радиальный и вертикальный эмиттансы пучка в начале ускорения не превышают $200 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Магнитное поле в области центральной пробки не имеет вариации (рис. 3), поэтому необходимая вертикальная фокусировка пучка на первых оборотах обеспечивается отрицательным радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием

электрического ВЧ-поля в ускоряющих зазорах. На рис. 6 представлено горизонтальное и вертикальное движение рассматриваемого пучка ионов. Темп ускорения и влияние фокусирующих сил позволяют пучку беспрепятственно обойти элементы центральной области, оставаясь в пределах вертикальной апертуры в 33 мм.

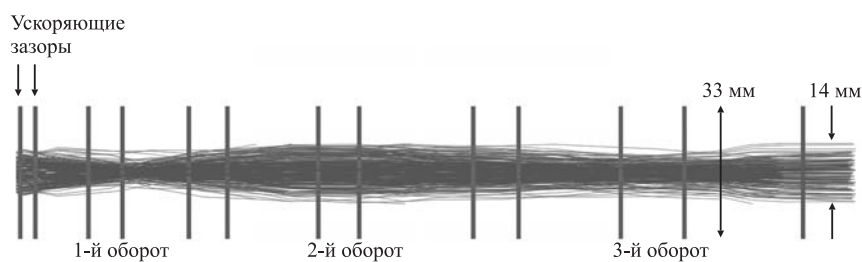
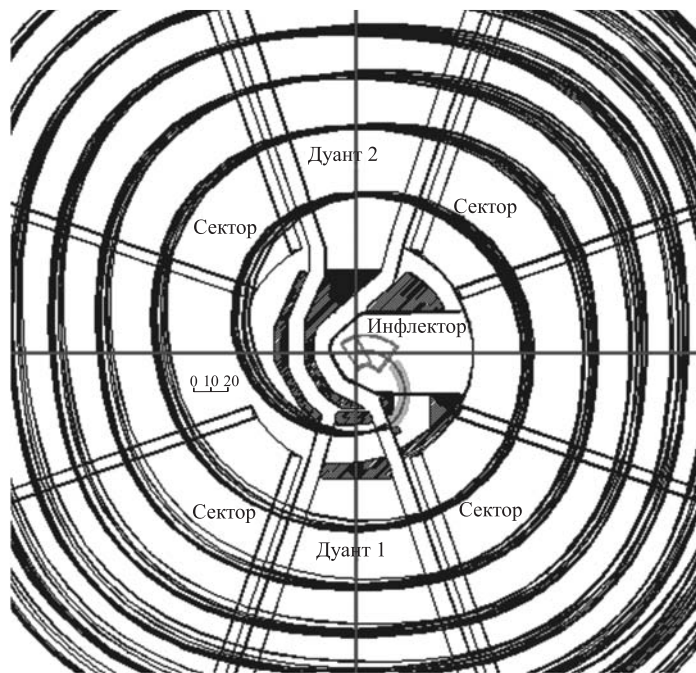


Рис. 6. Горизонтальное (вверху) и вертикальное (внизу) движение пучка ионов с $A/Z = 7$ в центре циклотрона при ускорении в сформированном магнитном поле на уровне 1,43 Тл. В расчете использован диапазон стартовых фаз $\pm 10^\circ$

2. РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ С $A/Z = 10$ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА УРОВНЕ 1,25 Тл

На нижнем уровне магнитного поля $B = 1,25$ Тл рассмотрен тестовый режим ускорения пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 10$. Магнитное поле в рассмотренном режиме требует оптимизации при помощи концентрических корректирующих катушек. Результат оптимизации магнитного поля путем расчетного подбора токов в корректирующих катушках представлен на рис. 7.

