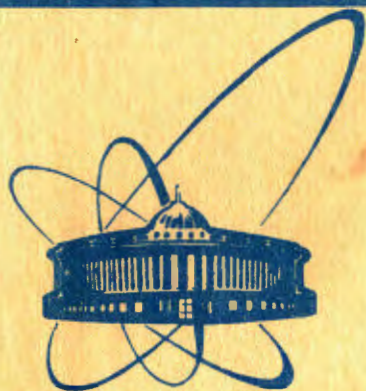


2809/84



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P9-84-155

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ (М 1:5)  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СИСТЕМЫ РАСШИРЕНИЯ ОРБИТ  
В СЕКТОРНОМ ЦИКЛОТРОНЕ

1984

В секторном протонном циклотроне на энергию 800 МэВ<sup>/1/</sup> проект которого разрабатывается в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, предполагается осуществить вывод пучка с помощью эффекта расширения орбит /ЭРО/<sup>/2/</sup>. На основании<sup>/2/</sup> и данных, полученных в результате моделирования магнитов в масштабах /1:5/<sup>/3/</sup> и /1:15/<sup>/4/</sup>, в<sup>/5/</sup> был найден метод выбора такой формы магнитного поля в зоне конечных радиусов циклотрона, которая обеспечивает реализацию ЭРО при сохранении пространственной и фазовой устойчивости движения пучка. С помощью этого метода в<sup>/5/</sup> получены также конкретные требования к значениям среднего поля и амплитуды основной /N = 8/ гармоники магнитного поля в зоне вывода пучка из секторного циклотрона.

В настоящей работе приведены результаты расчета и моделирования магнитной системы, позволяющей сформировать требуемое магнитное поле с точностью, достаточной для данного /M 1:5/ этапа моделирования.

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ В ЗОНЕ РАСШИРЕНИЯ ОРБИТ

Результаты численного расчета<sup>/5/</sup> магнитного поля, необходимого для реализации ЭРО в зоне конечных радиусов циклотрона, приведены на рис.1. Величины радиальной зависимости среднего поля В и амплитуды основной гармоники В<sub>g</sub> были получены в предположении, что значение коэффициента расширения орбит  $\alpha_{\max} = 5$  в интервале радиусов 648 - 670 см.

Выбор максимального значения коэффициента расширения зависит, в частности, от влияния на развитие ЭРО возможных изменений высших гармоник магнитного поля, которые будут происходить в процессе формирования требуемых зависимостей В и В<sub>g</sub>. Чтобы при изменении высших гармоник в пределах +20% максимальное значение разделения соседних орбит было достаточно большим /≥ 30 мм/, необходимо использовать при расчете требуемых зависимостей В и В<sub>g</sub> значение  $\alpha_{\max} \geq 5$ <sup>/5/</sup>. Однако не исключена возможность, что экспериментально полученные при моделировании изменения высших гармоник  $\Delta V_{16}$ ,  $\Delta V_{24}$ ,  $\Delta V_{32}$  ... не будут существенно влиять на величину максимального разделения орбит, и в этом случае требуемые значения В, В<sub>g</sub> могут быть получены при условии  $\alpha_{\max} = 2 \div 3$ . Следовательно, хотя формирование зависимостей В и В<sub>g</sub> /кривые 4 и 3 рис.1/ обеспечивает величину максимального разделения орбит /30 ÷ 40/ мм, возможно получение аналогичного результата и при

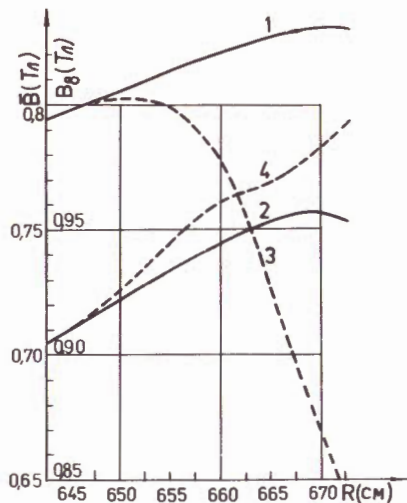


Рис.1. Магнитное поле циклотрона в зоне конечных радиусов /М 1:1/. 1, 2 - амплитуда основной гармоники  $B_g$  и среднее поле  $B$ , измеренные на модели магнитной системы /М 1:5/, 3, 4 - соответственно  $B_g$  и  $B$ , требуемые для реализации эффекта расширения орбит при  $\alpha_{max} = 5$ .

