

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



261/2-79

0-361

9 - 11992

750/2-79

Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Б.А.Кленин,
А.К.Евдокимов, С.Г.Фефилова, Р.Ц.Оганесян,
Ю.Сура, А.М.Сухов, В.А.Чугреев

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1978

9 - 11992

Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Б.А.Кленин,
А.К.Евдокимов, С.Г.Фефилова, Р.Ц.Оганесян,
Ю.Сура, А.М.Сухов, В.А.Чугреев

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*Направлено на Совещание по изохронным циклотронам,
ПНР, Краков*



Оганесян Ю.Ц. и др.

9 - 11992

Магнитное поле четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов

В работе приводятся теоретические и экспериментальные результаты по формированию магнитного поля четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов ОИЯИ. Циклотрон имеет четырехсекторную магнитную структуру. Рабочий диапазон магнитных полей, в котором осуществляется формирование поля, лежит в интервале 18,5 - 21,1 кЭ. Сформированные магнитные поля отличаются от изохронных на величину, не превышающую ± 20 Э. Они позволяют ускорять ионы в широком диапазоне отношений $A/Z = 4 + 25$ до энергий 35 ± 1 МэВ/нуклон соответственно.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Oganessian Yu.Tz. et al.

9 - 11992

Magnetic Field of Four Meter Isochronous Heavy Ion Cyclotron

The results of theoretical and experimental investigations on shaping of magnetic field of the JINR 4 m isochronous heavy cyclotron are presented. The cyclotron has 4 sector magnetic structure. Shaping of the field is realized within the operation range 18.5 - 21.5 kOe. The shaped magnetic fields differ from isochronous fields to not more than ± 20 Oe. This allows to accelerate ions with the mass-to-charge ratio $A/Z = 4 + 25$ to energies 35 - 1 MeV/nucleon, respectively.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Сооружаемый в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400 предназначен для ускорения ионов в диапазоне отношений $A/Z = 4 + 25$ до энергий $E = 400 - 675 Z^2/A$ МэВ.

Ускоритель создается на основе электромагнита с диаметром полюсов 400 см, который был спроектирован и изготовлен в ОИЯИ.

Циклотрон позволит решать широкий круг задач как физического, так и прикладного характера.

В настоящей работе представлены результаты формирования магнитного поля циклотрона.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Электромагнит циклотрона У-400 состоит из магнитопровода сечением $4,2 \times 2,0$ м², полюсов диаметром 4,0 м и обмотки возбуждения. Магнитопровод весом 1800 т выполнен сборным из отдельных пакетов, сваренных из стальных листов марки Ст-3 толщиной 20 мм. Два полюса весом 250 т каждый состоят из дисков толщиной 100 мм и крышек камеры толщиной 180 мм. Величина зазора между крышками составляет 300 мм. В балках и полюсах электромагнита имеется центральное отверстие диаметром 280 мм, предусмотренное для установки вертикального ионного источника или системы аксиальной инжекции ионов. Основная обмотка электромагнита состоит из двух катушек возбуждения с общим числом витков 504. Витки выполнены из алюминиевой трубки квадратного сечения 53×53 мм²/ с отверстием диаметром 34 мм для охлаждающей воды.

Электропитание основной обмотки возбуждения /2500 А/ обеспечивается статическими тиристорными преобразователями. Стабильность тока основной обмотки составляет $5 \cdot 10^{-5}$.

Все детали электромагнита изготовлены в Дубне. Сборка пакетов магнитопровода выполнялась в циклотронном зале, где параллельно производился монтаж всего ускорителя.