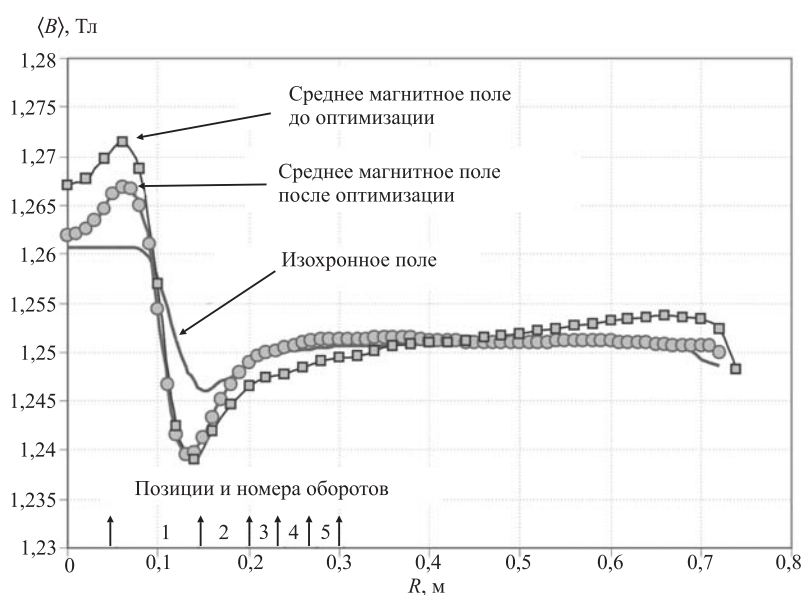


Рис. 7. Сравнение изохронного и среднего магнитного поля до и после оптимизации концентрическими катушками в режиме ускорения пучка ионов с $A/Z = 10$. Стрелками показаны радиальные положения первых орбит ускоряемого пучка

Проведенный расчет динамики пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 10$ при ускорении в оптимизированном магнитном поле на уровне 1,25 Тл показал, что дрейф фазы ускоряемого иона, вызванный отличием сформированного магнитного поля от изохронного, не превышает 7° , что обеспечивает эффективное ускорение. Радиальная зависимость фазового движения ускоряемого иона в сформированном магнитном поле представлена на рис. 9. В оптимизированном магнитном поле частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний в основной области ускорения принимают значения $1,015 < Q_r < 1,02$ и $0,3 < Q_z < 0,4$, что обеспечивает необходимую фокусировку при ускорении до радиуса вывода 0,7 м.

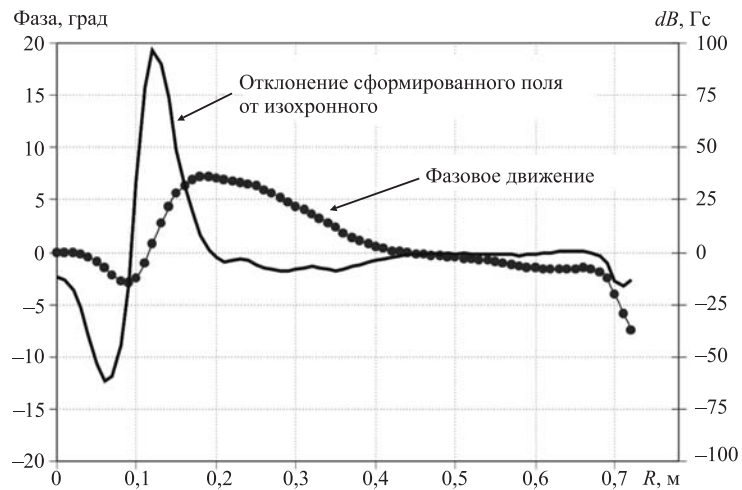


Рис. 8. Фазовое движение ускоряемого иона с отношением массы к заряду $A/Z = 10$ в сформированном магнитном поле на уровне 1,25 Тл и отклонение сформированного магнитного поля от изохронного

