

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.384.6

9-86-14

**САМСОНОВ**

**Евгений Васильевич**

**МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ  
СЕКТОРНЫХ ЦИКЛОТРОНОВ  
С СИСТЕМОЙ ВЫВОДА ЧАСТИЦ  
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА РАСШИРЕНИЯ ОРБИТ**

**Специальность: 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор технических наук

Н. Л. Заплатин

доктор физико-математических наук

В. В. Кольга

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Ю. М. Адо

профессор

кандидат технических наук

Е. М. Ходаков

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Ленинград.

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1986 г. в \_\_\_\_ часов  
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при лабора-  
тории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследова-  
ний, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1986 г.

Ученый секретарь Специализированного совета  
доктор физико-математических наук

В. А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. В настоящее время интенсивности ускоренных пучков частиц на мезонных фабриках в Лос-Аламосе, Ванкувере, Цюрихе достигли сотен микроампер. Протонные пучки такой интенсивности используются в экспериментах по фундаментальным проблемам ядерной физики, а также для ряда задач прикладного значения:

- наработка определенного ряда радиоактивных изотопов;
- использование мезонных пучков в медицинских целях и для неструктурного анализа материалов;
- мезохимические исследования.

В последнее время кроме этих задач стали рассматриваться программы, для осуществления которых необходимы уже интенсивности первичных пучков протонов (10-100) мА при энергии в несколько сотен МэВ<sup>н</sup>:

- наработка ядерного горючего из  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ;
- получение в крупных промышленных масштабах различных радиоактивных изотопов;
- создание высокоинтенсивных портативных фотонейтронных источников.

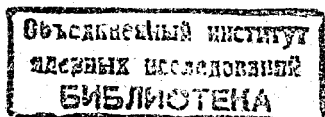
Для реализации такого комплекса задач актуальной становится проблема создания ускорительной установки со средней мощностью пучка в десятки мегаватт. В течение последнего десятилетия в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ были проведены научно-исследовательские работы по разработке такой установки на базе сильноточного изохронного циклотрона (суперциклотрон).

Среди множества проблем, возникших при разработке этой установки, можно выделить две:

- создание магнитной системы, обеспечивающей совмещение изохронизма и жесткой (частоты свободных колебаний больше единицы) фокусировки частиц;

---

\* В.П. Демешов, В.П. Дмитриевский. Суперциклотрон - многоцелевой ускорительный комплекс. ОИЯИ, 9-10534, Дубна, 1977.



- реализация практически 100-процентного вывода пучка из камеры ускорителя.

Диссертация является обобщением работ, выполненных по этим актуальным проблемам в соответствии с проблемно-тематическим планом Объединенного института ядерных исследований.

Цель работы заключалась в теоретическом обосновании возможности использования физического явления - эффекта расширения орбит - для вывода частиц из секторного циклотрона с высокой кратностью ускорения; в создании магнитной системы электронного кольцевого циклотрона для экспериментального исследования эффекта расширения; в экспериментальном моделировании магнитной системы протонного секторного циклотрона на энергию 800 МэВ, включая систему вывода пучка из него.

Научная новизна. Впервые проведено теоретическое и численное исследование возможности использования эффекта расширения орбит для вывода частиц из секторного циклотрона с высокой кратностью ускорения.

Задачи экспериментального исследования эффекта расширения на электронном аналоге кольцевого циклотрона и разработки магнитной системы протонного секторного циклотрона, включая систему вывода пучка из него, вызвали ряд частных проблем, решения которых, обладающие научной новизной, можно сформулировать следующим образом:

- предложена и разработана магнитная система, обеспечивающая формирование требуемых для реализации эффекта расширения характеристик поля на электронной модели кольцевого циклотрона;

- впервые при экспериментальном формировании поля показано, что изохронное магнитное поле и заданная жесткость фокусировки частиц могут быть получены в протонном секторном циклотроне, в котором границы полюсов магнитов выполнены в виде дуг окружностей, а межполюсный зазор - плоский;

- с помощью расчетного моделирования динамики частиц в секторном циклотроне определены требования к магнитному полю системы вывода пучка, работающей на основе эффекта расширения орбит;

- предложена и разработана система вывода пучка из рассматриваемого циклотрона.

Практическая ценность. Предложенный метод расчета требуемых для реализации эффекта расширения магнитных полей и его программное обеспечение могут быть использованы при разработке систем инжекции и вывода циклотронов с разделенными секторами.

Созданная на электронной модели кольцевого циклотрона магнитная система позволила экспериментально подтвердить и провести исследование эффекта расширения орбит в полях с азимутальной вариацией.

Разработанная магнитная система протонного циклотрона на энергии 800 МэВ может быть взята за основу при его техническом проектировании и сооружении.

Апробация. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах в ОИЯИ, а также на Международной конференции по ускорителям (Washington, 1975 г.), на X Международной конференции по циклотронам и их применению (East Lansing, 1984 г.), на Всесоюзном совещании по ускорителям ионов низких и средних энергий (Киев, 1982 г.), на IV и IX Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1974 г.; Дубна, 1984 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, приведенных в списке литературы в конце автореферата.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 155 страниц, включая 66 рисунков, II таблиц и список литературных ссылок из 60 наименований.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В I главе диссертации рассмотрены основы теории эффекта расширения орбит (ЭРО)\*.

