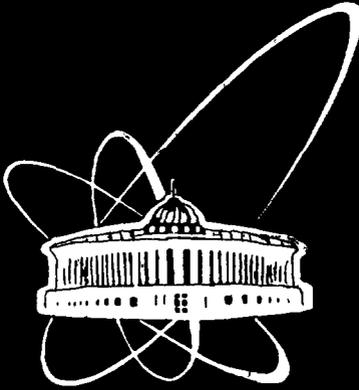




XJ9800081



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-97-191

Г.Г. Гульбекян, И.А. Иваненко, А.М. Мордуев, Й. Франко

КОРРЕКЦИЯ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА У400М

29 - 15

R

1997



Изохронный циклотрон МЦ-400 предназначен для ускорения заряженных частиц в диапазоне отношений  $A/Z$  от 2 до 5 до энергий 25 - 100 МэВ/нуклон. Магнитная структура МЦ-400 состоит из четырех секторов, угловой протяженностью  $45^\circ$ , и углом спиральности на конечном радиусе ускорения  $40^\circ$ . С 1995 года на циклотроне установлена и введена в действие система внешней инжекции с использованием ECR-источника. Ввод пучка в медианную плоскость осуществляется электростатическим зеркалом [1].

### Исследование первой гармоники магнитного поля

Условия ускорения заряженных частиц на первых оборотах в центральной области циклотрона оказывают существенное влияние на дальнейший ход ускорения и на качество выведенного пучка. Замена внутреннего PIG-источника на систему внешней инжекции с использованием ECR-источника привела к увеличению потенциала инжектируемого пучка с десятка вольт до нескольких киловольт и определила условия расположения начальной точки ускорения. Поэтому были проведены расчеты динамики ускорения заряженных частиц согласно новым условиям. Расчеты выполнены программой CENTR с использованием карт магнитных полей, полученных в процессе формирования магнитного поля циклотрона при измерениях по полному азимуту в октябре 1990 года [2],[3]. Некоторые результаты проведенных расчетов наглядно можно увидеть на рисунках 1 и 2.

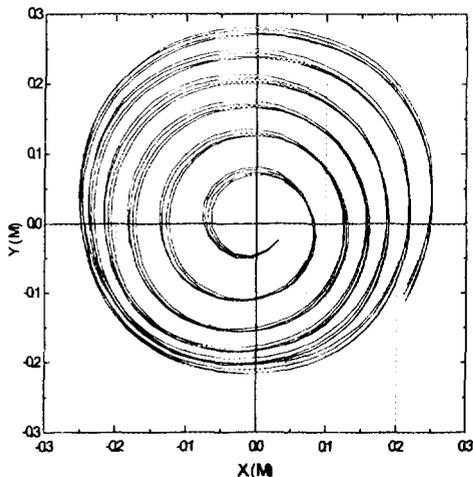


Рисунок 1. Траектории движения ускоряемых частиц с отношением  $A/Z=5$  для четырех значений начальной фазы движения  $\phi_0$ . Расстояние от центра циклотрона до центра щели пластины, формирующей первый ускоряющий зазор 48 мм. Угол положения центра щели пластины от оси  $X$   $45^\circ$

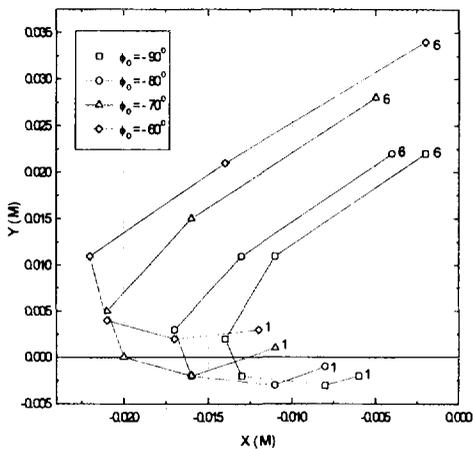


Рисунок 2. Динамика движения центров орбит при ускорении частицы с отношением  $A/Z=5$  для четырех значений начальной фазы движения  $\phi_0$ . Цифрами 1 и 6 обозначены центры первой и шестой орбит

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о наличии сильной первой гармоники магнитного поля в центральной области циклотрона, которая является причиной значительного смещения центров рассматриваемых орбит. На рисунке 3 представлено азимутальное распределение магнитного поля на пяти радиусах в районе центральной вставки.