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ЦИКЛОТРОНА

Магнитная структура циклотрона У-400 аналогична структурам изохронных циклотронов У-200^{/1/} и У-200П^{/2/}. Секторы, создающие азимутальную вариацию магнитного поля, имеют прямые границы и угловую протяженность 45° . Их толщина выбиралась исходя из требований аксиальной фокусировки ионов с отношением $A/Z=3,5 \div 4$, ускоряемых до энергий 30-35 МэВ/нуклон. В этом случае величина флаттера на конечном радиусе циклотрона должна быть не ниже 0,08. Действительно, условие аксиальной фокусировки можно записать как

$$N^2 / (N^2 - 1) \cdot F > 2E / E_0 / (1 - 2E / E_0),$$

где N - число периодов магнитного поля циклотрона, E_0 - энергия покоя иона, E - кинетическая энергия иона на конечном радиусе, F - флаттер магнитного поля.

Из этого неравенства для заданной энергии /30 ÷ 35 МэВ/нуклон/ получим, что $F > 0,074$.

Выбор параметров магнитной структуры циклотрона У-400 основывался на измерениях магнитных полей циклотронов У-200 и У-200П, которые показали, что заданную величину флаттера можно получить при поле в центре У-400, равном ~ 19 кЭ. Толщина секторов должна при этом составлять ~ 90 мм.

Изохронная форма магнитного поля обеспечивается кольцевыми и боковыми /на границах секторов/ шиммами, а также токовыми корректирующими катушками.

В отличие от циклотрона У-200 в ускорителе У-400 кольцевые шиммы размещаются на секторах и выполняются как одно целое с последними. Вследствие этого зазор между секторами изменяется от 44 до 74 мм. Между секторами и крышками вакуумной камеры имеются зазоры величиной 18 мм, в которых размещаются токовые корректирующие катушки. Эти катушки имеют собственную форвакуумную камеру, изолированную от основного вакуумного объема. Необходимое количество корректирующих катушек, число ампер-витков в них и их распределение по радиусу рассчитывались на ЭВМ методом наименьших квадратов. Было найдено, что распределение обмоток по R^2 является оптимальным. Необходимое число пар катушек составило 10, величина градиента магнитного поля $\partial H / \partial r$ на конечном радиусе при включенных катушках - $\pm 2-3$ Э/см, что вполне удовлетворительно. Каждая кольцевая ка-

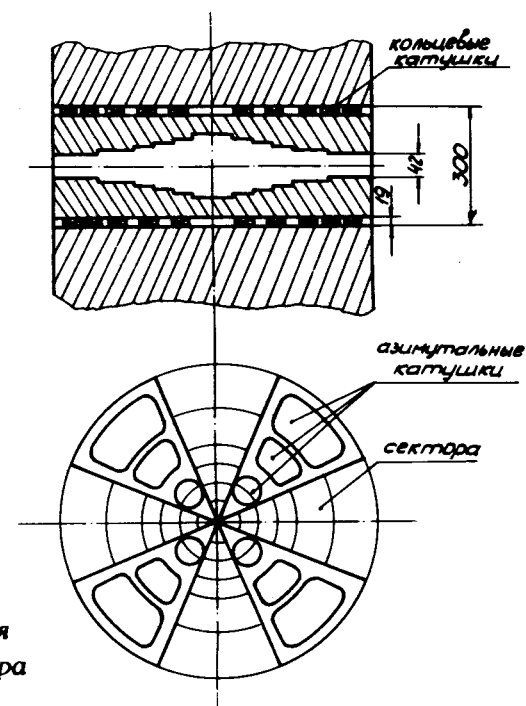


Рис.1. Центральная магнитная структура циклотрона.

тушка состоит из трех витков медного проводника сечением $11,5 \times 11,5 \text{ мм}^2$ с отверстием для воды диаметром 8 мм. Витки изолированы стеклолентой с эпоксидным компаундом и уложены в алюминиевый каркас. Геометрия воздушного зазора циклотрона У-400 приведена на рис. 1. Предусмотрена также установка на циклотроне двенадцати пар гармонических обмоток для коррекции амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля в окрестности центра, на средних и внешних радиусах.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Увеличение размеров ускорителя У-400 и расширение его диапазона рабочих уровней магнитного поля привело к значительному /почти на порядок/ увеличению объема магнитных измерений по сравнению с достигнутым на циклотроне У-200. Для увеличения скорости и точности магнитных измерений на У-400 методика, разработанная для циклотрона У-200^{/3/}, была усовершенствована.