При движении частицы с постоянным импульсом ( $p = \text{const}$ ) в магнитном поле с азимутальной вариацией

$$B_z(r, \varphi) = \bar{B}(r) \left\{ 1 + \varepsilon(r) \sin[\delta(r) - N\varphi] \right\}, \quad (1)$$

где  $\bar{B}$  - среднее поле,  $\varepsilon$  и  $\delta$  - вариация и ее фаза, между средним радиусом орбиты  $\bar{r}$ , импульсом  $p$  и зарядом частицы  $e$  выполняется соотношение

$$p = e \bar{B}(\bar{r}) \bar{r} \Lambda. \quad (2)$$

Величина параметра  $\Lambda$  полностью определяется магнитным полем ускорителя и приближенно выражается следующей формулой:

$$\Lambda \approx \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\varepsilon^2}{2N^2} \left( \frac{3}{2} + n + m \right)}, \quad (3)$$

где  $n = \frac{r}{\bar{B}} \cdot \frac{d\bar{B}}{dr}$ ;  $m = \frac{r}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dr}$ .

\* В.П.Дмитриевский и др. ОИЯИ, Д9-81-280, Дубна, 1981.

Для коэффициента расширения орбит  $\lambda = p/\bar{r} \cdot d\bar{r}/dp$  из (2) непосредственно следует

$$\lambda = \left(1 + n + \frac{r}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dr}\right)^{-1} \quad (4)$$

Из (4) видно, что для существенного увеличения коэффициента  $\lambda$  и соответствующего увеличения разделения орбит при неизменном приращении импульса необходимо выполнение условия

$$n + \frac{r}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dr} \approx -1 \quad (5)$$

Чтобы выполнить (5), существуют три возможности:

1. Изменение среднего поля, в основном влияющее на величину  $n$ .
2. Изменение амплитуды основной гармоники, влияющее только на величину  $\Lambda$ .
3. Одновременное изменение среднего поля и амплитуды основной гармоники.

Анализ этих возможностей показывает, что изменение только среднего поля неприемлемо из-за сильного его влияния на фазовое движение и поперечную устойчивость пучка.

При рассмотрении оставшихся двух возможностей автором диссертации было показано, что если при кратности ускорения  $q = 1$  требуемое увеличение разделения орбит можно получить, изменяя соответствующим образом только амплитуду основной гармоники, то при  $q \geq 2$  для коррекции фазового движения необходимо определенное дополнительное изменение среднего поля (форма изменения гармоники здесь также отлична от случая  $q = 1$ ).

Расчет требуемых для реализации эффекта расширения магнитных полей и анализ движения частиц в них проводились с помощью созданных автором программ EXPLAN и MOTION.

Для определения формы требуемого поля необходимо найти совместное решение уравнений (3) и (4) при задании желаемого вида функции  $\lambda(r)$ . Так как при  $n \neq \text{const}$  решение (3) и (4) в элементарных функциях не выражается, использовалось их численное интегрирование после приведения к следующей приближенной системе уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Lambda}{dr} &= \frac{\Lambda}{r} (1/\lambda - n - 1) \\ \frac{dB_N}{dr} &= \frac{2N^2\bar{B}}{rB_N} (\Lambda^2 - \Lambda) - \frac{3B_N}{2r} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $B_N = \bar{B}$  - амплитуда основной гармоники.

На рис.1 (кривая 3) показан результат интегрирования (6) в зоне конечных радиусов суперциклотрона при максимальном значении  $\lambda_m = 5$ .

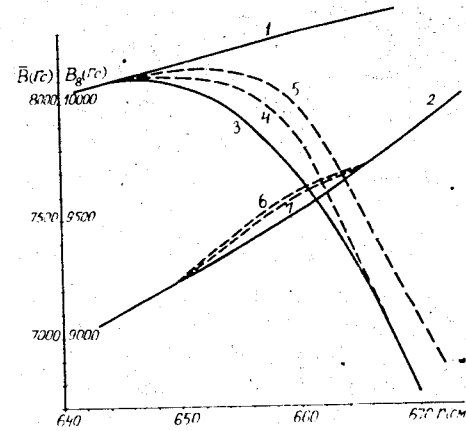


Рис.1. Среднее поле (2,6,7) и амплитуда основной гармоники (1,3,4,5) в зоне расширения орбит суперциклотрона. 1 - эксперимент; 2 - изохронное поле; 3 - расчет:  $q = 1$ ,  $\lambda_m = 5$ ; 4 - то же, но  $q \geq 2$ ; 5 - расчет:  $q \geq 2$ ,  $\lambda_m = 2$ ; 6,7 - расчет:  $q \geq 2$  при  $\lambda_m = 5$  и  $\lambda_m = 2$  соответственно.