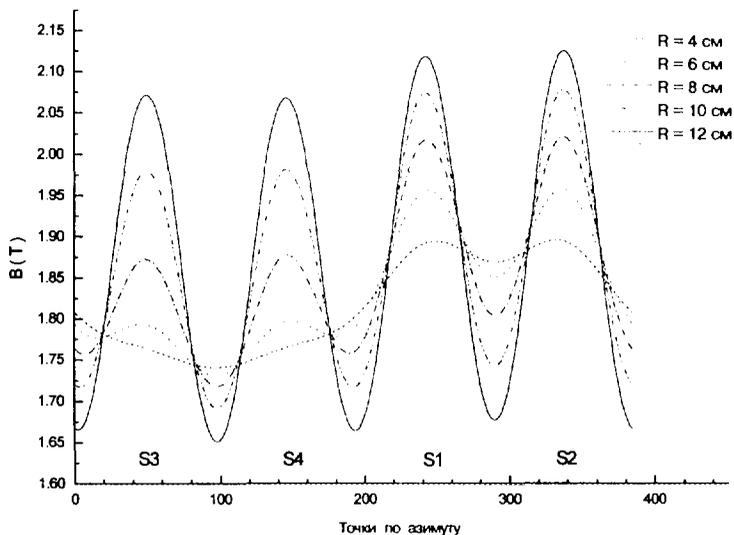


Рисунок 3. Распределение магнитного поля по азимуту для пяти радиусов. Уровень поля предназначен для ускорения частиц с отношением  $A/Z = 5$

На рисунке 3 символами S1, S2, S3, S4 показаны положения секторов. Измерение магнитного поля циклотрона осуществлялось системой, разработанной и созданной в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [4]. Система включает в себя 14 датчиков Холла, расположенных на несущей штанге. Датчики Холла закреплены с интервалом в 16 см на ленте, способной перемещаться по радиусу вдоль штанги с шагом 2 см. Один конец штанги закреплен на поворотной основе в центре циклотрона, другой - поставлен на колеса и перемещается по азимуту с шагом  $\Delta\Theta = 0.9375^\circ$ . Азимутальное движение производится за счет зубчатой передачи между двигателем и кольцом, чем достигается повторяемость позиций при многократном движении по азимуту. Моменты считывания информации с датчиков, запуск и остановка двигателей синхронизованы и управляются компьютером. Информация о значениях ЭДС Холла записывается и хранится в файлах. Математическая обработка данных магнитных измерений осуществляется на основе пакета программ MAGNIT и включает в себя вычисление значений магнитного поля по полиномам третьего порядка. Программа вычисляет зависимость среднего поля и флаттера от радиуса, амплитуду и фазу гармоник разложения магнитного поля, угол спиральности секторов, оптимальные значения  $B_0$  и  $A/Z$ , частоты радиальных и аксиальных бетатронных колебаний. На рисунках 4 и 5 представлены зависимости амплитуд первой и второй гармоник магнитного поля от радиуса.

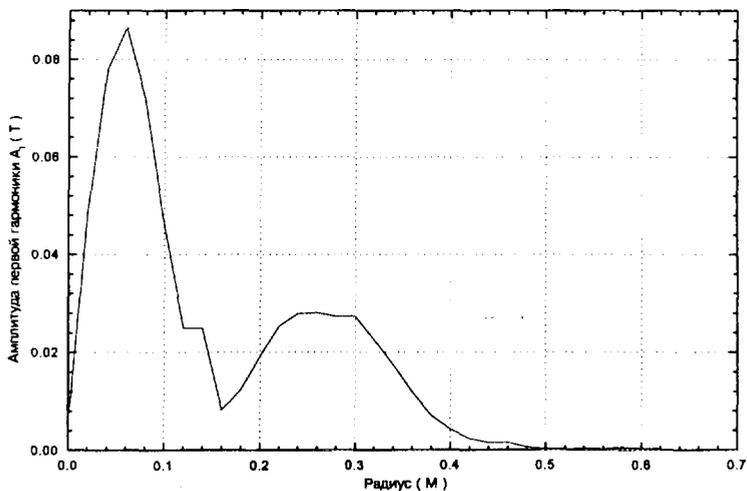


Рисунок 4. Амплитуда первой гармоники магнитного поля для ускорения частиц с отношением  $A/Z = 5$