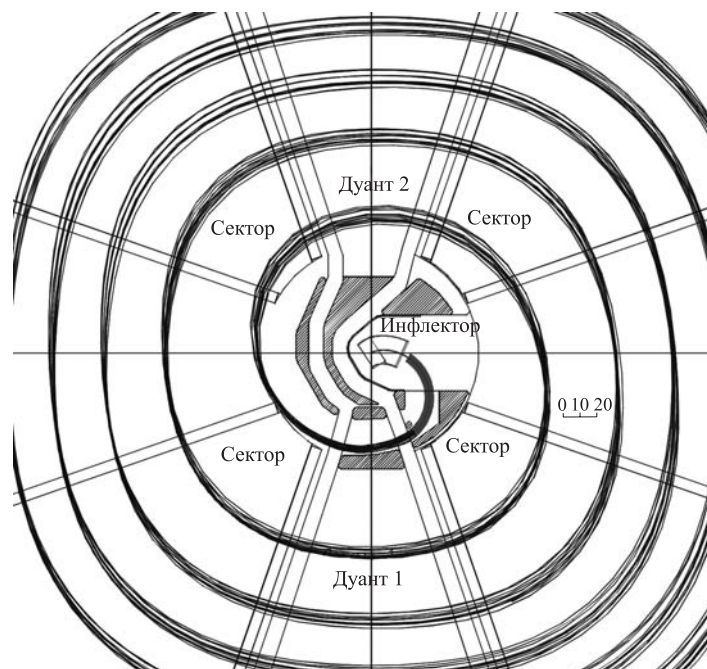


Рис. 9. Движение пучка ионов с $A/Z = 10$ на первых оборотах при ускорении в сформированном магнитном поле на уровне 1,25 Тл

Сформированное магнитное поле на уровне 1,25 Тл позволяет осуществлять эффективный захват в ускорение и оптимальные условия движения пучка ионов в центральной области циклотрона. На рис. 9 представлена траектория рассматриваемого пучка ионов при движении в области захвата в ускорение и на первых оборотах. На первом обороте в отсутствие азимутальной вариации магнитного поля (рис. 3) вертикальная фокусировка ускоряемого пучка осуществляется как за счет спадающего радиального градиента среднего магнитного поля, так и за счет электрического ВЧ-поля в ускоряющих зазорах.

3. РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ С $A/Z = 10$ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА УРОВНЕ 1,65 Тл

На верхнем уровне магнитного поля $B = 1,65$ Тл рассмотрен режим ускорения пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 6$. Сформированное железными массами магнитное поле на верхнем уровне магнитного поля $B = 1,65$ Тл отличается от изохронной формы, поэтому для формирования резонансных условий ускорения используется оптимизация магнитного поля при помощи шести concentрических корректирующих катушек. Оптимальные вклады катушек подобраны расчетным путем. Результат оптимизации магнитного поля путем расчетного подбора токов в корректирующих катушках представлен на рис. 10.

Проведенный расчет динамики пучка ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 10$ при ускорении в оптимизированном магнитном поле на уровне 1,65 Тл показал, что дрейф фазы ускоряемого иона, вызванный отличием оптимизированного магнитного поля от изохронного, доходит до -40° в районе радиусов 0,12–0,25 м. В остальном диапазоне радиусов дрейф фазы не превышает 12° . Отклонение фазы пучка на внутренних радиусах является значительным и ограничивает допустимую фазовую протяженность банча. Магнитное поле обеспечивает устойчивое ускорение пучка ионов с фазовой протяженностью до 50° ВЧ. Радиальная зависимость фазового движения ускоряемого иона в оптимизированном магнитном поле представлена на рис. 11. В сформированном магнитном поле частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний в основной области ускорения принимают значения $Q_r \approx 1,15$ и $Q_z \approx 0,5$ (рис. 12), что обеспечивает необходимую фокусировку при ускорении до радиуса вывода 0,7 м.

На первом обороте в отсутствие азимутальной вариации магнитного поля вертикальная фокусировка ускоряемого пучка осуществляется как за счет спадающего радиального градиента среднего магнитного поля, так и за счет электрического ВЧ-поля в ускоряющих зазорах. На рис. 13 представлена траектория рассматриваемого пучка ионов при движении в области захвата в ускорение и на первых оборотах.