Как следует из рис.1, для увеличения коэффициента расширения в 15 раз (от 0,32 до 5) необходимо на расстоянии  $\sim 30$  см

уменьшить соответствующим образом амплитуду гармоники примерно на 10%, что вполне реализуемо на практике.

На рис.2 показаны результаты интегрирования полных уравнений движения частиц в рассчитанном выше поле (рис.1, кривые 2, 3) в предположении независимого от фазового смещения набора энергии  $\Delta E = 2$  МэВ/оборот.

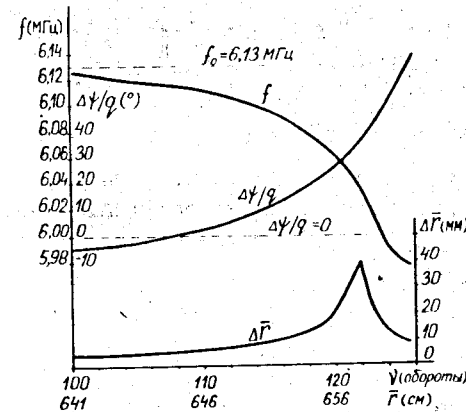


Рис.2. Изменение частоты обращения  $f$ , фазы ускорения  $\Delta\Psi/q$  и разделения соседних орбит  $\Delta\bar{r}$  в процессе развития эффекта расширения при постоянном наборе энергии за оборот.

Видно, что увеличение разделения происходит в течение  $\sim 15$  оборотов, во время которых частота обращения частиц уменьшается с 6,13 до 6,00 МГц, что вызывает смещение фазы частиц на  $\Delta\Psi = q \cdot 30^\circ$ . Так как в циклотроне предполагается использовать ускоряющую систему с  $q = 8$ , полученный сдвиг фазы неприемлем и необходимо принимать меры для его уменьшения.

Проведенное аналитическое рассмотрение фазового движения в зоне расширения дало следующее выражение для сдвига фазы:

$$\Delta\Psi \approx \frac{2\pi q B^2 (1 - B^2) E}{\Delta E (\lambda - \lambda_0)} \left[ 1 + n + \frac{1}{\lambda} - \frac{(1+n)\lambda_0}{\lambda - \lambda_0} \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} \right] \left( \frac{r - r_0}{r_0} \right)^2 \quad (7)$$

где  $r_0$ ,  $\alpha_0$  - средние значения радиуса орбиты и коэффициента расширения в начальный момент процесса;  $r$ ,  $\alpha$  - их текущие значения.

Из (7) следует, что есть два пути уменьшения  $\Delta\psi$ : увеличение набора энергии за оборот и уменьшение зоны развития эффекта, т.е. величин  $(r-r_0)$ . Так как обеспечить набор энергии, значительно превышающий 2 МэВ/оборот, не представляется возможным, вниманию автора было сосредоточено на втором пути.

В результате проведенных численных исследований было показано, что уменьшение зоны развития эффекта может быть достигнуто, если существенно ослабить влияние вынужденных колебаний на процесс расширения. Для этого при выборе конфигурации магнитного поля надо учитывать форму орбит ускорителя. На рис.3 показана схема, поясняющая принцип трансформации магнитного поля в целях уменьшения фазового сдвига.

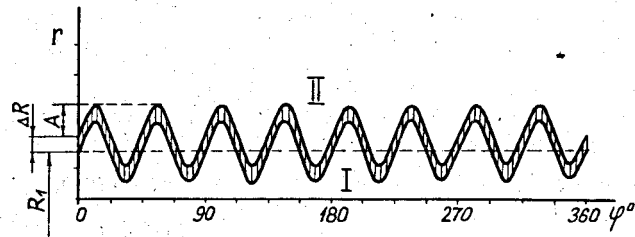


Рис.3. I - изохронная область, II - область увеличенного коэффициента расширения,  $\Delta R$  - ширина переходной зоны, A - амплитуда вынужденных колебаний,  $r_1$  - средний радиус внутренней границы переходной зоны.

В изохронной, переходной и области увеличенного коэффициента расширения, которые условно отделяются друг от друга синусоидальными линиями, по форме совпадающими с вынужденными колебаниями, магнитное поле определяется следующим образом:

$$B_z(r, \varphi) = \bar{B}(r) + [B_2(r) - \Delta B_2(r) \cdot \cos 2(\varphi - \varphi_2)] + \sum_{k=2}^6 B_{2k}(r) \cos [2k(\varphi - \varphi_{2k})], \quad (8)$$

где  $B_{2k}$ ,  $\varphi_{2k}$  - экспериментальные значения амплитуд и фаз гармоник магнитного поля;  $\bar{B}$  - изохронное поле; значение  $\Delta B_2(r)$  зависит от области. В области I  $\Delta B_2 = 0$ ; в области II  $\Delta B_2$  определяется путем интегрирования системы (6), а в переходной зоне

$$\Delta B_2(r) = \frac{r - r_1}{\Delta R} \Delta B_2(r_2), \quad (9)$$

где  $r_1$ ,  $r_2$  - радиусы границ переходной зоны для азимутального угла  $\varphi$ . Идея, заложенная в численный расчет движения частиц в таком поле, достаточно прозрачна. Если в предыдущих расчетах ширина зоны развития эффекта достигала 20 см (см. рис.2), то здесь она, очевидно, не может превышать ширины переходной зоны, которую нужно сделать, как ясно из (7), не более 6-7 см. Расчет динамики пучка в таком поле показал, что процесс расширения занимает теперь не более 4-х оборотов, разделение орбит достигает 40 мм, причем поперечные эмиттансы сохраняются, а фазовый сдвиг уменьшился на порядок.

