

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

9-85-598

А.М. Андриянов, Г.Г. Гульбемян, Э.Л. Иванов,
А.М. Мордусев, Р.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
ЦИКЛИЧЕСКОГО ИМПЛАНТАТОРА ИЦ-100

1985

Циклический имплантатор тяжелых ионов ИЦ-100 предназначен для получения ускоренных тяжелых ионов от бора до аргона с энергией ~ 1 МэВ/нукл. и интенсивностью $10^{12} \div 10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$.

Одним из важных этапов при создании ИЦ-100 явилось формирование магнитного поля, обеспечивающего устойчивое и изохронное ускорение ионов до конечной энергии.

Поскольку имплантатор ИЦ-100 ускоряет тяжелые ионы практически с одинаковой энергией при фиксированном уровне магнитного поля, а также с целью существенного упрощения конструкции и облегчения условий его эксплуатации было решено формировать магнитное поле с помощью только железных масс без применения токовых корректирующих катушек ².

Магнитная структура ИЦ-100, подобно структуре У-200, У-200П и У-400, создается четырьмя парами секторов с прямыми границами. Для получения требуемого уровня среднего магнитного поля не ниже 19 кГс /что обеспечивает достижение необходимой энергии ионов 1 МэВ/нукл./ и выбора основных параметров магнитной структуры была создана модель электромагнита в масштабе $\sim 1:6$.

Исходный вариант магнитной структуры модели имел секторы с угловой протяженностью 45° .

Измерения, выполненные на модели, показали, что в этом случае при зазорах в холме и долине 20 мм и 110 мм соответственно уровень магнитного поля составляет 18 кГс /рис.1/. С целью получения рабочего уровня магнитного поля /не менее 19 кГс/ без увеличения ампервитков основной обмотки возбуждения и без изменения зазоров в холме и долине угловая протяженность сектора была увеличена до 56° . Флаттер магнитного поля при этом уменьшается всего на 5%, что несущественно с точки зрения вертикальной устойчивости ионов. Полученное распределение среднего магнитного поля по радиусу показано на рис.1.

Увеличение угловой протяженности секторов уменьшает угловую протяженность дуантов, размещенных в двух противоположных долях, до 34° , что приводит к уменьшению набора энергии за оборот

на $7/$ /эффективное ускоряющее напряжение $U_{\text{эф}} = 4 U_{\text{г}} \sin \frac{n\theta_{\text{г}}}{2}$,

где $U_{\text{г}}$ - амплитудное значение ускоряющего напряжения, $\theta_{\text{г}}$ - угловая протяженность дуантов, n - номер гармоники ускорения/. В нашем случае это вполне допустимо.

Для обеспечения необходимого подъема поля на конечных радиусах края секторов были выполнены с фаской. Наибольший вклад фас-

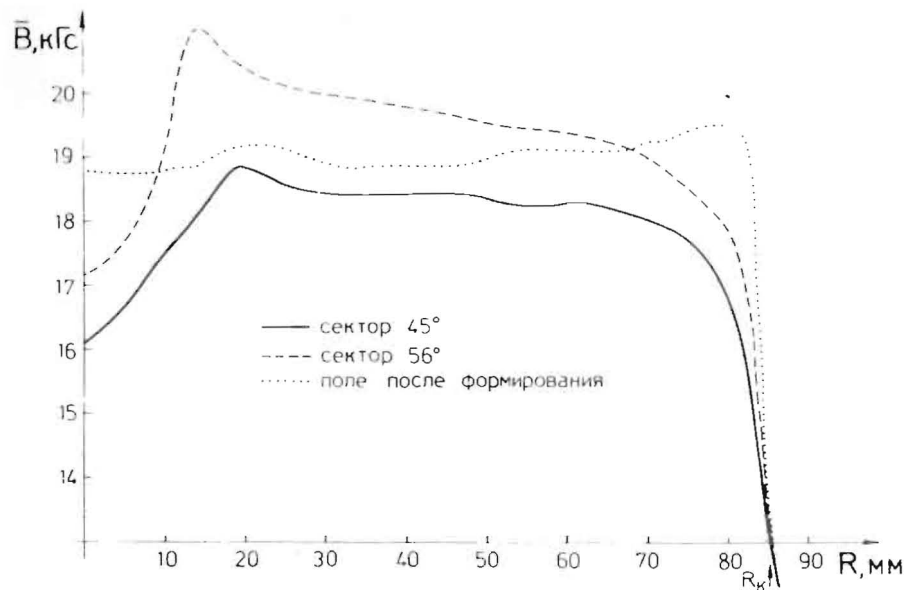


Рис.1. Распределение среднего магнитного поля по радиусу на модели ИЦ-100.