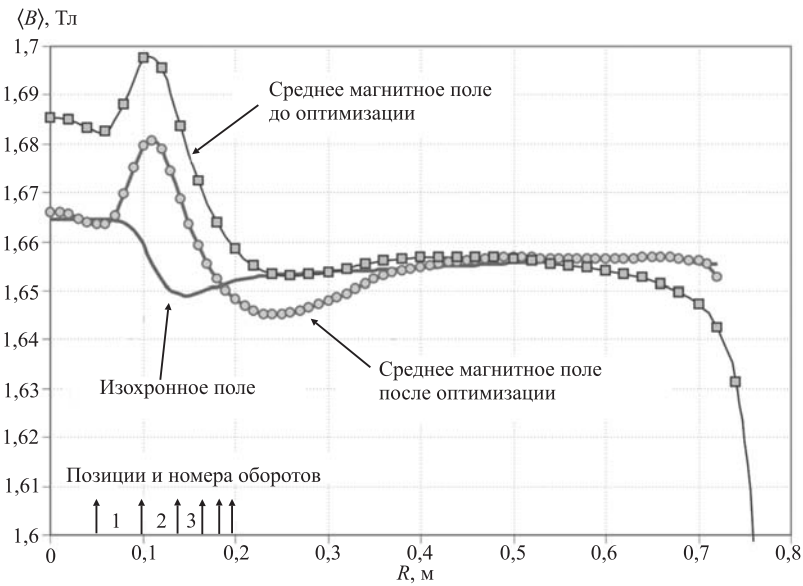


Рис. 10. Сравнение изохронного и среднего магнитного поля до и после оптимизации концентрическими катушками в режиме ускорения пучка ионов с $A/Z = 6$. Стрелками показаны радиальные положения первых орбит ускоряемого пучка

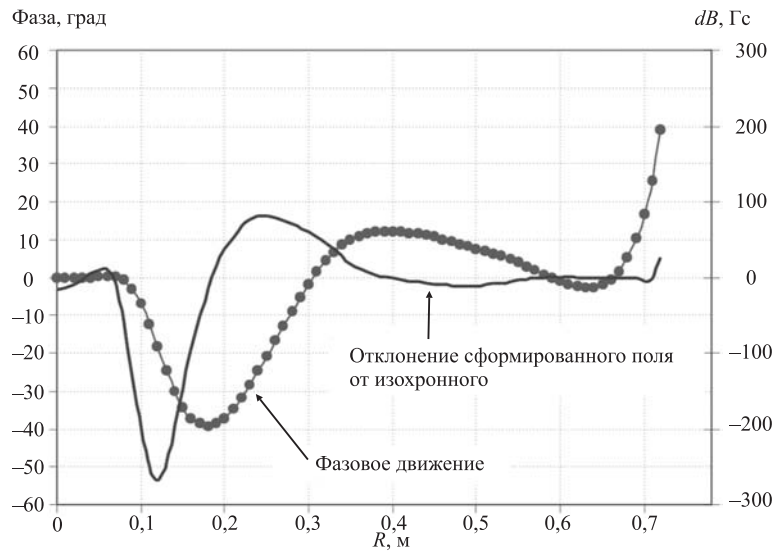


Рис. 11. Фазовое движение ускоряемого иона с отношением массы к заряду $A/Z = 6$ в оптимизированном магнитном поле с помощью концентрических катушек на уровне 1,65 Тл в зависимости от радиуса и отклонение сформированного магнитного поля от изохронного

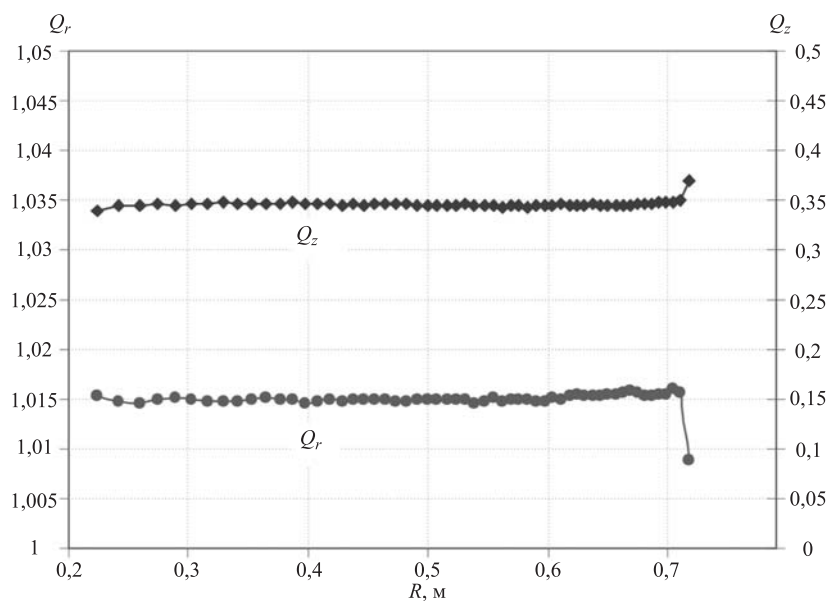


Рис. 12. Поведение частот радиальных и вертикальных свободных колебаний иона с отношением массы к заряду $A/Z = 6$ в сформированном магнитном поле 1,65 Тл