Результаты разложения в ряд Фурье магнитного поля, полученного по рассмотренной схеме, приведены на рис.1 (кривые 4-7), из которого следует, что введение синусоидальных границ между изохронной и неизохронной областями и переходной зоной между ними приводит к изменению требуемых значений среднего поля и амплитуд основной гармоники.

В диссертации показано также, что при использовании достаточно большого коэффициента расширения орбит ( $\alpha_m = 4+5$ ) влияние изменений высших гармоник магнитного поля на эффект пренебрежимо мало.

Проведенное автором рассмотрение допусков на точность формирования магнитного поля в зоне расширения показало, что между допуском на величину коэффициента расширения  $\Delta\alpha$  и параметрами магнитного поля существует соотношение

$$\frac{\Delta B_N}{B_N} + \frac{\Delta(B_N'')}{B_N''} - \frac{2\Delta\bar{B}}{\bar{B}} + \frac{\Delta n}{1/\alpha - n - 1} = - \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot \frac{1}{1 - \alpha(1+n)}, \quad (10)$$

где  $B_N'' = d^2 B_N / dr^2$ .

Подстановка в (10) конкретных значений величин показывает, что наиболее жесткий допуск накладывается на формирование зависимости  $B_N''(r)$ . Например, для вывода протонов с энергией 800 МэВ вторая производная вблизи  $r = 650$  см должна быть в пределах  $B_N'' = -(5,10 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$  Тл/см<sup>2</sup>.

В процессе расширения происходит (если используется увеличение разделения орбит в 5-10 раз) переход через резонансное значение  $Q_r = 1$ . Однако скорость прохождения этого резонанса столь велика ( $dQ_r/dv \gg 0,5$ ), что при выполнении на практике допусков на первую гармонику поля, как показано в диссертации, резонанс проходит без существенного искажения орбит. При быстром уменьшении  $Q_r$ , однако, всегда выполняется условие  $Q_r^2 \gg 1/\alpha$ , т.е. при  $\alpha > 0$  устойчивость сохраняется.

Во II главе рассмотрена магнитная система, предназначенная для исследования эффекта расширения на электронной модели кольцевого циклотрона (ЭМКЦ).

Созданная в Лаборатории ядерных проблем ЭМКЦ имеет одинаковые с моделируемым протонным ускорителем конечную энергию и ее набор за



оборот (в единицах энергии покоя), а также частоты свободных колебаний и фазовую протяженность сгустка. На ЭМКЦ было экспериментально исследовано влияние пространственного заряда на частоту аксиальных колебаний пучка, достигнут максимальный средний ток 600 мкА, что соответствует току протонов 300-400 мА. С 1974 г. на ЭМКЦ проводятся исследования эффекта расширения орбит, которые потребовали существенной модернизации ее магнитной системы. Так как этот ускоритель работает при кратности  $q = 1$ , изменения, внесенные в магнитное поле, оказывали влияние только на гармонические составляющие и не касались среднего магнитного поля.

На рис.4 (кривая 2) показана полученная с помощью метода, изложенного в главе I, требуемая форма зависимости  $B_z(r)$ .

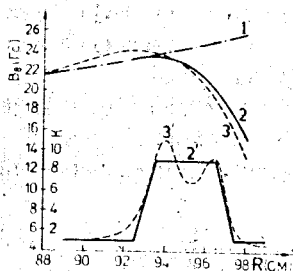


Рис.4. Амплитуда основной гармоники (кривые 1,2,3) и параметр  $k = \lambda(1+n)$  (кривые 2',3') в зоне конечных радиусов ЭМКЦ. 1 - эксперимент без расширения орбит, 2 - расчет при  $K = 9$  (кривая 2'), 3 - эксперимент, 3' - расчет по кривой 3.

Для формирования требуемого поля автором была разработана система вариационных обмоток, каждая из которых представляет собой плоскую периодическую последовательность радиальных линий и дуг окружностей, состоящую из прямой и обратной ветвей. В магнитном поле такой токовой структуры присутствуют только гармоники, кратные основной, и отсутствует среднее поле. На некотором внутреннем радиусе система создает магнитный поток обратного знака, что приводит к увеличению амплитуды гармоники в этом месте. Расчетная задача оптимизации параметров вариационных обмоток состояла в выборе их геометрии, взаимного положения и токов при условии, что обеспечивается:

- а) достаточно большое (3-4) см разделение орбит;
- б) удержание частоты аксиального движения в пределах  $1,3 < q_z < 2,0$ .