несколько отличных от приведенных на рис.1 значений средней составляющей и амплитуды основной гармоники магнитного поля. Ответ на вопрос, насколько приемлема та или иная форма кривых  $B$  и  $B_g$ , может быть получен только в результате численного расчета движения частиц, поскольку аналитически учесть влияние конкретного вида высших гармоник не представляется возможным.

## 2. СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РАСШИРЕНИЯ

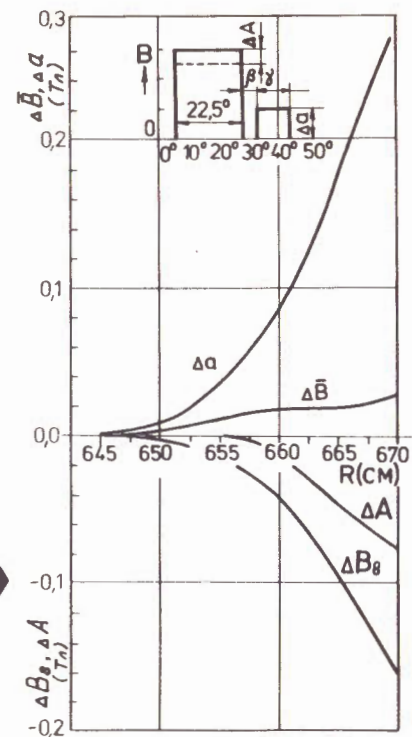
Для формирования требуемого магнитного поля в зоне расширения орбит необходимо, как следует из рис.1, обеспечить разные по знаку изменения среднего поля и амплитуды основной гармоники. При фиксированной угловой протяженности секторного магнита в рассматриваемой зоне ( $\Delta\phi \approx 22^\circ$ ), изменением только геометрии межполюсного зазора невозможно выполнить оба эти требования одновременно. Поэтому рассматривалась следующая схема размещения элементов системы расширения орбит /рис.2/. В свободном промежутке между ускоряющим резонатором и секторным магнитом располагается основной элемент - магнит системы расширения. Создаваемое этим элементом магнитное поле  $\Delta a$  совпадает по знаку с полем секторного магнита и приводит к увеличению среднего поля и уменьшению вариации поля всей магнитной системы. В качестве дополнительного элемента системы было использовано увеличение межполюсного зазора  $2h_1$  секторного магнита, приводящее к уменьшению максимального поля в зазоре на величину  $\Delta A$  и, как следствие, к уменьшению  $\bar{B}$  и  $B_g$ .

Для оценки требуемых значений  $\Delta a$  и  $\Delta A$  был сделан расчет, выполненный в предположении, что азимутальные распределения магнитных полей секторного магнита и магнита системы расширения имеют прямоугольный вид. Разложение в ряд Фурье азимутальных зависимостей при  $(\Delta a, \Delta A) = 0$  и  $(\Delta a, \Delta A) \neq 0$  и сравнение полученных результатов дает следующие выражения для изменений среднего



Рис.2. Схема размещения элементов магнитной системы: 1, 2 - границы зоны формирования требуемых изменений магнитного поля.

Рис.3. Требуемые изменения магнитного поля в зоне расширения /М 1:1/.  $\Delta\bar{B}$ ,  $\Delta B_g$  - изменения среднего поля и амплитуды основной гармоники,  $\Delta a$  - поле магнита системы расширения,  $\Delta A$  - изменение поля в зазоре секторного магнита.



поля и амплитуды основной гармоники:

$$\Delta\bar{B} \approx \frac{1}{2} \Delta A + \frac{4\gamma}{\pi} \Delta a, \quad /1/$$

$$\Delta B_g \approx \frac{2}{\pi} \Delta A - \left[ \frac{2}{\pi} \sin 4(\gamma + 2\beta) \cdot \sin 4\gamma \right] \Delta a, \quad /2/$$

где  $\gamma$  - угловая протяженность магнита системы расширения,  $\beta$  - угловое расстояние между секторным магнитом и магнитом системы расширения.