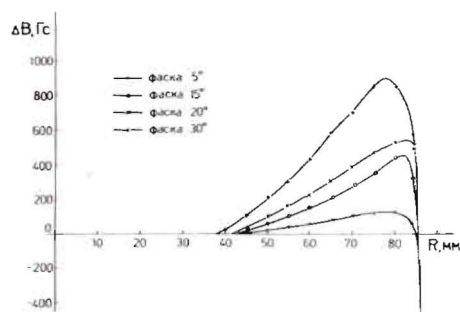


Рис.2. Вклад фаски на краю сектора в уровень среднего магнитного поля на конечных радиусах.

ка дает вблизи края сектора, т.е. там, где это наиболее необходимо /рис.2/.

Результаты модельных измерений были положены в основу при формировании магнитного поля циклического имплантатора ИЦ-100. Эта работа велась одновременно по двум независимым направлениям: первое - формирование поля в центральной области, второе - формирование поля в рабочей области ускоренных ионов.

Для исследования движения ионов в центре ИЦ-100 использовалась программа CENTR. Горизонтальная компонента электрического поля в ускоряющем зазоре представлена в форме гауссового распределения, магнитное поле задавалось в виде карты поля, а численное интегрирование уравнений движения проводилось мето-

дом Рунге-Кутты 4-го порядка ^{1/3}. Для расчета были выбраны следующие исходные данные:

ускоряемая частица A/Z	- 5,71
номер гармоники ускоряющего напряжения	- 4
величина среднего магнитного поля \bar{B}	- 19,2 кГс
амплитуда напряжения на дуанте U_g	- 50 кВ
угловая протяженность дуантов θ_R	- 34°
зазор источник-пуллер G	- 4 мм
величина ускоряющего зазора GD	- 10 мм
апертура дуантов HDD	- 20 мм
радиус установки источника $R_{ист}$	- 40 мм

В варианте плоскопараллельной конфигурации центра ИЦ-100 /подобно циклотрону У-400/ при апертуре дуантов 20 мм и пробойном напряжении по направлению магнитного поля 25 кВ/см воздушный зазор между полюсами должен быть не менее 80 мм. Такой зазор не обеспечивает заданного уровня среднего магнитного поля. Поэтому было решено продлить периодическую секторную структуру почти до самого центра, а среднее магнитное поле на первых оборотах формировать не по радиусу, как это делается обычно, а по орбите частицы. Таким образом, в отличие от циклотронов У-200 и У-400, где воздействие секторов на движение иона проявляется только через полтора-два оборота, на ИЦ-100 формирование радиального и аксиального движения в секторной структуре начинается на первом же этапе ускорения.

При ускорении ионов на четвертой гармонике фазовое движение /фазовый захват/ очень сильно зависит от азимутального положения источника ионов. Расчеты показали, что оптимальное по фазовому движению и, следовательно, по набору энергии азимутальное положение источника составляет 20° относительно оси дуантов. При этом в ускорение захватывается диапазон стартовых фаз $\Delta\phi_{ст} \sim 25^\circ$. В нашем случае центр вертикального отверстия под ионный источник диаметром 47 мм расположен почти на оси сектора.

Ускорение на четвертой гармонике предполагает синфазное возбуждение дуантов. Проще всего это можно сделать, соединив дуанты жесткой перемычкой через центр циклотрона. Для этого была выполнена проточка по оси дуантов шириной 35 мм с общим зазором в долине 110 мм.

Таким образом, засверловкой отверстия под ионный источник и проточкой под перемычку из центра циклотрона было удалено довольно значительное количество железных масс, что, однако, не повлияло на величину среднего поля по орбите иона, а также на форму орбиты на первом обороте и на характер фазового движения.