С помощью 4-х обмоток было сформировано поле (рис.4, кривая 3), численный расчет движения частиц в котором показал требуемое увеличение разделения орбит (рис.5) и удержание  $q_z$  в нужных пределах.

Выбранные параметры обмоток приведены в таблице I.

Результаты численных расчетов динамики эффекта показали, а эксперименты подтвердили, что для обеспечения достаточно большого ( $\Delta r \geq 2$  см) разделения орбит на всех азимутах следует ограничить первую

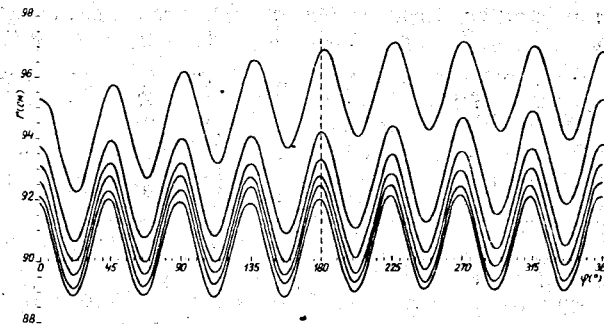


Рис.5. Расчетные траектории частиц в зоне эффекта расширения при экспериментальных значениях магнитного поля.

Таблица I. Параметры вариационных обмоток

№ пп	$R_n$ (см)	$R_k$ (см)	$2h$ (см)	$\psi_0$ (°)	$\theta_0$ (°)	$I$ (А)
1	100,0	115,5	14,1	9,5	45	469,5
2	99,5	106,5	9,0	3,3	45	122,5
3	94,5	98,5	9,0	2,2	45	37,5
4	93,5	95,5	11,0	1,4	45	-7,5

$R_n, R_k$  - начальный и конечный радиусы обмоток;  $2h$  - зазор между полюсами;  $\theta_0$  - период;  $\psi_0$  - угол привязки середины элемента периодичности к оси камеры;  $I$  - номинальный ток.

гармонику магнитного поля величиной  $B_{1z}/\bar{B} \leq 10^{-3}$  (на вторую гармонику и ее градиент допуск существенно менее жесткий). Выбор геометрии системы обмоток, необходимой для компенсации низших гармоник поля, проводился с помощью созданной автором программы MAPCOD, предназначенной для расчета магнитного поля произвольно расположенных в пространстве токовых элементов двух типов: кольцевых сегментов и параллелепипедов. Параметры обмоток компенсации, которые для вращения фазы гармоники располагались на плакировке и на внешней стороне вакуумной камеры па-рами, приведены в таблице 2.

Созданная система компенсационных обмоток успешно использовалась для уменьшения низших гармоник поля в зоне развития эффекта расширения и для подавления когерентных радиальных колебаний пучка в режиме "flat-top" ускорения.

Таблица 2. Параметры обмоток компенсации низких гармоник

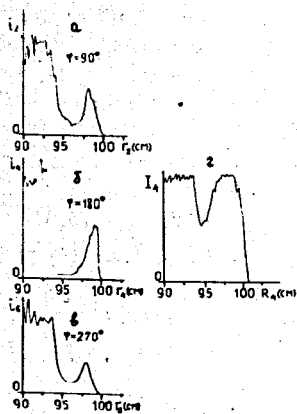
Номер пары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\bar{R}$ (см)	25	35	45	55	65	75	85	95	35	100	100
$\Delta R$ (см)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20
$2h$ (см)	8	8	8	8	8	8	8	8	64	64	64
$\theta_0$ (°)	60	60	60	60	60	60	60	60	40	120	90
$\varphi_0$ (°)	60	60	60	60	60	60	60	60	0	0	78
$\omega$	1	1	1	1	1	1	1	1	20	2	5
$I_m$ (А)	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10
$K$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

$\bar{R}, \Delta R$  - средний радиус и радиальная протяженность;  $2h$  - зазор между полюсами;  $\theta_0$  - угловая протяженность элемента;  $\varphi_0$  - угол привязки к оси камеры;  $\omega$  - число витков;  $I_m$  - максимальный ток;  $K$  - номер компенсируемой гармоники.

Проведенные с участием автора измерения магнитного поля ЭМКЦ и экспериментальное исследование эффекта расширения показали, что характеристики поля (среднее значение, вариация и низшие гармоники) сформированы с требуемой точностью.

На рис.6 показаны экспериментальные результаты измерения плотности тока электронов в зоне действия эффекта расширения.

Рис.6. Распределение тока в зоне эффекта расширения на различных азимутах: а, б, в - дифференциальная мишень  $\Delta r = 2$  мм, Г - интегральная мишень  $\Delta r = 30$  мм.