Из конструктивных соображений было выбрано  $\gamma = 11^\circ$ ,  $\beta = 4^\circ$ . Решая при этих значениях  $\gamma$  и  $\beta$  уравнения /1/ и /2/ относительно  $\Delta A$  и  $\Delta a$ , получаем

$$\Delta A \approx 1,16 \Delta\bar{B} + 0,65 \Delta B_g, \quad /3/$$

$$\Delta a \approx 1,72 \Delta\bar{B} - 1,35 \Delta B_g. \quad /4/$$

На рис.3 показаны рассчитанные по /3/ и /4/ кривые  $\Delta a(R)$  и  $\Delta A(R)$ . Использованные в этом расчете значения  $\Delta\bar{B}$  и  $\Delta B_g$  показаны на рис.1 как разность кривых 4-2 и 3-1 соответственно. Имея в виду отмеченные выше возможные в процессе моделирования

изменения требований к  $\bar{V}$  и  $V_0$ , а также условия, при которых получены /3/ и /4/, значения  $\Delta A$  и  $\Delta a$  в дальнейшем рассматривались как "первое приближение" /оптимальные значения искались вблизи него/.

### 3. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Выбор формы магнита системы расширения проводился с помощью программы POISSON /6,7/ в предположении двумерности геометрии. В качестве требуемого магнитного поля использовались значения, приведенные на рис.3 /кривая  $\Delta a$ /.

На рис.4 показано в масштабе 1:5 выбранное с помощью расчетов поперечное сечение магнита и получившееся при этом отклонение расчетного магнитного поля от требуемого /сплошная линия/.

Модель магнита системы расширения в масштабе 1:5 была изготовлена из Ст.3. Двухвитковая обмотка возбуждения магнита из медного проводника квадратного сечения 8,5x8,5 мм с диаметром внутреннего отверстия 5 мм охлаждалась водой.

Полученные в результате измерений на модели отклонения магнитного поля от требуемого показаны на рис.4 /штриховая линия/. Разность расчетного и экспериментального отклонений показывает, что вблизи полюса магнита / $r_{1/5} = 133-134$  см/ точность расчета по программе POISSON составляла 1%. При сравнении рис.3 и 4 видно также, что отклонение измеренной величины  $\Delta a(r)$  от требуемых значений достигает 10%. Так как измеренные азимутальные распределения поля магнита системы расширения /рис.5/ не прямоугольны, то полученные отклонения были приняты приемлемыми.

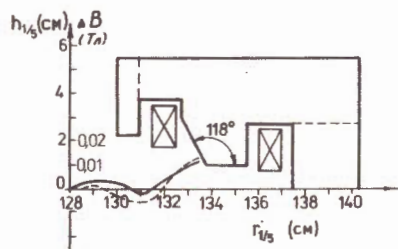


Рис.4. Поперечное сечение магнита системы расширения /М 1:5/. — — отклонение расчетного магнитного поля от требуемого, ---- — отклонение экспериментального поля от требуемого. Возбуждение магнита — 5000 ампер-витков.

Рис.5. Азимутальные распределения магнитного поля магнита системы расширения на разных радиусах /М 1:5/,  $r_{1/5}$  /см/.

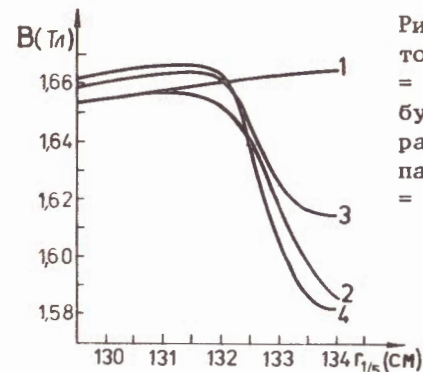
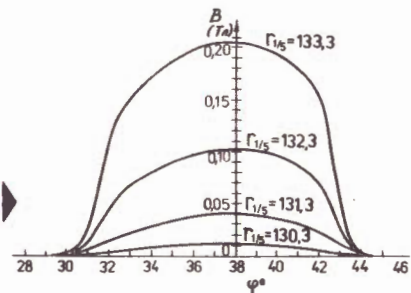


Рис.6. Магнитное поле в зазоре секторного магнита /М 1:5/. 1 —  $2h_1 = 1,8$  см /плоский зазор/, 2 — требуемое поле /разность кривых 2 и 1 равна  $\Delta a$ /, 3 —  $2h_1 = 1,88$  см в диапазоне 132,5–135,5 см, 4 —  $2h_1 = 1,92$  см в диапазоне 132,5–135,5 см.

