

С 345

С-794

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория Ядерных Проблем

А.В.СТЕПАНОВ

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДЕЙСТВУЮЩАЯ МОДЕЛЬ ИЗО-
ХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЧАСТИЦ

Автореферат диссертации, представленной на
соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук

Научный руководитель доктор физико-математических
наук, профессор В.П.Дмитриевский

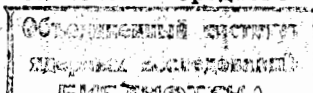
Дубна, 1966 г.

С начала 1950-х годов в исследовательских центрах многих стран ведутся работы по реализации идеи Л.Томаса [1] о введении пространственной вариации в магнитное поле ускорителя заряженных частиц типа циклотрон. Материалы трёх международных конференций, специально посвящённых исследованиям по секторно-фокусирующим циклотронам (Си-Айленд, США, 1959; Лос-Анжелос, США, 1962; ЦЕРН, 1963), свидетельствуют об интересе, проявляемом к этому типу ускорителей.

3439 69. Исследования в области ускорителей, использующих магнитные системы с азимутальной вариацией, ведутся по пути проектирования циклотронов на фиксированную энергию протонов от 100 до порядка 1000 Мэв, так называемые фабрики мезонов [2]; разработки циклотронов на промежуточные энергии (до 100 Мэв по протонам), но с возможностью как регулирования энергии, так и произвольного выбора типа ускоряемой частицы, а также по пути создания кольцевых фазотронов. Свыше 20 ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля уже действуют, ещё около 30 - находятся в стадии проектирования.

Предложение Томаса, модифицированное Д.Керстом и др. [3], позволило преодолеть ограничение по энергии классического циклотронного метода ускорения и повысить достижимую энергию протонов до 1000 Мэв практически без потери интенсивности пучка.

Одновременно с этим существенно возросли требования ко всем узлам ускорителя и в первую очередь к характеристикам его магнитного поля. Устойчивое движение частиц в магнитных системах таких ускорителей оказалось возможным лишь при весьма малых отклонениях параметров магнитного поля от расчётных значений. Так, допуск на отклонение среднего магнитного



поля от изохронного закона изменения по радиусу ($H_{из}(R)$) составляет величину порядка (0,02-0,04)%. Причём, например, в циклотроне с регулируемой энергией формирование закона $H_{из}(R)$, различного для частиц различных типов, должно быть осуществлено на нескольких уровнях возбуждения магнита, соответствующих выбранным пределам регулирования энергии. Ещё более жесткие требования предъявляются к азимутальным неоднородностям магнитного поля типа низших гармоник, коррекция амплитуды которых должна производиться до единиц эрстед, например по первой гармонике.

Таким образом, одной из основных задач, возникающих при создании секторно-фокусирующего циклотрона, является получение магнитного поля строго заданной конфигурации.

Известные в настоящее время методы расчёта магнитных полей, создаваемых определенным профилем полюсных наконечников, не обеспечивают требуемой точности. Поэтому необходимо проведение целого комплекса работ по экспериментальному исследованию и коррекции характеристик магнитного поля.

Реферируемая работа посвящена разработке и экспериментальной проверке методов формирования магнитного поля. Исследования проводились применительно к серийному циклотрону типа У-240, проектирование которого ведётся в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова с 1960 года [4, 5, 6].

Изохронный циклотрон У-240 (диаметр полюсов магнита 240 см) предназначен для проведения экспериментов как на внутреннем, так и на выведенном пучке ускоренных частиц. Предполагаемая интенсивность внутреннего пучка до 1000 мка, выведенного - до 100 мка. Пределы регулирования энергии

различных типов частиц, ускоряемых в У-240, указаны ниже:

Тип ускоряемой частицы	Пределы регулирования в У-240, МэВ
P_1^{+1}	7,5 - 100
d_2^{+1}	4,5 - 70
He_4^{+2}	9,0 - 140
C_{12}^{+4}	11 - 180
N_{14}^{+5}	15 - 240
O_{16}^{+5}	13 - 210
Ne_{20}^{+7}	11 - 170
Ar_{40}^{+7}	10 - 165

Диссертация состоит из трёх глав.