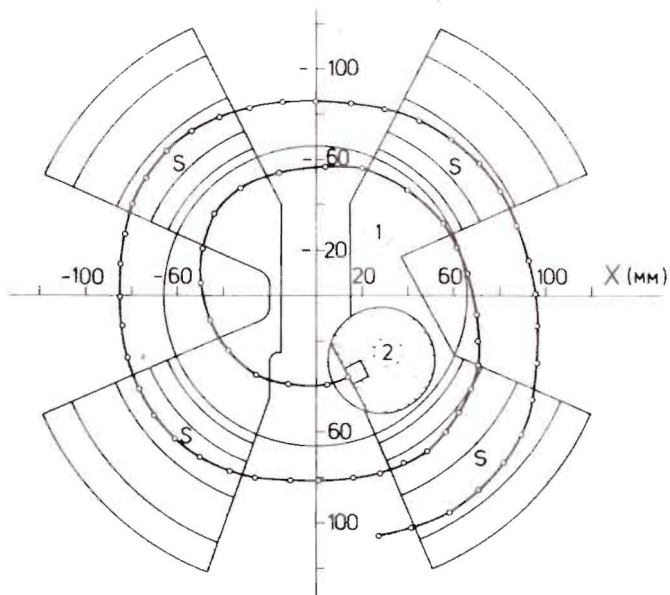


Рис.3. Центральная область ИЦ-100 в плане и траектория иона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на первых оборотах. $B = 19,2$ кГс, $R_{\text{ист}} = R_{\text{пулл}} = 40$ мм, $U_g = 50$ кВ. 1 - съемная центральная накладка диаметром 130 мм, 2 - вертикальный ионный источник.

Это объясняется тем, что частица уходит из довольно сложной магнитной структуры центра, сделав всего только $3/4$ оборота. Далее ускорение продолжается в тщательно сформированной периодической магнитной структуре. Геометрия центральной области ИЦ-100 в плане и траектория иона на первых двух оборотах показаны на рис.3.

Набор энергии за оборот для центральной стартовой фазы составляет $0,91 E_{\text{макс}}$. Фазовое движение на первых двух оборотах показано на рис.4.

В качестве одной из определяющих характеристик при выборе геометрии центральной области рассматривалось аксиальное движение ускоряющего иона.

В нашем случае ионы на первых же сантиметрах движения испытывают фокусирующее воздействие электрического поля и краевого поля секторов. Фокусирующее действие краевого поля оказывается гораздо сильнее, чем действие электрического поля, и является определяющим для величины амплитуды вертикальных колебаний. Проведенные расчеты показали, что амплитуда вертикальных колебаний, полученная при прохождении первого, по пути движения иона, сектора, не уменьшается в течение нескольких оборотов, пока ионы не приобретут достигнутую энергию.

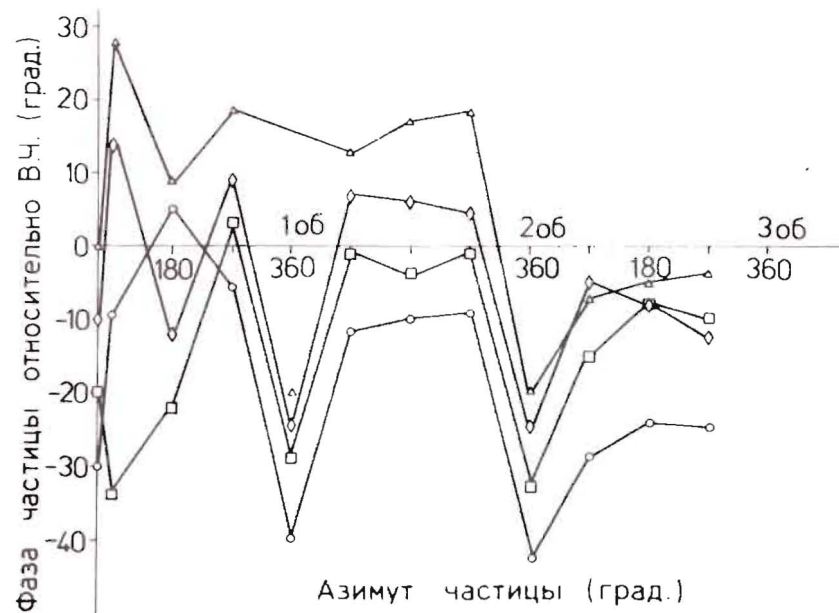


Рис.4. Фазовое движение иона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на первых оборотах.

Исследование характера аксиального движения в зависимости от угла поворота источника (γ) вокруг своей оси ^{13/} показало, что разворот источника наружу ($\gamma > 0$) приводит к резкому увеличению амплитуды вертикальных колебаний вследствие сильного фокусирующего действия первой границы сектора. Разворот же источника внутрь ($\gamma < 0$) приводит к уменьшению фокусирующего действия первой по пути движения границы сектора и удовлетворительному аксиальному движению на последующих этапах ускорения. Диапазон стартовых фаз, захваченных в ускорение, расширяется при этом до $\Delta\phi_{\text{ст}} = -70^\circ \div -10^\circ$. Для нулевого положения источника ($\gamma = 0$) $\Delta\phi_{\text{ст}} = -20^\circ \div 0^\circ$ /рис.5/.