Измерения с дифференциальной мишенью показывают, что эффект расширения отчетливо проявляется в диапазоне азимутов  $90^\circ - 270^\circ$ , достигая максимума  $\Delta r \approx 4$  см на азимуте  $180^\circ$ . Наличие определенной доли частиц между отделенной орбитой и внутренним пучком объясняется тем, что, как показывают расчетные оценки, на ЭМКЦ энергетический разброс может превышать допуск  $\Delta w/w = 10^{-3}$ . Измерения с интегральной мишенью свидетельствуют, что потери частиц в процессе расширения отсутствуют. Из ре-

зультатов, представленных на рис.6, видно, что если для вывода пучка использовать вблизи азимута  $180^\circ$  электростатическое устройство с эффективной толщиной септума 0,5 мм, то коэффициент вывода составит 99,5%.

В III главе диссертации изложены результаты моделирования магнитной системы суперциклотрона, включая сюда систему вывода пучка. Исследование магнитного поля осуществлялось с помощью физического моделирования магнитов в разных масштабах и численного моделирования динамики частиц в измеренном магнитном поле.

Магнитная система суперциклотрона должна состоять из восьми секторных С-образных электромагнитов со спиральными полюсными наконечниками. Моделирование магнитного поля было проведено последовательно на одном секторе в масштабе М 1:15 и двух секторах в масштабе М 1:5.

Исследование модели магнита в масштабе М 1:15 позволило сделать следующие выводы относительно конструкции сектора и возможностей формирования требуемого поля:

1. Изохронное поле с точностью  $\pm 50 \cdot 10^{-4}$  Тл может быть получено при плоском межполюсном зазоре и форме границ полюсных наконечников в виде дуг окружностей. Элементами формирования поля могут служить пазы, расположенные между полюсным наконечником и полюсом.

2. С помощью нихм, укрепленных на боковых поверхностях полюсных наконечников, отклонения сформированного поля могут быть уменьшены до  $(10-15) \cdot 10^{-4}$  Тл.

3. Частота аксиальных колебаний во всем диапазоне радиусов ускорения может быть получена в пределах  $1,35 \leq \omega_z \leq 1,45$ .

На основании этих результатов были разработаны два сектора в масштабе М 1:5. На рис.7 показан общий вид экспериментального стенда,

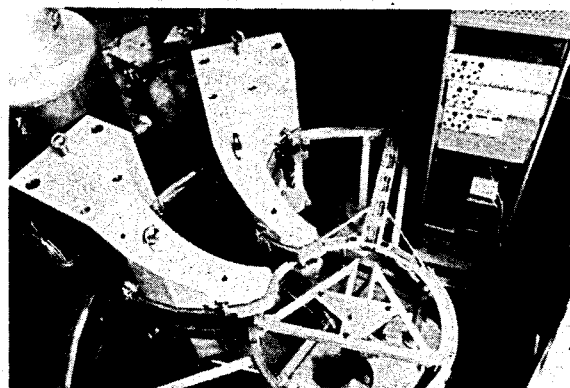


Рис.7. Общий вид экспериментального стенда.

состоящего из двух секторных магнитов, устройства для магнитных измерений и стойки управления. Измерения магнитного поля и его анализ проводились с помощью разработанной с участием автора



автоматической системы, работающей на линии с ЭВМ ЕС-1010. Ниже сформулированы основные задачи, которые были решены в результате исследований на этом стенде.

### 1. Определение степени неаддитивности суперпозиции полей секторов

Сравнение результатов измерений магнитного поля при совместном и раздельном возбуждении двух соседних секторов показало, что взаимное влияние приводит к уменьшению на  $(20 \pm 5) \cdot 10^{-4}$  Тл среднего поля и основной ( $N = 8$ ) гармоники во всем диапазоне радиусов, причем форма этих изменений такова, что взаимное влияние не может быть компенсировано простым увеличением тока возбуждения магнитов. Поэтому дальнейшее моделирование поля на одном секторе проводилось с учетом этого эффекта.

### 2. Формирование среднего поля

В результате выбора геометрии пазов отклонение измеренного поля от изохронного на этой модели было уменьшено в 2 раза по сравнению с  $M I:15$  и не превышает  $\pm 25 \cdot 10^{-4}$  Тл на всех рабочих радиусах (рис. 8). С помощью боковых шпиль это отклонение можно уменьшить до  $\pm 10 \cdot 10^{-4}$  Тл.

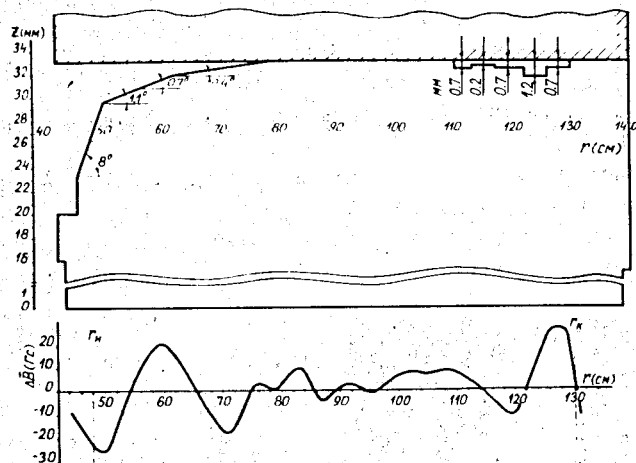


Рис. 8. Конечная геометрия полюсного наконечника и полученные отклонения среднего поля от изохронного.

