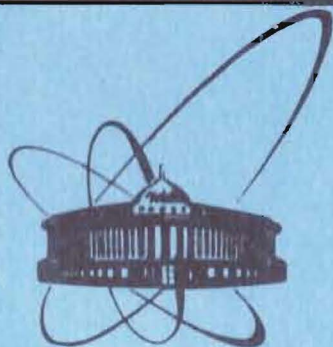


85-532



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

9-85-532

А.М.Андриянов, С.Л.Богомолов, В.В.Болтушкин,  
П.Г.Бондаренко, Буй Бинь Тхуан, Г.Г.Гульбекян,  
А.И.Иваненко, Э.Л.Иванов, Ю.А.Иванов, Б.А.Кленин,  
И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Е.А.Минин, А.М.Мордуев,  
Р.Ц.Оганесян, С.В.Пашенко, В.А.Чугреев,  
Б.В.Фефилов

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИМПЛАНТАТОР  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100

Направлено на Международное совещание  
по циклотронам /Бехин, ЧССР, июнь 1985 г./

1985



Ускоренные пучки тяжелых ионов вследствие своей уникальности /удельные потери энергии тяжелых ионов в сотни раз выше удельных потерь для легких частиц/ являются прекрасным инструментом для исследований в целом ряде научных и прикладных направлений. Благодаря этим свойствам тяжелых ионов возникает возможность их применения во многих перспективных областях науки и техники <sup>1,2/</sup>. Поэтому в течение последних 10 лет в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, наряду с работами по синтезу новых элементов и экзотических ядер, изучению механизма ядерных реакций на циклотронах тяжелых ионов У-300 и У-400, велись работы по этим направлениям. Физические эксперименты требуют получения тяжелых ионов с энергиями 5-10 МэВ/нуклон, что приводит к необходимости как создания ускорителей сложных конструкций /габариты, вес, мощность питания и т.д./, так и усложненной радиационной обстановки. Вместе с тем, для большинства перечисленных научно-прикладных направлений достаточно иметь тяжелые ионы с энергией 1-2 МэВ/нуклон, что существенно облегчает задачу. За последние 3 года эти исследования настолько развились, что возникла мысль о создании специализированного ускорителя, позволяющего проводить систематические работы во всех трех указанных направлениях. Исходя из возможностей существующих ионных источников, а также опыта в создании циклотронов тяжелых ионов нами выбран ускоритель циклотронного типа - циклический имплантатор ИЦ-100. ИЦ-100 предназначен для получения тяжелых ионов с отношением  $\frac{A}{Z} = 5,4 \div 5,7$  до энергии  $E = 40 \frac{Z^2}{A^2}$  МэВ/нуклон. Основными частицей при использовании дугового источника являются ионы  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  с энергией 1,2 МэВ/нуклон и интенсивностью  $10^{12} \text{ с}^{-1}$  /возможно ускорение ионов от  $^{11}\text{B}$  до  $^{40}\text{Ar}$  с энергиями 1-1,2 МэВ/нуклон и интенсивностями  $10^{12} \div 10^{13} \text{ с}^{-1}$ . Применение лазерного источника даст возможность получения ионов  $^{56}\text{Fe}^{10+}$  с энергией 1,2 МэВ/нуклон и интенсивностью  $10^{11} \text{ с}^{-1}$ . Ниже приводятся параметры циклического имплантатора ИЦ-100 и дается описание его основных узлов и систем.

#### ЭЛЕКТРОМАГНИТ И МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА

В качестве электромагнита для ИЦ-100 выбран серийный электромагнит типа СП-57 с номинальным значением  $IW = 150000 \text{ А вит}$ . Его полюсный наконечник диаметром 900 мм заменен на диск диа-

метром 1050 мм, который одновременно служит крышкой вакуумной камеры. Для получения необходимого энергетического параметра  $K = 40$  при значении конечного радиуса 47 см  $R_k = 0,89 R_n /$  величина магнитного поля должна составлять 19,2 кГс. Был также проанализирован вариант использования в качестве циклического имплантатора классического циклотрона. Расчетным путем показано, что для получения необходимой энергии ионов напряжение на каждом дуанте угловой протяженностью  $180^\circ$  должно составлять ~70 кВ, что требует величины воздушного зазора ~150 мм. При таком зазоре уровень магнитного поля, соответствующий номинальному току электромагнита СП-57, составит ~12 кГс, что не обеспечивает получения необходимой энергии ионов (~1 МэВ/нуклон). Поэтому в качестве рабочего варианта был выбран изохронный циклотрон. Магнитная структура ИЦ-100, подобно структуре У-200, У-200П и У-400, создается четырьмя парами секторов с прямыми границами. Поскольку ИЦ-100 будет ускорять тяжелые ионы практически с фиксированной энергией (~1 МэВ/нуклон) при фиксированном уровне магнитного поля, а также с целью упрощения конструкции циклотрона и условий его эксплуатации было решено формировать магнитное поле с помощью железных масс без использования токовых корректирующих катушек. Для получения требуемого уровня среднего магнитного поля и выбора основных параметров магнитной структуры была создана модель электромагнита в масштабе ~1:6. Измерения, выполненные на модели, показали, что при угловой протяженности сектора  $45^\circ$  и зазорах в холме и долине 20 мм и 110 мм соответственно уровень магнитного поля составляет 18 кГс. С целью получения рабочего уровня магнитного поля /не менее 19 кГс/ без увеличения ампер-витков основной обмотки возбуждения угловая протяженность сектора была увеличена до  $56^\circ$ , а для подъема поля в районе конечного радиуса профиль края сектора выполнен с фаской  $20^\circ$ .