В первой, обзорной главе кратко рассматриваются основные вопросы движения частиц в периодических магнитных полях, на основе которых определяются требования, предъявляемые к параметрам магнитного поля. Показано, что в случае циклотрона У-240, имеющего минимальную периодичность магнитной структуры ($N=3$) и большую глубину радиально-неоднородной азимутальной вариации поля, наиболее целесообразным является представление напряженности магнитного поля в медианной плоскости зазора в виде ряда Фурье по азимуту:

$$H(R, \theta) = H(R) \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_{Nn}(R) \cos Nn \left[\theta - \psi_{Nn}(R) \right] \right\}$$

Здесь $H(R)$ - среднее значение напряженности магнитного поля на данном радиусе;

N - периодичность магнитной структуры;

A_{Nn} - амплитуда Nn -ой гармоник поля;

ψ_{L_n} - фаза L_n -ой гармоники поля.

Преимущество выбранной формы разложения поля заключается в том, что в линейном приближении оно позволяет записать уравнения движения в виде уравнений Хилла, методы решения которых достаточно хорошо разработаны. Сравнение экспериментальных (полученных на действующей модели циклотрона) и расчётных данных по определению характеристик пучка ускоряемых частиц показало, что достаточно учитывать три члена в разложении магнитного поля в ряд Фурье.

Далее в работе для случая циклотрона У-240 рассматривается влияние искажений поля на движение частиц. Приводятся выражения, позволяющие оценить опасность возможных линейных и нелинейных резонансов и определить допуски на амплитуды низших гармоник возмущения поля.

В конце первой главы рассмотрено фазовое движение в циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля. Получено выражение для фазового сдвига в процессе ускорения, которое позволяет определить допуски на отклонения от закона формирования изохронной зависимости среднего поля по радиусу при различных значениях амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте, а также оценить необходимую стабильность магнитного поля во времени и точность магнитных измерений.

Вторая глава посвящена формированию магнитного поля изохронного циклотрона У-240 с регулируемой энергией частиц.

Для магнитной структуры циклотрона У-240, где по объёму полюсных наконечников магнитная проницаемость железа μ изменяется в широких пределах вплоть до значений μ , близких к единице, применение известных методов расчёта [7, 8]

не может обеспечить требуемую точность.

Формирование магнитного поля циклотрона У-240 было проведено в результате работ на моделях (использовались две модели магнита в масштабе 1:7,02 и 1:3,51 натуральной величины) с использованием приближенных полуэмпирических соотношений, позволяющих производить оценки изменения среднего значения и глубины вариации магнитного поля, вызываемые варьированием формы секторов или возбуждением различных корректирующих обмоток.

Анализ экспериментальных данных моделирования каждой магнитной структуры проводился на нескольких, обычно 4-6 уровнях возбуждения магнита.

В результате предварительного моделирования был произведён выбор типа магнитной структуры - трехсекторной, слабо-спиральной - наиболее пригодной для случая циклотрона с регулируемой энергией частиц. Преимущества магнитной структуры этого типа заключаются в слабой зависимости основных характеристик магнитного поля от уровня возбуждения, в удобстве размещения всех корректирующих обмоток, технологичности и сравнительной простоте в изготовлении элементов магнитной системы.

Фокусирующие свойства магнитного поля циклотрона У-240 должны, с одной стороны, обеспечить аксиальную фокусировку при ускорении в изохронном режиме наиболее релятивистских частиц - протонов, энергия которых на конечном радиусе равна 100 Мэв, и, с другой стороны, дать возможность избежать параметрический резонанс $\nu_z = 0,5$, который может проявиться при ускорении протонов до низких энергий или при ускорении многозарядных ионов в магнитном поле с указанными

фокусирующими свойствами. Требуемая гибкость фокусирующих свойств в выбранной магнитной структуре достигается путём соответствующего выбора угла спиральности магнитного поля и использования мощных долинных обмоток, служащих для регулирования глубины вариации поля по азимуту.

Свойства азимутальной вариации магнитного поля циклотрона У-240 таковы, что условия стабильности аксиальных колебаний всех частиц, ускорение которых предполагается на У-240, удовлетворяются без использования долинных обмоток. Исключение составляет режим ускорения протонов в диапазоне энергий 70–100 Мэв, требующий применения долинных обмоток с целью увеличения глубины вариации поля (флаттера) по азимуту. Долинные обмотки необходимы также при ускорении протонов и многозарядных ионов при низких значениях индукции.

Другой стороной вопроса формирования магнитного поля являлось получение изохронной зависимости среднего поля по радиусу при ускорении различных частиц до возможных энергий. Вид зависимости основного^{х/} магнитного поля существенно изменяется при регулировании уровня возбуждения магнита, поэтому формирование изохронного закона среднего поля по радиусу производится с помощью 15 concentрических обмоток.