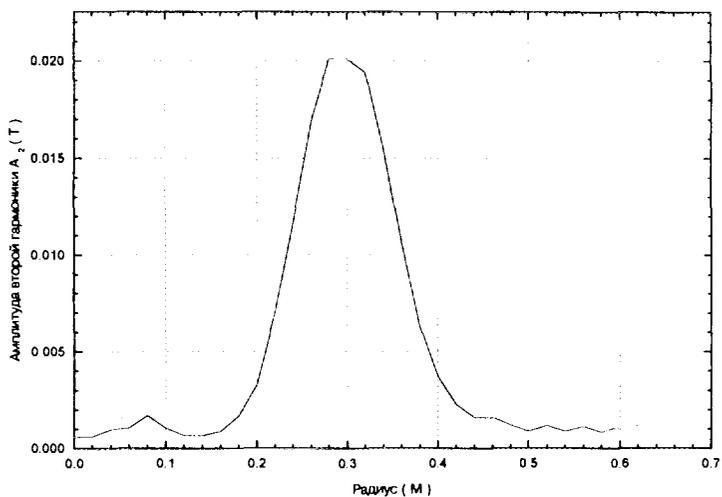


Рисунок 5. Амплитуда второй гармоники магнитного поля для ускорения частиц с отношением  $A/Z = 5$

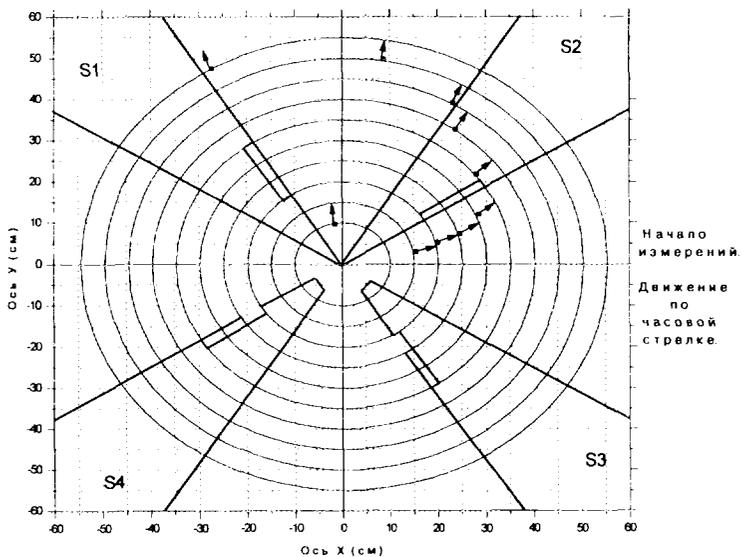


Рисунок 6. Диаграмма направления векторов первой гармоники магнитного поля для ускорения частиц с отношением  $A/Z = 5$

Анализ представленных выше графиков объясняет направленный дрейф центров рассматриваемых орбит ускоряемых частиц наличием первой гармоники магнитного поля в центре циклотрона. Согласно графику амплитуды первой гармоники и направлению ее вектора в зависимости от радиуса в центре циклотрона (рисунки 4 и 6) можно условно выделить две области, содержащие несимметрию магнитной структуры. В диапазоне радиусов от 0 до 15 см максимальная амплитуда равна 0.086 Т. В диапазоне радиусов от 15 до 30 см максимальная амплитуда оказалась равной 0.028 Т. В ходе подготовки к магнитным измерениям, проведенным в октябре 1996 года, была выяснена причина наличия первой гармоники. На рисунке 6 схематично изображена ситуация в центре циклотрона, предшествующая началу шиммирования. Первая выделенная область содержит центральную вставку, имеющую продолжение секторов к центру циклотрона вплоть до центрального отверстия канала внешней инжекции. Отсутствие на вставке продолжения третьего и четвертого секторов, обусловленное конструктивными особенностями размещения системы внутреннего PIG-источника и пуллера, привело к возникновению первого пика амплитуды. В диапазоне радиусов от 20 до 35 см каждый сектор имеет боковые накладки, установленные для шиммирования среднего поля. Как видно из рисунка 6, к началу коррекции первой гармоники магнитного поля магнитная структура в диапазоне радиусов от 20 до 25 см оказалась заведомо несимметричной. Геометрия центральной вставки и накладок на секторах S1 и S4 подтверждает зависимость фазы первой гармоники от радиуса, изображенной векторами на рисунке 6.