### 3. Выбор параметров обмоток тонкой коррекции поля

Моделирование обмоток тонкой коррекции поля, расположенных на поверхности полюсного наконечника, обращенной к medianной плоскости, и расчеты на ЭВМ, проведенные на основе этих измерений, показали, что для уменьшения отклонений среднего поля от изохронного с  $\pm 10 \cdot 10^{-4}$  Тл

до  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  Тл система тонкой коррекции должна состоять из 30 обмоток с максимальным током 300 А ( $M I:1$ ).

Расчет движения частиц в полностью оптимизированном поле показал, что смещение фазы относительно ВЧ-напряжения не превышает  $20^\circ$  во всем диапазоне радиусов.

### 4. Моделирование системы расширения орбит

Требуемые для реализации ЭРО изменения магнитного поля были рассчитаны с помощью метода, изложенного в главе I. Для формирования требуемых изменений поля в области вывода автором было предложено использовать специальные магниты системы расширения (MCP), которые располагаются в свободных промежутках между основными секторными магнитами (рис. 9).

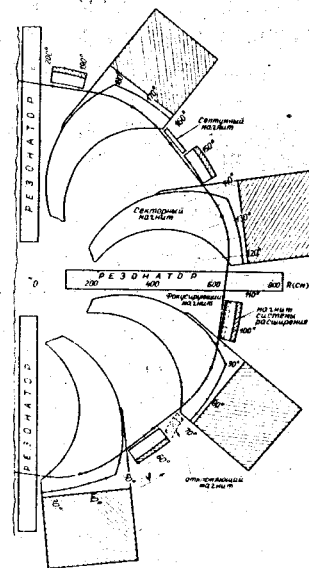


Рис. 9. Схема расположения магнитной системы циклотрона.

Поле MCP совпадает по направлению с полем секторных магнитов и приводит к уменьшению амплитуды основной гармоники и увеличению среднего поля. Для дополнительной коррекции магнитного поля системы расширения орбит используется увеличение межполюсного зазора секторных магнитов в узкой зоне конечных радиусов.

В результате последовательно проведенных расчетов геометрии MCP, их моделирования совместно с основными магнитами и численного анализа измеренных полей были найдены оптимальные условия, при которых обеспечивается увеличение разделения орбит вплоть до  $\Delta r = 40$  мм (рис. 10), при этом фазовый сдвиг в зоне, предшествующей эффекту, не превышает нескольких градусов, а поперечные эмиттансы искажаются незначительно.

### 5. Расчет системы отклонения

После расширения орбит отклонение пучка за пределы камеры ускорителя осуществляется с помощью системы, состоящей из трех элементов (рис. 9): септумного магнита с полем 0,1 Тл, фокусирующего магнита с градиентом  $-2,2$  Тл/м, который располагается в апертуре одного из магнитов системы расширения, и отклоняющего магнита с однородным полем

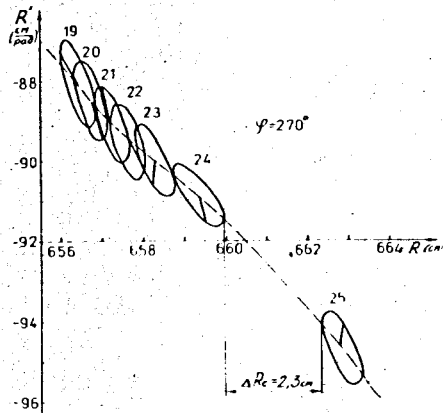


Рис.10. Процесс развития эффекта расширения на фазовой плоскости радиального движения для азимутального угла  $\psi = 270^\circ$ . Числа возле эллипсов - номера расчетных оборотов.  $\Delta R_0$  - ширина свободной от пучка зоны.

-1,6 Тл. Оптимизация параметров этих элементов (величины магнитных полей, азимуты расположения, угловые протяженности) показала, что внутри системы отклонения поперечное сечение пучка не увеличивается, а максимальное разделение орбит достигает перед отклоняющим магнитом 150 мм.

Расчеты на ЭВМ геометрии элементов системы отклонения продемонстрировали, что их конструкция будет несложна в изготовлении.