С целью формирования зависимости  $\Delta a(r)$  были проведены эксперименты по увеличению зазора секторного магнита от  $2h_1 = 1,8$  до  $2h_1 = 1,88$  см, а затем до  $2h_1 = 1,92$  см в диапазоне радиусов  $r_{1/5} = 132,5 \div 135,5$  см /рис.6/.

Чтобы получить набор вариантов магнитного поля, необходимый для выбора оптимального поля с помощью численных расчетов движения частиц, были проведены измерения магнитного поля при различных уровнях возбуждения магнита системы расширения:  $IW = 3800; 4000; 4400; 5000$  ампер-витков /М 1:5/.

### 4. АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В СФОРМИРОВАННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Расчет движения частиц проводился на ЭВМ CDC-6500 с помощью программы MOTION /5/. Для представления магнитного поля использовались восемь гармоник, полученных в результате разложения измеренного поля в ряд Фурье и последующей процедуры сглаживания. Из полученных таким образом значений  $V$  и  $V_0$  затем вычиталось  $50 \cdot 10^{-4}$  Тл для того, чтобы учесть эффект взаимного влияния соседних секторных магнитов /3/. Прирост энергии частицы производился с учетом фазы ее движения относительно ВЧ напряжения в четырех ускоряющих резонаторах при амплитуде напряжения 500 кВ. Расчеты проводились для двух значений радиального размера пучка в зоне, предшествующей максимальному разделению: 5 и 10 мм /соответствующие значения радиальных эмиттансов  $2\pi$  и  $8\pi$  мм мрад/.

Основными параметрами, по которым делались выводы о качестве сформированного поля, были величина максимального разделения между соседними оборотами  $\Delta R$  и радиальный размер пучка на максимально отделенном обороте  $\Delta r$ . Разность этих величин дает примерное значение свободной от частиц радиальной зоны  $\Delta R_c$ , в которой может быть расположен септум отклоняющего устройства выводного канала. Для выполнения условия 100%-ного вывода частиц величина  $\Delta R_c$  должна быть  $\sim 15-20$  см. Для пучка с радиальным значением поперечного сечения  $\Delta r = 10-15$  мм такая ширина свобод-

ной зоны обеспечивается при разделении между соседними орбитами  $\Delta R \approx 30$  мм. С другой стороны, как показали численные расчеты, значения  $\Delta R > 40$  мм нежелательны, т.к. процесс ускорения в этом случае сопровождается существенным увеличением радиального размера пучка на максимально отделенной орбите. Таким образом, требование к величине максимального разделения между оборотами сводилось к следующему:  $30 \text{ мм} < \Delta R < 40 \text{ мм}$ .

Основные результаты анализа различных вариантов сформированного магнитного поля показаны на рис.7-9. При увеличении зазора секторного магнита на 4 мм в зоне  $R = 662,5 \div 677,5$  см и при токе возбуждения магнита системы расширения  $IW = 19000$  ампер-