### Коррекция первой гармоники магнитного поля

В процессе подготовки коррекции первой гармоники исследовались возможности шиммирования магнитного поля при помощи боковых накладок и использования стальных пластин, помещенных под сектора магнита. На рисунке 7 представлена зависимость вклада бокового шимма, шириной в 1 см, от радиуса в среднее поле.

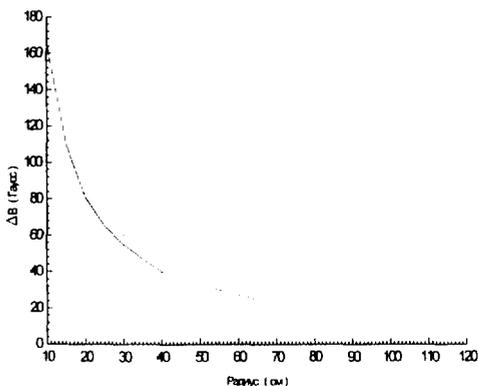
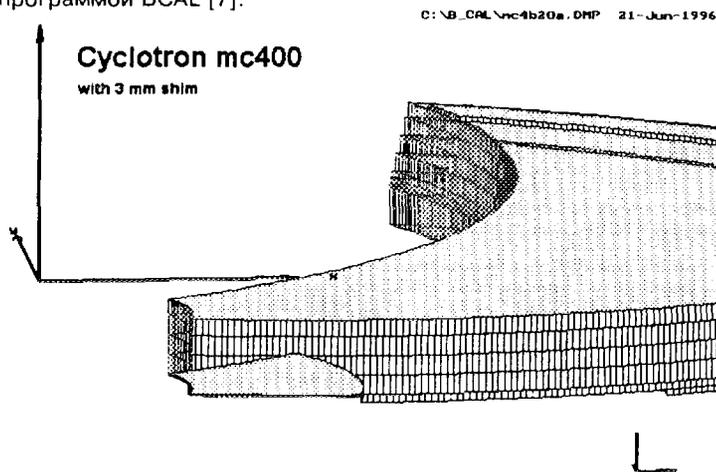


Рисунок 7. Зависимость вклада бокового шимма, шириной в 1 см, от радиуса в среднее поле

Оценка вклада бокового шимма произведена на основе карты магнитного поля для ускорения частиц с отношением  $A/Z = 5$  и согласуется с результатами проведенных ранее измерений вклада в среднее магнитное поле от боковых шимм [5], [6].

Расчет вклада в среднее магнитное поле помещенного под сектор стального листа, толщиной 3 миллиметра (рисунки 8 и 9), выполнен программой BCAL [7].



6.0E+0001 mm

Рисунок 8. Расположение стального листа, толщиной 3 мм, под сектором

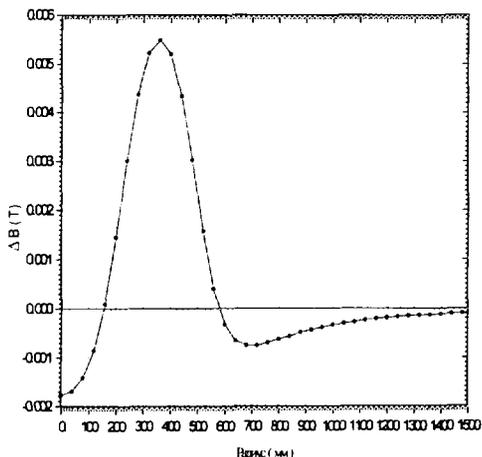


Рисунок 9. Зависимость вклада в среднее магнитное поле помещенного под сектор стального листа, толщиной 3 мм, от радиуса. Длина листа по радиусу от 233 до 496 мм

Коррекция первой гармоники магнитного поля в центральной области циклотрона проводилась с условием сохранения уровня среднего магнитного поля. Для решения этой задачи потребовалась симметризация магнитной структуры центральной области посредством перераспределения железных масс. Было принято решение о минимизации уровня первой гармоники в диапазоне радиусов от 0 до 15 см за счет увеличения уровня второй гармоники магнитного поля. Основанием послужил предварительный расчетный анализ влияния второй гармоники на динамику ускоряемого пучка.