Формирование магнитного поля в основной рабочей области ускорения ионов осуществлялось, подобно циклотрону У-400, комбинированным способом.

Грубое шиммирование магнитного поля было осуществлено по результатам модельных измерений кольцевыми шиммами, выполненными на внутренней поверхности секторов.

Тонкое шиммирование осуществлялось изменением угловой протяженности сектора путем профилирования съемной боковой накладки. Первоначально был определен вклад в среднее поле одного миллиметра толщины накладки /рис.6/, что позволило определить окончательную конфигурацию бокового профиля сектора. Профиль выполнен в форме ступенек радиальной протяженностью $3 \div 11$ мм /всего 64 ступеньки/, точность выполнения составляет $\pm 0,1$ мм.

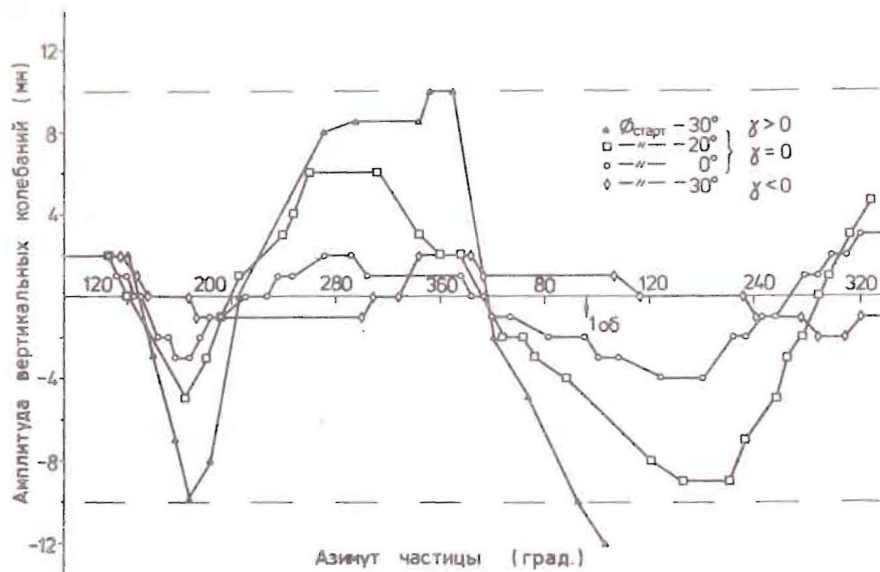


Рис. 5. Аксиальное движение иона $^{40}\text{Ag}^{7+}$ на первых оборотах.

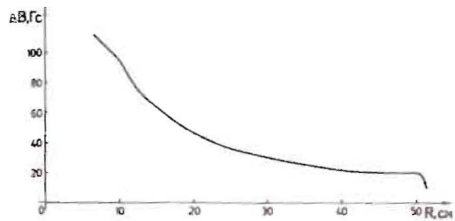


Рис. 6. Вклад одного миллиметра угловой протяженности секторов в среднее магнитное поле.

Измерение поля осуществлялось датчиком Холла из антимолибдита индия, закрепленным на штанге. Радиальное перемещение датчика с шагом $10 \pm 0,5$ мм производилось вручную, а его азимутальное перемещение с шагом $1,875^\circ / 48$ точек на элементе периодичности/осуществлялось автоматически с помощью бесстаторного двигателя, работающего в рассеянном магнитном поле. Данные ЭДС Холла записывались на перфоленту с последующей обработкой на ЭВМ.

Радиальное распределение среднего магнитного поля представлено на рис. 7. Оно отличается от изохронного во всей рабочей области не более, чем на 10 Гс, что обеспечивает малый фазовый сдвиг ионов в процессе ускорения /рис. 8/.

Распределение флаттера магнитного поля дано на рис. 9. Как видно из рисунка, уже начиная с малых радиусов /радиус первого оборота равен 80 мм/ обеспечивается жесткая магнитная фокусировка, и значение v_x во всей рабочей области составляет $0,3 \pm 0,35$.