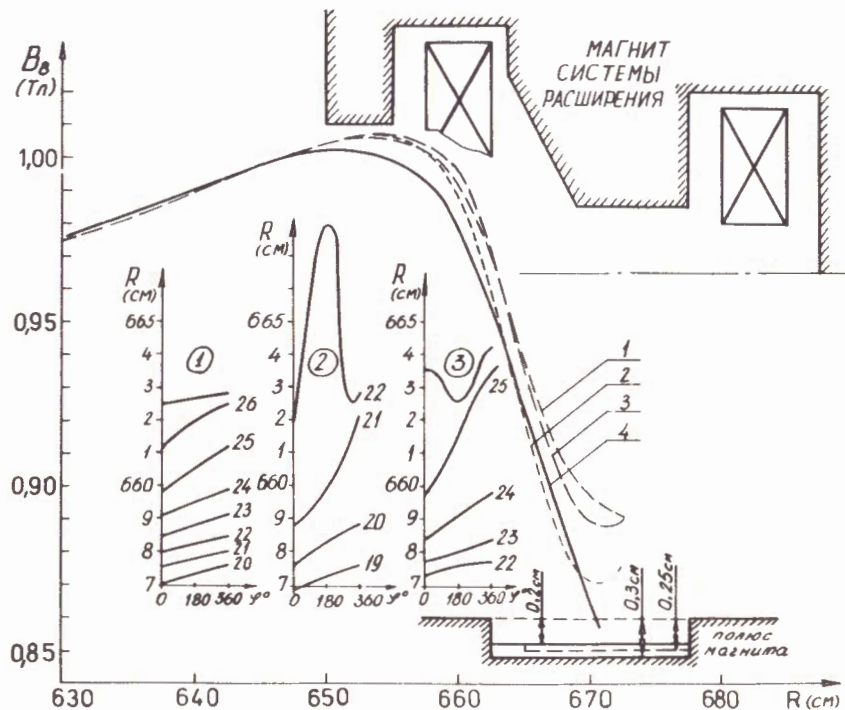


Рис.7. Амплитуда основной гармоники магнитного поля и траектории движения частиц в зоне расширения орбит /М 1:1/. 1 -  $B_0$  при:  $2h_1 = 9,4$  см,  $R = 622,5-677,5$  см;  $IW = 19000$  ампер-витков. 2 -  $B_0$  при:  $2h_1 = 9,6$  см,  $R = 662,5-677,5$  см;  $IW = 20000$  ампер-витков. 3 -  $B_0$  при:  $2h_1 = 9,5$  см,  $R = 665,0-677,5$  см;  $IW = 19000$  ампер-витков. 4 - расчетная кривая  $B_0$  при  $\alpha_{\max} = 5$ . ①, ②, ③ - траектории движения частиц, соответствующие кривым 1, 2, 3. Точки траекторий взяты через период магнитной системы  $45^\circ$ .

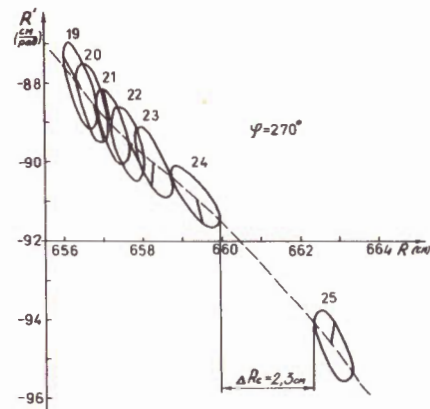


Рис.8. Процесс развития эффекта расширения на фазовой плоскости радиального движения для азимутального угла  $\phi = 270^\circ$ . Числа возле эллипсов - номера расчетных оборотов.  $\Delta R_c$  - ширина свободной от пучка зоны. Энергия отделенного пучка  $W = 790$  МэВ.

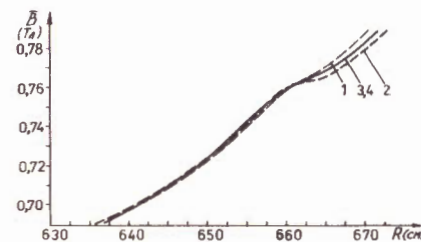


Рис.9. Фазовое смещение пучка в процессе расширения в зависимости от номера расчетного оборота. Условия расчета совпадают с условиями расчета кривой ③, рис.7.

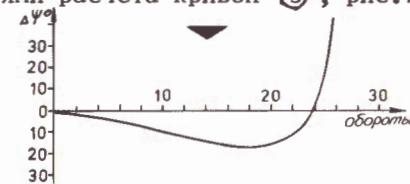


Рис.10. Среднее магнитное поле в зоне расширения орбит /М 1:1/. Кривые этого рисунка и кривые 1, 2, 3, 4 рис.7 получены при одинаковых условиях.

витков /М 1:1/, максимальное разделение орбит не превышает 15 мм /рис.7, кривые 1 и ①/. Увеличение тока возбуждения в этой ситуации не приводит к увеличению разделения, т.к. увеличивается отклонение среднего поля от требуемого и, как следствие, происходит сильное смещение фазы частиц относительно максимума  $B_0$  напряжения.

Увеличение зазора секторного магнита на 6 мм и увеличение для компенсации возмущения среднего поля  $IW$  до 20000 ампер-витков приводит к величине максимального разделения орбит, равной 8 см /рис.7, кривые 2 и ②/, однако в этом случае на максимальной отдаленной орбите происходит увеличение радиального размера пучка в 3-4 раза.