На первом этапе коррекции произведена смена центральной вставки. В новом варианте вставка имеет продолжения симметрично расположенных относительно центра секторов S2 и S4. Сравнительный анализ результатов проведенных магнитных измерений представлен на рисунках 10 и 12. Максимальный уровень первой гармоники в области центральной вставки снизился от 860 до 20 Гс и повлек за собой снижение уровня первой гармоники во второй отмеченной области (от 15 до 30 см) до 200 Гс.

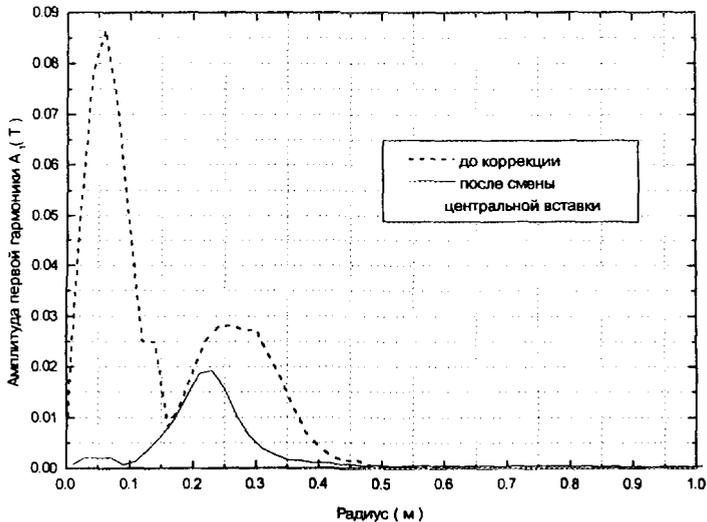


Рисунок 10. Сравнительный анализ распределения амплитуд первой гармоники магнитного поля до и после смены центральной вставки. Уровень поля предназначен для ускорения частиц с отношением  $A/Z=5$

Для подтверждения полученных результатов проведены измерения магнитных полей для ускоряемых частиц с отношениями  $A/Z=2$  и  $5$ .

На втором этапе коррекции принято решение установить боковые шиммы одинаковой длины на каждом из четырех секторов. Учитывая условие сохранения уровня среднего магнитного поля, длину шимм на секторах S1 и S4 увеличили за счет срезов с шимм секторов S2 и S3.

Таким образом, получена симметричная картина положения шимм относительно центра циклотрона и сохранена однородность материала, что привело к значительному подавлению первой гармоники магнитного поля (рисунок 11). Вторая гармоника магнитного поля в центре циклотрона после второго этапа шиммирования осталась без изменения (рисунок 12).

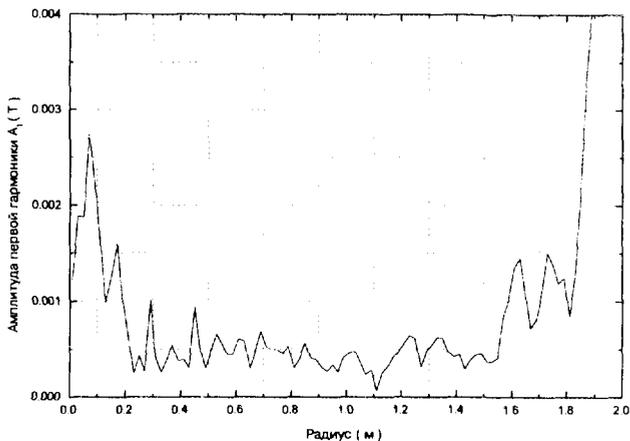


Рисунок 11. Распределение амплитуды первой гармоники магнитного поля по радиусу после завершения коррекции