Основные изменения в измерительной аппаратуре свелись к следующему: 1/ перемещение датчика как по радиусу, так и по азимуту осуществлялось автоматически; 2/ измерение магнитного поля в точке производилось в старт-стопном режиме; 3/ магнитное поле при каждом азимутальном положении штанги измерялось десятью датчиками Холла.

Датчики на штанге крепились к латунной ленте /трансмиссии/ на расстоянии 200 мм друг от друга. При полном измерении магнитного поля циклотрона ход ленты составлял 200 мм. Шаг измерительной штанги по азимуту был равен $0,9375^\circ$. Измерения по радиусу производились с шагом /30-40/ мм. Скорость измерения системой из 10 датчиков составляла ~ 0,6 с/точку. Заметим, что для У-200 это время равнялось 1 с/точку. Для измерения использовались датчики из антимонида индия^{/4/}, прокалиброванные датчиком ЯМР. Результирующая

точность измерений магнитного поля была не хуже $2 \cdot 10^{-4}$.

Данные о магнитных измерениях выводились на перфоленду, а затем обрабатывались на ЭВМ "Минск-32". С ЭВМ выдавалась информация следующего содержания: 1/ среднее поле и флаттер; 2/ значения основных и низших гармоник поля; 3/ частоты радиальных и аксиальных бетатронных колебаний.

После анализа данных магнитное поле корректировалось и цикл измерения повторялся.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЦИКЛОТРОНА

Результаты измерения и формирования магнитного поля циклотрона У-400 представлены на рисунках. На рис. 2 приведена зависимость среднего уровня магнитного поля в центре циклотрона от тока возбуждения

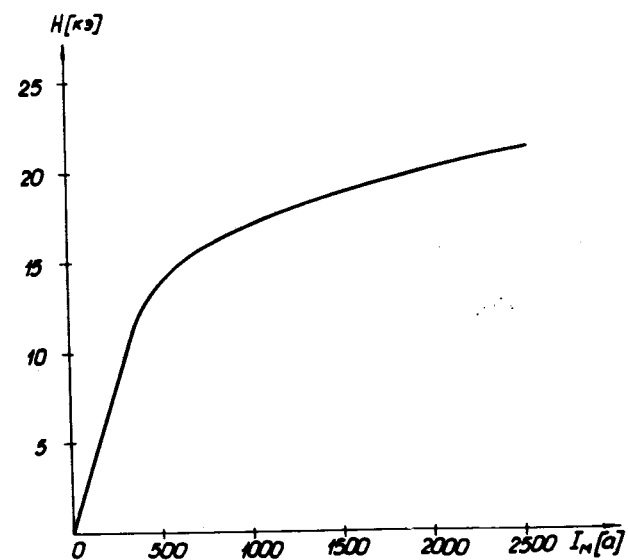


Рис. 2. Кривая возбуждения электромагнита циклотрона У-400 для среднего воздушного зазора 200 мм.