$\bar{B}, \text{Гс}$

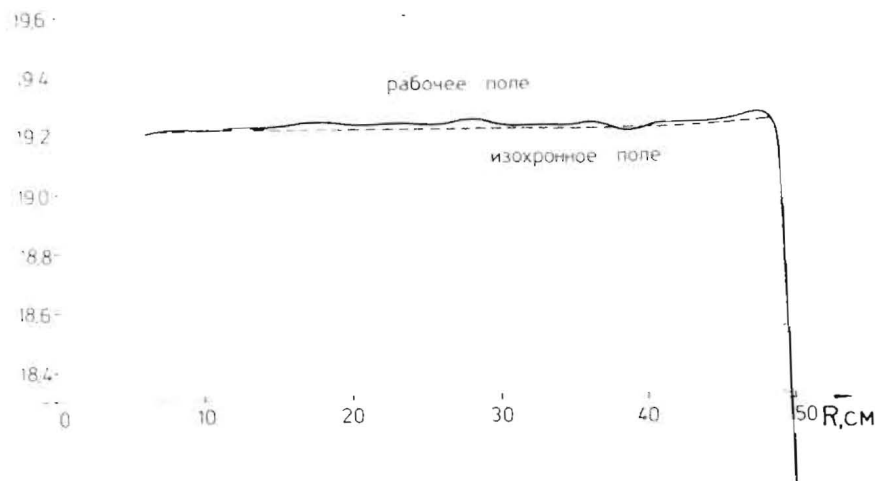


Рис. 7. Радиальное распределение среднего магнитного поля ИЦ-100.

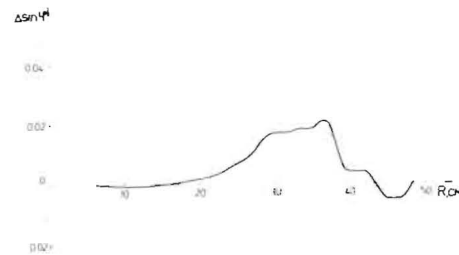


Рис. 8. Расчетная зависимость фазового сдвига ускоренных ионов от радиуса в ИЦ-100.

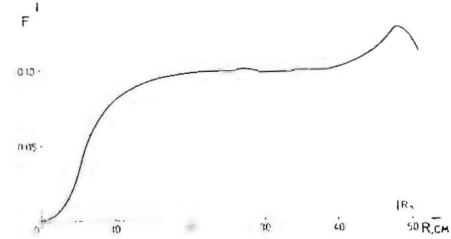


Рис. 9. Радиальное распределение флаттера магнитного поля.

Первая гармоника поля ~ 10 Гс, что не приводит к заметной децентровке пучка из-за небольшого количества оборотов, совершаемых пучком /максимальное число оборотов равно 50/.

Запуск имплантатора, проведенный в мае 1985 года, показал, что сформированное магнитное поле обеспечивает устойчивое и изохронное ускорение ионов во всей рабочей области. Получены пучки ионов $^{12}\text{C}^{2+}$ и $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на конечном радиусе с интенсивностями $7,0 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ и $9 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

В заключение авторы выражают благодарность В.М.Морозову и С.В.Пашенко за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриянов А.М. и др. ОИЯИ, 9-85-532, Дубна, 1985.
2. Hendry G.O. et al. In: Proceedings of 9th Int.Conf.on Cyclotrons and their Application, Caen, France, 1981, p.125.
3. Гульбемян Г.Г. и др. ОИЯИ, Р9-80-549, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 августа 1985 года

Андриянов А.М. и др.

9-85-598

Магнитное поле циклического имплантатора ИЦ-100

В работе приводятся экспериментальные результаты по моделированию и формированию магнитного поля циклического имплантатора ИЦ-100, а также расчетные характеристики движения ионов в центральной области. Имплантатор имеет четырехсекторную магнитную структуру, уровень среднего магнитного поля составляет 19,2 кГс. Сформированное только с помощью железных масс магнитное поле отличается от изохронного на величину, не превышающую 10 Гс. Оно позволяет обеспечить устойчивое и изохронное ускорение ионов $A/Z = 5,4 \div 5,7$ до энергии $E = 40 \frac{Z^2}{A^2}$ МэВ/нукл.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Andriyanov A.M. et al.

9-85-598

Magnetic Field of IC-100 Cyclic Implantator

The experimental results of modelling and forming the magnetic field of IC-100 cyclic implantator are presented. The ion motion calculated characteristics for the central region are also given. The implantator has a four-sector magnetic structure. The average magnetic field is formed at 19.2 kG level. The magnetic field was shaped with iron mass only, and it differs from isochronous fields by not more than 10 G. This allows one to accelerate ions with the mass-to-charge ratio $A/Z = 5.4 \div 5.7$ up to $E = 40 \frac{Z^2}{A^2}$ MeV/nucl.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985