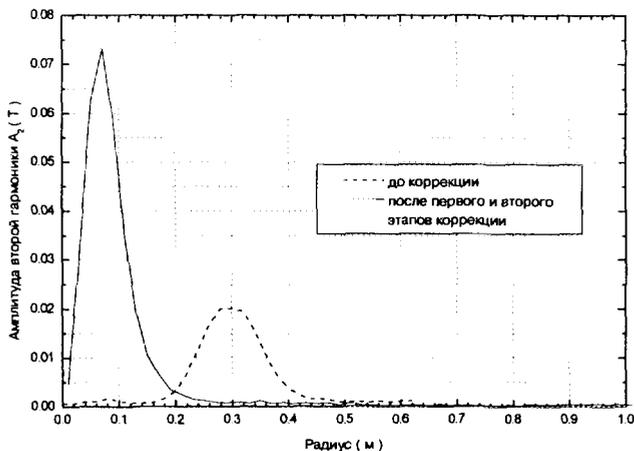


Рисунок 12. Сравнительный анализ распределения амплитуд второй гармоники магнитного поля до коррекции и после проведения первого и второго этапов коррекции

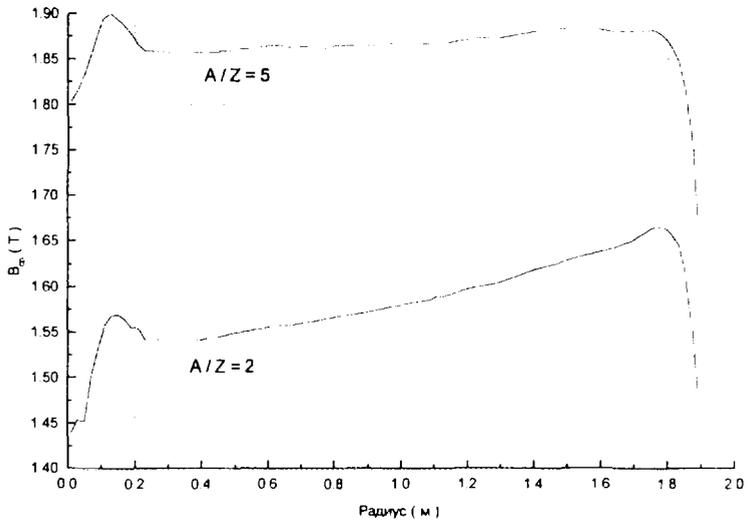


Рисунок 13. Распределение среднего магнитного поля по радиусу для ускоряемых ионов с отношением  $A/Z = 2$  и  $5$

Полученные результаты измерений магнитного поля по окончании коррекции первой гармоники использованы для расчета динамики ускорения заряженных частиц программой CENTR. Расчеты показали, что в результате коррекции устранен дрейф центров орбит ускоряемых частиц (рисунок 14), при этом центры орбит расположены в радиусе одного сантиметра от центра циклотрона (рисунок 15).

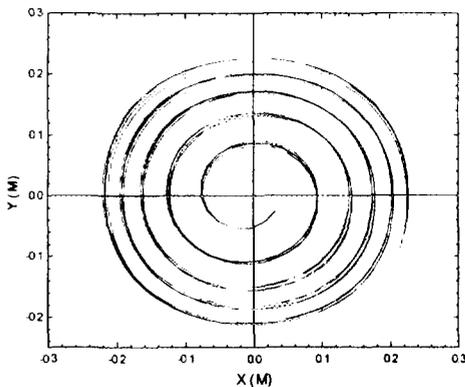


Рисунок 14. Траектории движения ускоряемых частиц с отношением  $A/Z=5$  для четырех значений начальной фазы  $\phi_0 = -70^\circ, -60^\circ, -50^\circ, -40^\circ$  после коррекции первой гармоники магнитного поля