Определение значений токов в каждой concentрической обмотке производилось методом наименьших квадратов на вычислительной машине. С целью учёта фазового движения метод был

^{х/} Под основным магнитным полем понимается поле, свойства азимутальной вариации которого на данном уровне возбуждения магнита удовлетворяют условиям стабильности аксиальных колебаний частиц при ускорении до энергии, определяемой этим полем. В общем случае оно является суперпозицией полей полюсных наконечников и долинных обмоток.

усложнён введением весового фактора, пропорционального числу оборотов частицы при достижении её данного радиуса. Используя экспериментальные данные, полученные на модели магнита, путём пробных расчётов были определены число, положение по радиусу и мощности питания concentрических обмоток (рис. I).

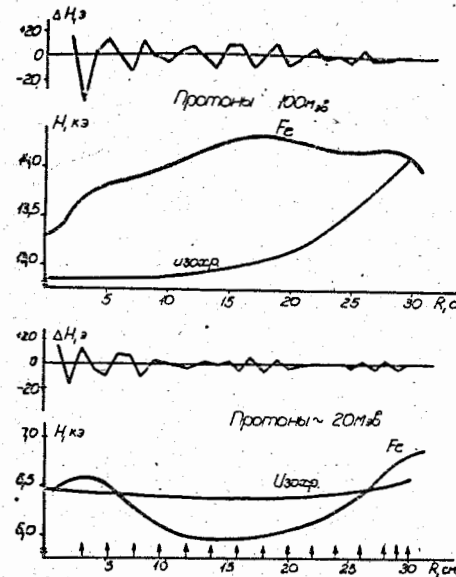


Рис. I Формирование изохронной зависимости среднего поля по радиусу

На рисунке изображено формирование изохронных зависимостей изменения среднего поля по радиусу в случае ускорения протонов до энергии 20 и 100 Мэв. Отклонения расчётного поля от требуемой изохронной зависимости

($\Delta H = H_{\text{кз}} - H_{\text{кз}}(\text{расч})$) в основной области ускорения не превышают 10–15%, что приводит к фазовым сдвигам не более 10–12°, т.е. ускорение осуществляется практически в изохронном режиме. В дальнейшем методика формирования

$H_{\text{кз}}(R)$ получила экспериментальное подтверждение на действующей модели циклотрона.

Таким образом, решение указанных сторон задачи формирования магнитного поля циклотрона У-240 позволило обосновать:

1) выбор конфигурации полюсных наконечников, т.е. число и форму секторов, величины зазоров в колме и в долине;

2) геометрические размеры, положение по радиусу и мощность питания долинных обмоток;

3) число, размещение по радиусу и мощности питания концентрических обмоток.

Наконец, третьей стороной вопроса формирования магнитной структуры циклотрона является выбор допусков на точность изготовления и монтажа элементов магнитной системы, определяющих параметры гармонических обмоток. Величины допусков определяются наличием низших гармоник азимутальной неоднородности магнитного поля. Результирующая амплитуда первой гармоники была определена в предположении случайного характера распределения ошибок. Её значение было вычислено из условия, что погрешность каждого элемента магнитной системы приводит к появлению первой гармоники поля, не превышающей по амплитуде 10% . Указанное условие было использовано для определения допусков на точность изготовления и монтажа элементов, формирующих поле в зазоре. Выбор параметров гармонических обмоток произведен методом векторных диаграмм из условия компенсации максимально возможной результирующей амплитуды первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля.

В конце второй главы рассмотрена необходимая точность магнитных измерений на циклотроне У-240.

Показано, что необходимая точность магнитных измерений может быть определена, исходя из рассмотрения фазового движения в процессе ускорения. Сформулированы требования к точности аппаратуры для магнитных измерений ($\pm 1\%$) и к приспособлениям для установки датчиков-измерителей поля в заданной точке medianной плоскости ($\pm 0,05$ мм - по радиусу и $\pm 0,01^\circ$ -

- по углу), при выполнении которых ошибка в определении среднего значения напряжённости магнитного поля не превышает $\pm(2-3)\%$. Указаны также возникающие погрешности в определении остальных характеристик поля.

В заключение приведена разработанная программа магнитных измерений, осуществление которой обеспечит получение необходимых данных по расчёту токов в корректирующих обмотках для изохронного ускорения различных частиц до любого значения проектной энергии.