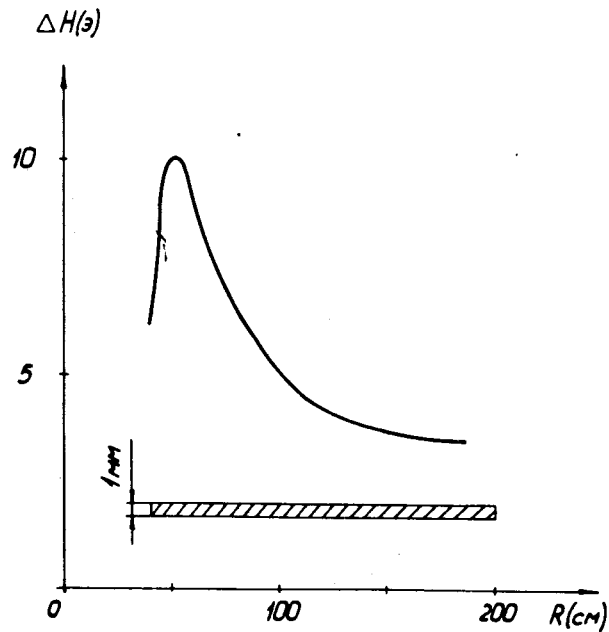


Рис.3. Распределение среднего магнитного поля от азимутальных шимм толщиной 1 мм $H_0=21,1$ кЭ/.

основных обмоток. Видно, что максимальный уровень магнитного поля циклотрона составляет 21,3 кЭ. Формирование изохронной формы магнитного поля проводилось на элементе периодичности для ионов с отношением $A/Z=9,5-10$ при центральном поле, равном 21,1 кЭ. Отличие реального распределения поля от изохронного корректировалось изменением угловой протяженности секторов. Этот метод шиммирования позволил быстро и с достаточной точностью исправить ошибки формирования поля величиной 20-100 Э. Вклад в среднее магнитное поле $\Delta H(r)$ от азимутальных шимм для циклотрона У-400 определялся экспериментально. Зависимость ΔH от радиуса R для шимм толщиной 1 мм приведена на рис. 3.

Азимутальное распределение магнитного поля на элементе периодичности для ряда радиусов показано на рис. 4. На рис. 5,6 приведены средние магнитные

поля и флаттер, сформированные для ускорения ионов с различным отношением A/Z . Видно, что величина флаттера при уровнях полей 18,5-19 кЭ удовлетворяет поставленным условиям фокусировки для ускорения ионов с $A/Z=3,5 \div 4$ до энергий 30-35 МэВ/нуклон. Рабочее магнитное поле для ускорения ионов с $A/Z=9,5-10$ отличается от изохронного в основной области ускорения на величину ± 20 Э. Это приводит к сдвигу фазы ионов в процессе ускорения, зависимость которого от радиуса приведена на рис. 7. Конечный радиус ускорения составляет при этом 175 см. Более точное регулирование

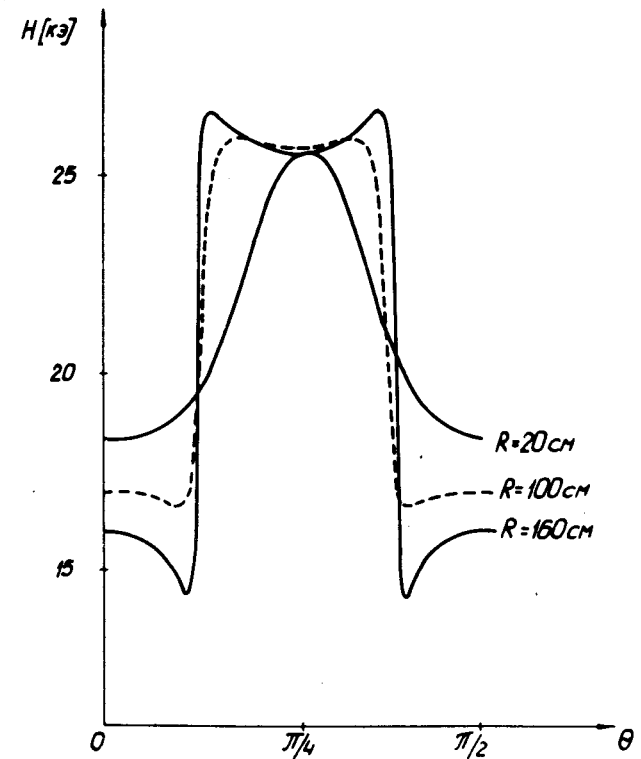


Рис.4. Распределение магнитного поля по азимуту $H_0=21,1$ кЭ/.