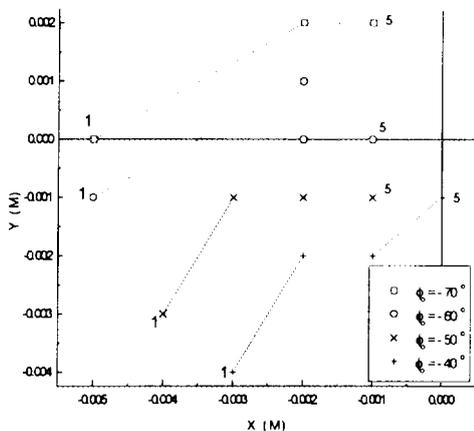


Рисунок 15. Динамика движения центров орбит при ускорении частицы с отношением  $A/Z=5$  для четырех значений начальной фазы движения  $\phi_0 = -70^\circ, -60^\circ, -50^\circ, -40^\circ$  после коррекции первой гармоники магнитного поля. Цифрами 1 и 5 обозначены центры первой и пятой орбит

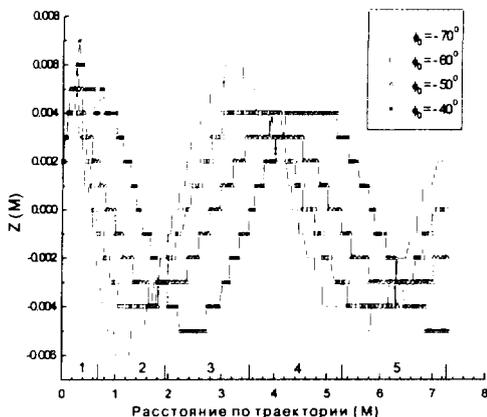


Рисунок 16. Траектории вертикального движения ускоряемых частиц с отношением  $A/Z=5$  для четырех значений начальной фазы  $\phi_0 = -70^\circ, -60^\circ, -50^\circ, -40^\circ$

Ниже представлены рисунки, графически отображающие радиальные и вертикальные акцептансы ускорителя для частиц с отношением  $A/Z=2$  и 5.

Для частиц с отношением  $A/Z = 2$  радиальный акцептанс  $A_r = 620\pi$  (мм\*град) для диапазона начальных фаз  $\Delta\phi_0 = 30^\circ$  и  $A_r = 1200\pi$  (мм\*град) для диапазона начальных фаз  $\Delta\phi_0 = 20^\circ$ . Вертикальный акцептанс  $A_z = 1110\pi$  ( мм\*град ), рисунки 17 и 18.

Для частиц с отношением  $A/Z = 5$  радиальный акцептанс  $A_r = 896\pi$  (мм\*град) для диапазона начальных фаз  $\Delta\phi = 30^\circ$  и  $A_r = 1187\pi$  (мм\*град) для диапазона начальных фаз  $\Delta\phi = 20^\circ$ . Вертикальный акцептанс  $A_z = 974\pi$  ( мм\*град ), рисунки 19 и 20.

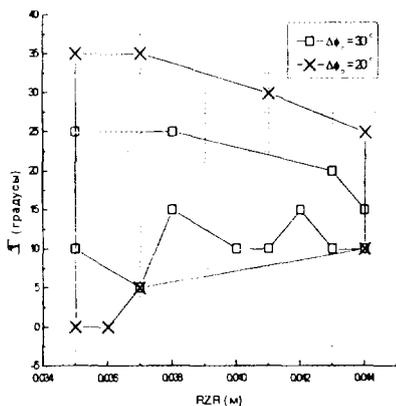


Рисунок 17. Радиальный акцептанс для ускорения частиц с отношением  $A/Z=2$

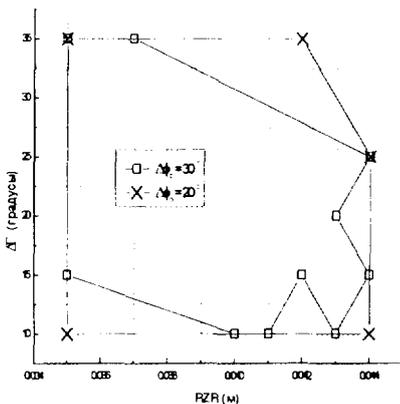


Рисунок 19. Радиальный акцептанс для ускорения частиц с отношением  $A/Z=5$

Параметр  $RZR$  является радиусом точки начала ускорения частицы. Параметр  $\Delta\Gamma$  является углом между вектором скорости частицы в точке начала ускорения и перпендикуляром к радиусу-вектору, направленному из центра циклотрона в точку начала ускорения.