Как следует из рис.7, приемлемое значение разделения орбит  $/ \approx 30 \text{ мм} /$  получается при увеличении зазора секторного магнита на 5 мм в диапазоне радиусов  $665,0 \div 667,5$  см /М 1:1/ и при  $IW = 19000$  ампер-витков /рис.7, кривые 3 и ③/. Расчет динамики развития эффекта при этих условиях показал, что величина свободной от пучка зоны достигает 23 мм на азимуте  $\phi = 270^\circ$ , причем радиальный размер поперечного сечения пучка в процессе расширения сохраняется  $/ \Delta r = 10 \text{ мм} /$ , рис.8/. Из рис.8 видно также,

что весь процесс развития эффекта расширения занимает не более 4 оборотов, поэтому фазовое смещение пучка /рис.9/ не превышает  $30^\circ$ . Отклонение измеренного среднего магнитного поля от требуемого оказалось не превышающим  $10^{-3}$  Тл /рис.10/.

Таким образом, в процессе моделирования системы расширения орбит были найдены условия, при которых она обеспечивает свободную от пучка зону шириной 23 мм, достаточную для постановки септума отклоняющего устройства выводного канала. Радиальный размер пучка при этом не изменяется, а фазовое смещение находится в допустимых пределах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Желепов В.П., Дмитриевский В.П. ОИЯИ, 9-10534, Дубна, 1977.
2. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И. ОИЯИ, Д9-81-280, Дубна, 1981.
3. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, 9-83-289, Дубна, 1983.
4. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, 9-11533, Дубна, 1978.
5. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, 9-83-290, Дубна, 1983.
6. Salmon J.M. Poisson Group Programs, CERN, MSC-M-13, 1975.
7. Ворощцов С.Б. и др. ОИЯИ, Б1-11-12070, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 марта 1984 года

Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф.  
Расчет и моделирование /М 1:5/ магнитного поля  
системы расширения орбит в секторном циклотроне

P9-84-155

Приведены результаты расчета геометрии и моделирования в масштабе 1:5 системы расширения орбит в протонном секторном циклотроне на энергию 800 МэВ. Обсуждаются требования к форме изменений средней составляющей и амплитуды основной гармоники магнитного поля, обеспечивающие разделение орбит  $30 \pm 40$  мм в зоне вывода пучка из циклотрона. Требуемый характер магнитного поля достигается с помощью специальных магнитов, которые располагаются между основными секторными магнитами, и путем изменения межполюсного зазора последних. Показаны результаты расчета геометрии специальных магнитов с помощью программы POISSON и приведено сравнение измеренных и расчетных магнитных полей. Результаты измерений магнитного поля анализировались путем численных расчетов динамики движения частиц. Определены ток возбуждения специальных магнитов и величина зазора секторных магнитов, при которых обеспечивается увеличение разделения орбит от 3 до 30 мм при наборе энергии  $\sim 2$  МэВ/об. Радиальный эмиттанс пучка в процессе расширения орбит сохраняется  $/\epsilon_r = 8 \pi$  мм·мрад/, а фазовое смещение пучка не превышает  $30^\circ$ . Ширина радиальной зоны, свободной от частиц, достигает 20 мм, что дает возможность поставить септум отклоняющего устройства выводного канала.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Zaplatin N.L., Samsonov E.V., Chesnov A.F.  
Calculation and Modelling /Scale 1:5/ of Magnetic Field  
of Orbit Expansion System in a Sector Cyclotron

P9-84-155

The results of geometry calculation and modelling in scale 1:5 of the orbit expansion system in proton sector cyclotron up to 800 MeV energy are presented. The requirements to the form of change of mean field and the basic magnetic field harmonic amplitude which provide the turn separation of 30-40 mm in the cyclotron extraction zone are discussed. The required character of magnetic field changes is obtained due to special magnets placed between the basic sector magnets and to the change of pole gap of latter. The results of geometry calculation of special magnets with the help of POISSON program and comparison of the measured and calculated magnetic field are shown. The results of magnetic field measurements on the model are analysed by means of numerical calculation of the particle motion. The excitation current of special magnets and the pole gap of sector magnets are defined, which provide the increase of turn separation from 3 to 30 mm with  $\sim 2$  MeV/turn energy gain. The radial emittance of the beam in expansion process is constant  $/\epsilon_r = 8 \pi$  mm.mrad/ and the beam phase shift is not greater than  $30^\circ$ . The width of particle free radial zone is up to 20 mm, which provides the possibility to place in it the septum of bending device of the extraction channel.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984