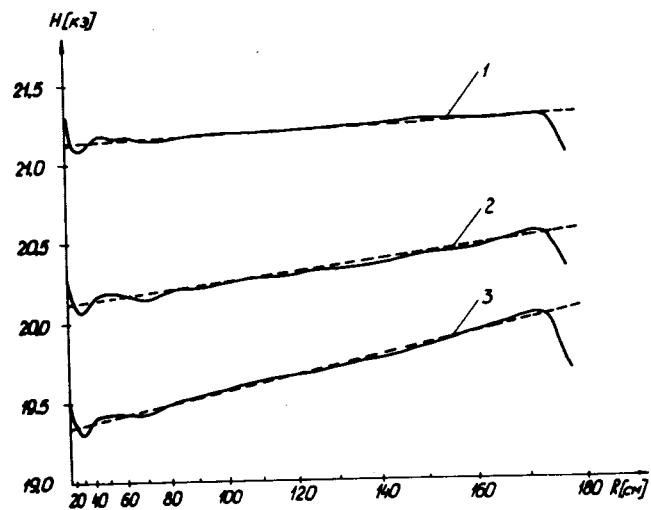


Рис.5. Распределение средних магнитных полей по радиусу для различных ионов. Кривые 1, 2, 3 для ионов с отношением $A/Z=10$, 6, 4 соответственно.

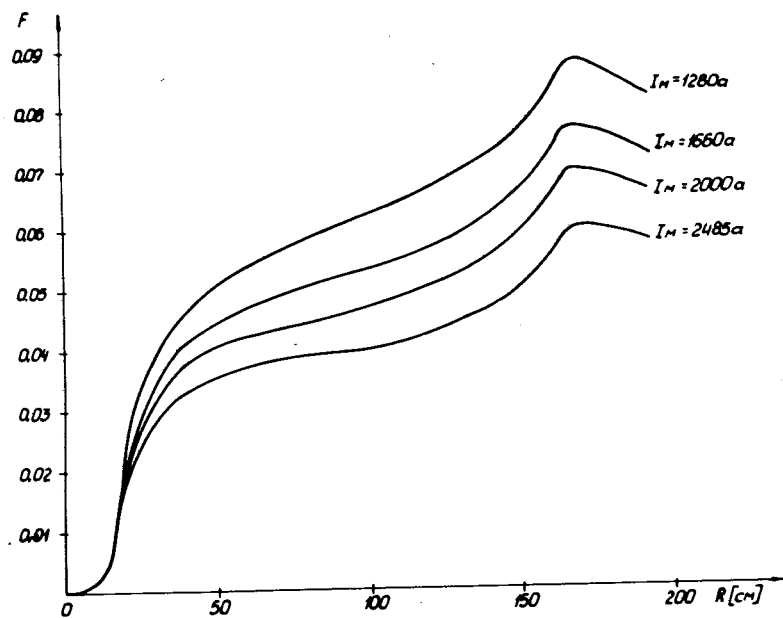


Рис.6. Флаптер магнитного поля при различных уровнях возбуждения электромагнита.

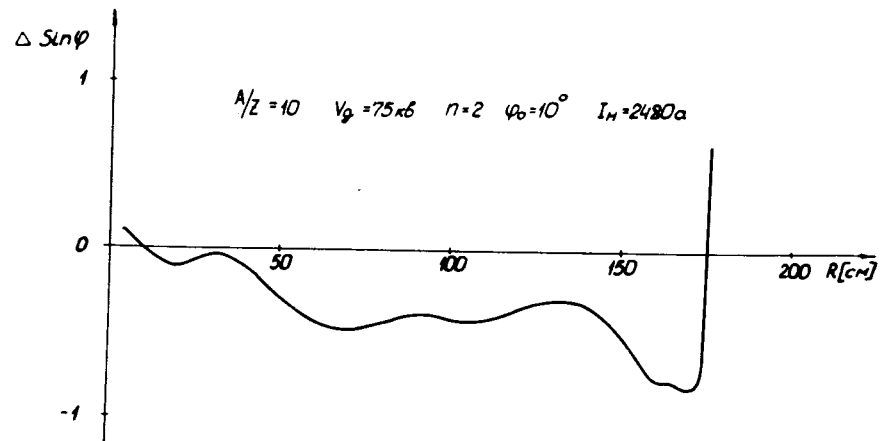


Рис.7. Фазовое движение ионов с отношением $A/Z = 10$.