В третьей главе описаны исследования, выполненные в период запуска модели циклотрона.

Действующая модель циклотронной установки У-240 создана на базе электромагнита с диаметром полюсов 68,5 см. На модели возможно ускорение протонов в диапазоне энергий от 2 до 8 Мэв и ионов дейтерия от 0,5 до 4 Мэв.

Основные параметры модели.

1. Магнит и корректирующие обмотки:

диаметр полюса	- 68,5 см
конечный радиус ускорения	- 29 см
габариты магнита	- 200x75x150 см
вес магнита (с обмотками)	- 15 т
мощность питания основной обмотки	- 100 квт
тип магнитной структуры	- трёхсекторная, слабоспиральная
воздушные зазоры	- $7/22$ см
число концентрических обмоток	- 9 пар
мощность питания каждой концентрической обмотки	- 9 квт (макс.)

гармонические обмотки - по три пары в каждой "долине"

временная нестабильность магнитного поля - $(3-5) \cdot 10^{-4}$.

2. Высокочастотная система:

один 180-градусный дуант, максимальное напряжение на дуанте - 15 кв

апертура дуанта - 17 мм

диапазон частот существующей резонансной системы - 9-12 Мгц.

В связи с тем, что максимальная энергия протонов на модели не превышает 8 Мэв, долинные обмотки не применялись. Основной задачей магнитных измерений являлось формирование изохронных зависимостей изменения среднего поля по радиусу для ускорения различных частиц на различных уровнях возбуждения магнита.

Полная программа магнитных измерений была выполнена на трёх уровнях, соответствующих режимам ускорения протонов до энергии 4 Мэв и дейтонов до энергии 3 и 4 Мэв. Напряжённость магнитного поля в центре при этом составляла 7,2; 12 и 14 ке соответственно. Обработка данных магнитных измерений и расчёты по определению всех необходимых параметров производились на вычислительных машинах с помощью формул, приведённых в первых двух главах работы.

Успешный запуск модели в режимах ускорения протонов до энергии 2 Мэв и дейтонов до энергии 3 и 4 Мэв экспериментально подтвердил правильность разработанной методики формирования полей. В основной области ускорения (рис.2) характер изменения интенсивности пучка по радиусу свидетельствует об

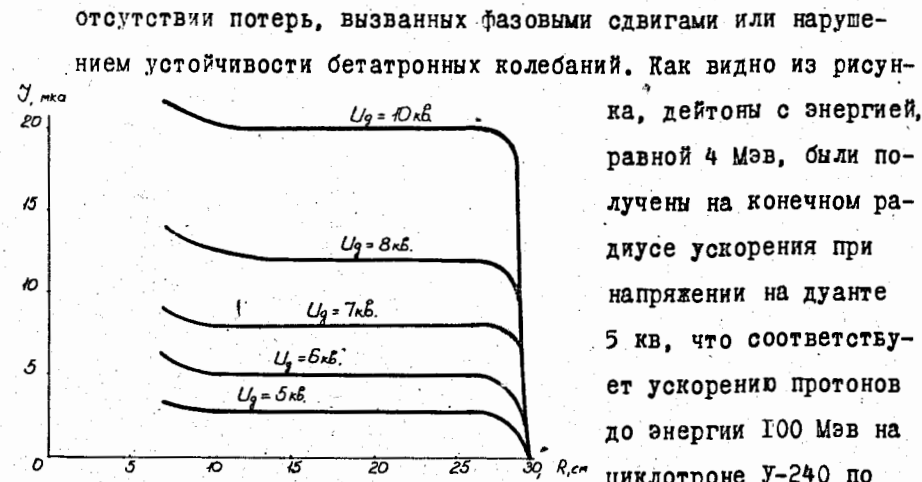


Рис.2 Изменение интенсивности пучка по радиусу. Режим ускорения дейтонов до энергии 4 Мэв.

Приведённые результаты получены без какой-либо экспериментальной подстройки расчётных значений токов в концентрических обмотках. Единственным параметром, требовавшим экспериментального согласования, являлось смещение разрядного канала источника относительно центра магнитного поля. Резкая зависимость интенсивности пучка на конечном радиусе ускорения от смещения ионного источника вблизи оптимального положения, которое может быть найдено расчётным путём [9, 10], качественно говорит о влиянии резонанса $\nu_z = \frac{3}{3}$ на стабильность радиального движения в центре.