Основные параметры магнитной системы суперциклотрона приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры магнитной системы М I:I

Число секторов		8
Диаметр магнита по ядру	(см)	1910
Высота сектора	(см)	855
Вес сектора	(т)	625
Начальный радиус полюса	(см)	210
Конечный радиус полюса	(см)	700
Межполюсный зазор	(см)	9
Поперечное сечение обмотки	(см <sup>2</sup> )	15x50
Ампер-витки на сектор	(кА)	195
Плотность тока по меди	(А/мм <sup>2</sup> )	2,4
Мощность питания на сектор	(кВт)	200
Среднее поле на радиусе инжекции	(Тл)	0,4
Среднее поле на конечном радиусе	(Тл)	0,75
Вариация магнитного поля		1,5
Частота радиальных колебаний		1,1-1,9
Частота аксиальных колебаний		1,35-1,45
Число обмоток коррекции		25-30
Ампер-витки обмоток коррекции	(А)	250-300

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Впервые рассмотрена возможность использования эффекта расширения орбит для вывода частиц из секторных циклотронов с высокой кратностью ускорения. Показано, что для этой цели необходимо специальным образом одновременно изменять радиальные зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля. Найден метод расчета требуемых характеристик магнитного поля и создана система программ для ЭВМ, с помощью которых было продемонстрировано полное разделение радиальных эмиттансов пучка в области конечных радиусов секторных циклотронов.

2. Разработана магнитная система, предназначенная для исследования эффекта расширения орбит на электронной модели кольцевого циклотрона. Сформированное с необходимой точностью магнитное поле позволило экспериментально подтвердить наличие эффекта расширения и провести его изучение в обычном и "flat-top" режиме ускорения. Полученные экспериментальные результаты по наблюдению эффекта расширения находятся в согласии с результатами численных расчетов. Рассчитанная на основе экспериментальных данных эффективность вывода достигает 99,5%.

3. Проведены модельные исследования магнитной системы протонного секторного циклотрона на энергию 800 МэВ. Сформировано изохронное поле с точностью  $\pm 25 \cdot 10^{-4}$  Тл. На основании экспериментальных данных показано, что с помощью шимми и обмоток тонкой коррекции поля изохронное поле достигается с точностью  $\pm 10^{-4}$  Тл.

4. Показано с помощью расчета динамических характеристик пучка в сформированном магнитном поле, что во всей области ускорения существует аксиальная и радиальная устойчивость движения пучка, при этом частота аксиальных колебаний находится в требуемых пределах 1,35-1,45, а фазовое смещение пучка относительно ускоряющего напряжения не превышает  $20^\circ$ .

5. Предложена схема и сделан расчет геометрии элементов системы расширения орбит в области вывода протонного секторного циклотрона.

6. Проведено моделирование магнитной системы расширения орбит. Путем численного анализа измеренного поля найдена оптимальная конфигурация системы, обеспечивающая полное разделение пучка на двух последовательных оборотах.

7. Выбраны параметры магнитного поля и рассчитана геометрия элементов системы отклонения пучка с отделенной орбиты. Показано, что использование трехэлементной системы обеспечивает вывод частиц из камер ускорителя при незначительных искажениях поперечных эмиттансов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих рабо-

тах:

1. А.Т.Василенко, А.А.Глазов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Д.Н.Денисов, Б.И.Замолдчикова, Н.Л.Заплатин, В.В.Калиниченко, В.В.Кольга, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Н.И.Полумордвинова, Е.В.Самсонов, П.Т.Шилляников. ОИЯИ, Е9-8443, Дубна, 1974; IEEE Trans. Nucl. Sci., v. NS-22, No.3, p.1862 (1975).
2. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, Е.В.Самсонов. ОИЯИ, 9-83-290, Дубна, 1983.
3. А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин, А.Г.Комиссаров, Н.А.Морозов, Е.В.Самсонов, П.Т.Шилляников. ОИЯИ, Р9-8256, Дубна, 1974.
4. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов. ОИЯИ, Р9-8257, Дубна, 1974.
5. А.Т.Василенко, А.А.Глазов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Д.Н.Денисов, Б.И.Замолдчикова, Н.Л.Заплатин, В.В.Калиниченко, В.В.Кольга, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Н.И.Полумордвинова, Е.В.Самсонов, П.Т.Шилляников. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1975, т.1, с.205.
6. Н.Л.Заплатин, Д.Л.Новиков, Е.В.Самсонов. ОИЯИ, 9-82-416, Дубна, 1982.
7. А.А.Глазов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Е.В.Самсонов, П.Т.Шилляников. ОИЯИ, 9-82-188, Дубна, 1982.
8. А.А.Глазов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Е.В.Самсонов. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий. Киев, "Наукова думка", 1982, с.59.
9. A.A.Glazov, V.P.Dmitrievsky, N.L.Zaplatin, V.V.Kolga, V.A.Kotchkin, D.L.Novikov, L.M.Onischenko, E.V.Samsonov. Proc. of 10 Int. Conf. on Cyclotrons and their Application, East Lansing, 1984.
10. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, 9-11533, Дубна, 1978.
11. В.А.Аносов, А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин, С.В.Мионов, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий. Киев, "Наукова думка", 1982, с.171.
12. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, 9-83-289, Дубна, 1983.
13. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, Р9-84-155, Дубна, 1984.
14. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1984, т.1, с.330.
15. А.А.Глазов, Д.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский, В.П.Джелепов, Н.Л.Заплатин, В.В.Калиниченко, В.В.Кольга, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Е.В.Самсонов. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1984, т.1, с.334.

Рукопись поступила в издательский отдел

10 января 1986 года.