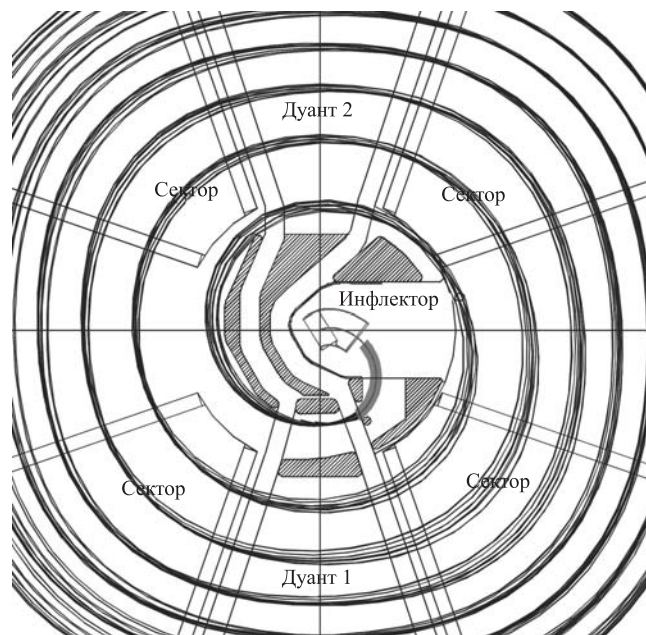


Рис. 13. Движение пучка ионов с $A/Z = 6$ на первых оборотах при ускорении в сформированном магнитном поле 1,65 Тл

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе формирования магнитной структуры циклотрона ДЦ-60 проведен анализ динамических характеристик магнитного поля. Это позволило оптимизировать форму магнитной структуры для обеспечения поперечной фокусировки и эффективного ускорения пучков ионов. Анализ проведен для трех характерных режимов ускорения на верхнем (1,65 Тл), среднем (1,43 Тл) и нижнем (1,25 Тл) уровнях магнитного поля. Сформированное магнитное поле на среднем уровне 1,43 Тл с хорошей точностью, лучше чем 10^{-3} , соответствует изохронному распределению, что обеспечивает фазовое движение пучка в пределах $\pm 2^\circ$. Изохронная форма магнитного поля на верхнем и нижнем уровнях достигается при помощи концентрических катушек. Сформированное магнитное поле обеспечивает допустимое фазовое движение и поперечную фокусировку ускоряемых пучков ионов. При этом частоты свободных колебаний в основной области ускорения лежат в пределах $1,015 < Q_r < 1,02$ и $0,3 < Q_z < 0,4$ и расположены далеко от опасных резонансов. В центральной области фокусировка обеспечена радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием ускоряющего ВЧ-поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gikal B. N. et al.* Project of the DC-60 cyclotron with smoothly ion energy variation for research center at L. N. Gumilev EuroAsia State University in Astana (Kazakhstan) // Proc. of the 17th Conference on Cyclotrons and Their Applications, 18–22 October 2004, Tokyo. P. 205–207.
2. *Гикал Б. Н. и др.* Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2006-151. Дубна, 2006.
3. *Ivanenko I. A.* Design of cyclotron DC-60 magnetic field // Lectures of PNPI School on Accelerator Physics and Techniques, St. Petersburg, Repino, February 15–19, 2006.
4. *Gikal B. et al.* Numerical simulation for field formation in cyclotron DC60 // Proc. of the 11th International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10–14 October 2004, Russia. P. 257–259.
5. *Гикал Б. Н. и др.* Результаты ускорения пучков ионов азота, аргона, криптона в ходе пусконаладочных работ на изохронном циклотроне ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ Р9-2007-80. Дубна, 2007.

Получено 3 сентября 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 26.11.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 270 экз. Заказ № 55975.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/