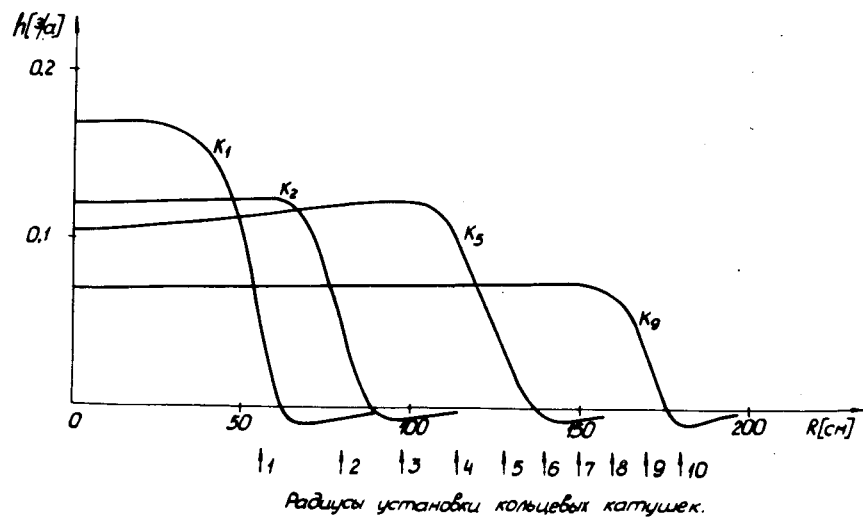


Рис.8. Относительные распределения магнитного поля по радиусу от ряда concentрических катушек / $H_0 = 21,1 \text{ кЭ/}$.

распределения среднего магнитного поля по радиусу будет осуществляться корректирующими катушками. Измеренные при уровне 21,1 кЭ распределения полей ряда этих катушек показаны на рис. 8.

Частоты радиальных ν_r и аксиальных ν_z бетатронных колебаний определялись численным решением дифференциальных уравнений^{/5/}. Зависимости $\nu_r = f_1(r)$ и $\nu_z = f_2(r)$ для ионов с $A/Z = 10$ / $H_0 = 21,1$ кЭ/ приведены на рис. 9.