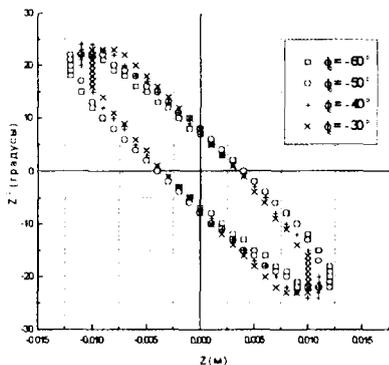


Рисунок 18. Вертикальный акцептанс для ускорения частиц с отношением  $A/Z=2$

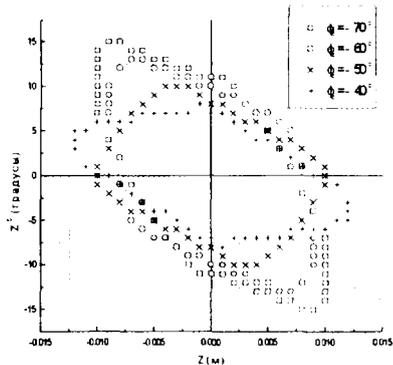


Рисунок 20. Вертикальный акцептанс для ускорения частиц с отношением  $A/Z=5$

Параметр  $Z^\circ$  является вертикальным углом вылета ускоряемой частицы в точке начала ускорения относительно медианной плоскости  $Z=0$ .

## Заключение

Результаты работы ускорителя после завершения коррекции первой гармоники магнитного поля показали значительное увеличение интенсивности пучков ускоряемых ионов. При токе пучка ионов  $14N+5$  перед инфлектором в 72 мкА до проведения коррекции в непрерывном режиме работы выведенный из ускорителя пучек имел ток 0.36 мкА. Коэффициент передачи при этом составляет  $K=0.5\%$ . После коррекции при токе пучка ионов  $14N+5$  перед инфлектором в 60 мкА и скважности ВЧ-напряжения  $Q=2$ , выведенный из ускорителя пучек имел ток 0.6 мкА. Коэффициент передачи при этом составляет  $K=2\%$ . Таким образом, после завершения коррекции первой гармоники магнитного поля в центральной области ускорителя У400М коэффициент передачи увеличился в 4 раза.

## Литература

1. Axial injection system for the U-400M cyclotron with an ECR ion source. JINR, FLNR, Scientific report 1993-1994, Dubna 1995.
2. Гульбекян Г. Г., Мордуев А. М., ОИЯИ, Р9-80-549, Дубна, 1980.
3. Иваненко И. А., ОИЯИ, Р9-96-409, Дубна, 1996.
4. Евдокимов А. К. и др., ОИЯИ, 9-80-800, Дубна, 1980.
5. Гульбекян Г. Г., и др., ОИЯИ, Р9-93-323, Дубна, 1993.
6. Колесов И. В., и др., ОИЯИ, 9-82-917, Дубна, 1982.
7. G. Pausch, CINR, ZFK-699, Rossendorf, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 июня 1997 года.

Гульбекян Г Г и др

P9-97-191

Коррекция первой гармоники магнитного поля  
циклотрона У400М

Представлены результаты проведения коррекции первой гармоники магнитного поля циклотрона У400М и расчета динамики движения ускоряемых частиц в центральной области циклотрона. Результаты экспериментов, проведенных после завершения коррекции, показали увеличение коэффициента передачи циклотрона в 4 раза.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им Г Н Флерова ОИЯИ

Сообщение Объединенного института ядерных исследований Дубна, 1997

Перевод авторов

Gulbekian G G et al

P9-97-191

The Correction of the First Harmonic  
of the U400M Cyclotron Magnetic Field

The results of the correction of the first harmonic of the U400M cyclotron magnetic field and the calculation of the accelerating beam dynamics in the cyclotron central region are presented. The results of the first experiments have shown the acceleration coefficient to increase by a factor of 4.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research Dubna, 1997

Редактор Е Ю Шаталова Макет Н А Киселевой

Подписано в печать 26 06 97

Формат 60 × 90/16 Офсетная печать Уч -изд листов 0,72

Тираж 295 Заказ 50019 Цена 864 р

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области