Расчёты по определению фазовых сдвигов в процессе ускорения и частот аксиальных бетатронных колебаний по радиусу в пределах точности измерений совпали с экспериментальными данными, полученными на модели. Картина фазового движения была получена путём анализа серии кривых распределения интенсивности пучка по радиусу при варьировании токов в

концентрических обмотках вблизи оптимальных значений, а экспериментальное определение частот аксиальных колебаний производилось с помощью аппаратуры, позволяющей произвести резонансную раскачку колебаний частиц в аксиальном направлении.

Основные результаты настоящей работы можно суммировать следующим образом:

1. Предложен вариант магнитной структуры изохронного циклотрона У-240 с регулируемой энергией частиц, достоинством которого является возможность ускорения протонов в диапазоне энергий от 7,5 до 100 Мэв. В результате моделирования определены величины зазоров в холме и в долине; форма и число секторов; количество, расположение и ампер-витки всех корректирующих обмоток; указаны допуски на точность изготовления и монтажа в зазоре всех элементов магнитной системы. При моделировании применялась разработанная полуэмпирическая методика, позволяющая оценить изменение основных характеристик магнитного поля при изменении формы полюсных наконечников и возбуждении любой корректирующей обмотки.

Анализ полученных полей на различных уровнях возбуждения магнита подтвердил их пригодность для ускорения частиц в диапазоне регулирования энергий, предусмотренных проектом циклотрона У-240.

2. Разработана методика формирования изохронной зависимости изменения среднего поля по радиусу для ускорения различных частиц до любой возможной энергии в У-240 с помощью концентрических обмоток. Указанная методика позволяет по результатам магнитных измерений произвести на вычислительной машине расчёты и составить каталоги токов в каждой концентри-

ческой обмотке для изохронного ускорения любой частицы до произвольной энергии в диапазоне её регулирования на У-240.

3. Осуществлен запуск действующей модели проектируемого циклотрона. Основным результатом запуска модели является экспериментальное доказательство возможности регулирования энергии пучка в выбранной магнитной структуре. На модели произведено моделирование изохронного ускорения протонов до энергии 100 Мэв по числу оборотов.

Основной материал диссертации опубликован в работах [4, 5, 6], а также докладывался на международных конференциях по ускорителям в Дубне (1963) и во Фраскати (Италия, 1965).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. L.H.Thomas. Phys. Rev. 54, 580 (1938).
2. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. "УФН", 85, 4 (1965).
3. D.W.Kerst et al. Bull. Amer. Phys. Soc. 30, 14 (1955).
4. А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, И.Ф.Жуков, Ю.К.Лаврентьев, Р.Н.Литуновский, И.Ф.Мальшев, Н.П.Невров, А.В.Степанов, И.В.Тузов. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, стр.600.
5. А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, А.В.Степанов. В сб. "Электрофизическая аппаратура". Вып. I. М., Госатомиздат, 1963, стр.44.
6. А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, В.Н.Барковский, В.Н.Васильев, И.Ф.Жуков, Ю.К.Лаврентьев, Р.Н.Литуновский, И.Ф.Мальшев, О.А.Миняев, Н.П.Невров, В.Н.Николаев, А.В.Степанов, А.С.Фёдоров. "Изохронный циклотрон с переменной энергией ускоренных частиц": Доклад на Международной конференции по ускорителям. Фраскати, Италия, 1965.
7. Р.А.Мещеров, Е.С.Миронов. "Атомная энергия", 10, вып.2, 127 (1961).
8. В.П.Дмитриевский, Н.Д.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Препринт ОИЯИ, № 1431 (1963).
9. А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, И.М.Матора, Е.С.Миронов, Н.А.Моносзон, Л.М.Неменов, А.В.Степанов, Н.Д.Фёдоров. "Расчёт основных элементов ускорительного тракта и системы вывода пучка циклотрона У-120-1". Доклад на Рабочем совещании по циклотронам, Институт ядерной физики, Краков, 1961.
10. А.Г.Алексеев, Б.П.Ангелов, Ю.Г.Басаргин, Л.Н.Ваулин, М.Д.Веселов, Д.Л.Дондыш, Р.Н.Литуновский, Г.А.Наливайко, В.В.Пироговский, Н.А.Романов, А.В.Степанов, В.А.Суслов. В сб. "Электрофизическая аппаратура". Вып. I, М., Госатомиздат, 1963, стр.53. Работа докладывалась также на Рабочем совещании по циклотронам, Институт ядерной физики, Краков, 1961.