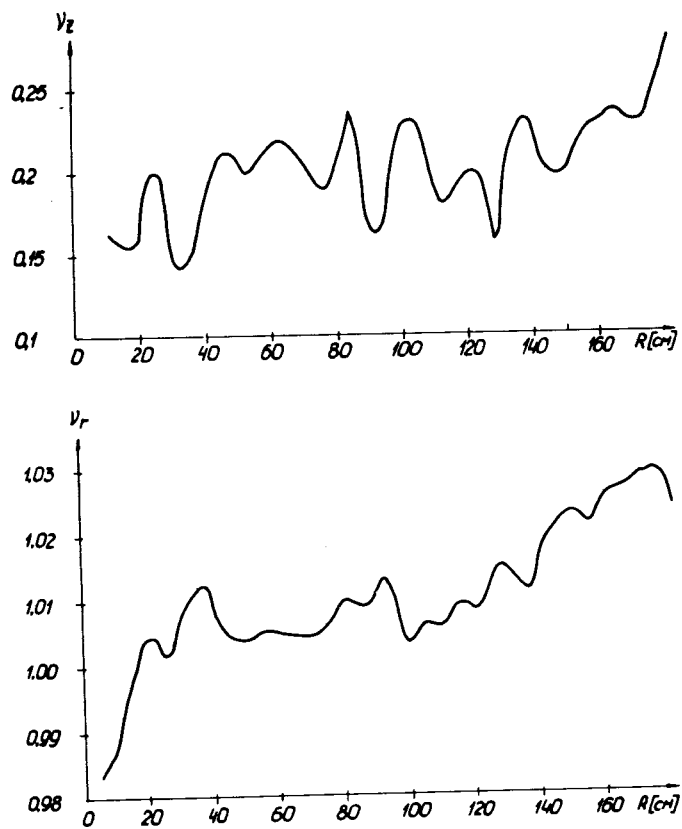


Рис.9. Зависимость частот радиальных ν_r и аксиальных ν_z колебаний от радиуса для ионов с $A/Z = 10$.

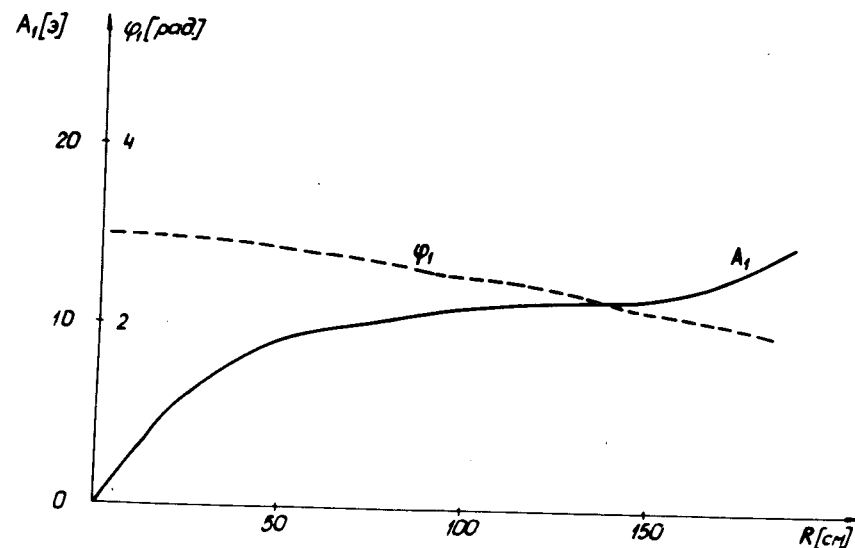


Рис.10. Зависимость амплитуды A_1 и фазы ϕ_1 первой гармоники магнитного поля от радиуса / $H_0 = 21,1$ /.

Измерения магнитного поля, проводившиеся в угловом диапазоне $0 \div 360^\circ$ с целью определения и коррекции амплитуд и фаз низших гармоник азимутальной неоднородности магнитного поля показали, что основным фактором, влияющим на возникновение низших гармоник, являются неточные изготовление и установка секторов циклотрона. Соответствующие зависимости амплитуды A_1 и фазы ϕ_1 первой гармоники магнитного поля от радиуса приведены на рис. 10. Дальнейшая компенсация азимутальных неоднородностей магнитного поля будет осуществляться системой гармонических катушек /рис. 1/.

Измерение положения медианной плоскости магнитного поля циклотрона У-400 выполнялось устройством, использующим метод магнитных весов. Измерения показали, что отклонение медианной плоскости от средней геометрической не превышает ± 3 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенной работы явилось создание электромагнита изохронного циклотрона У-400, в зазоре которого сформировано необходимое распределение магнитного поля, обеспечивающего устойчивое ускорение ионов в широком диапазоне отношений A/Z до энергии $W = 400-675 \text{ z}^2/A \text{ МэВ}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968.
2. Вейхерт Ч. и др. ОИЯИ, Р9-9939, Дубна, 1976.
3. Евдокимов А.К. и др. ОИЯИ, 9-9545, Дубна, 1976.
4. Погодин В.И., Юрьева Г.А. Датчик Холла из антимонида индия. Приборы и системы управления. 1972, 7, с. 15.
5. Коломенский А.А., Лебедев А.И. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1978 года.