Формирование магнитного поля в рабочей области ускорения ионов осуществлялось, подобно циклотрону У-400, кольцевыми шиммами, выполненными на внутренней поверхности секторов, а также изменением профиля их боковой границы. Измерение поля осуществлялось датчиком Холла из антимонида индия, закрепленным на штанге. Радиальное перемещение датчика с шагом  $10 \pm 0,5 \text{ мм}$  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 перфоленду с последующей обработкой на ЭВМ.

Радиальное распределение среднего магнитного поля представлено на рис.1. Оно отличается от изохронного во всей рабочей области не более чем на 10 кГс, что обеспечивает малый фазовый сдвиг ионов в процессе ускорения /величина  $\Delta \sin \phi$  не превосходит 0,05/.

Библиотечный штамп:  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА



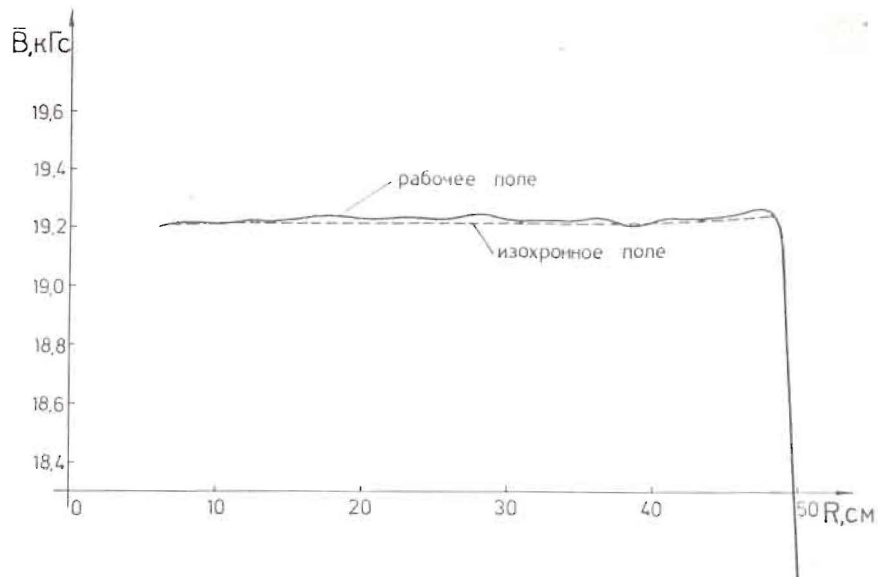


Рис.1. Радиальное распределение сформированного среднего магнитного поля.

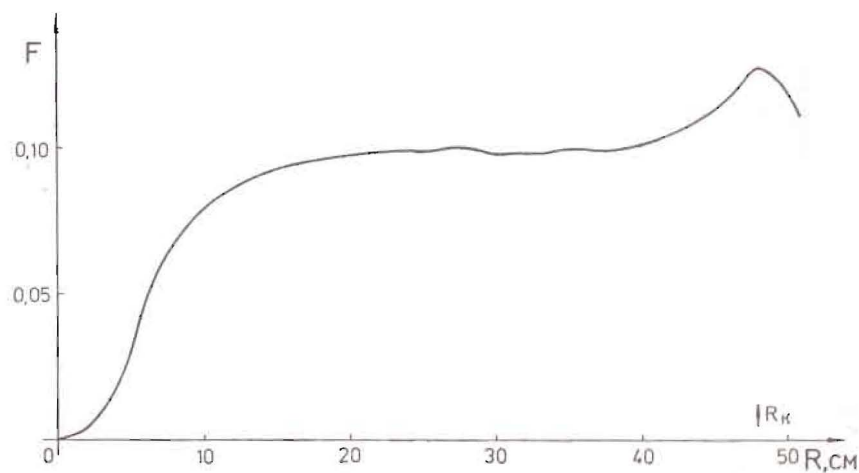


Рис.2. Зависимость флаттера магнитного поля от радиуса.

Распределение флаттера магнитного поля дано на рис.2. Как видно из рисунка, уже начиная с малых радиусов /радиус первого оборота иона равен 8 см/ обеспечивается жесткая магнитная фокусировка, и значение  $\nu_z$  во всей рабочей области составляет  $0,3 \pm 0,35$ .

## ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

Высокочастотная система ИЦ-100 представляет собой два контура, каждый из которых состоит из четвертьволновой коаксиальной линии, закороченной на одном конце и нагруженной емкостью дуанта угловой протяженностью  $34^\circ$  на другом. Дуанты размещены в двух противоположных долинах. Ускорение ионов осуществляется на четвертой гармонике частоты обращения. Использование четвертой гармоники позволяет, во-первых, наиболее оптимально осуществить связь дуантов в центре, во-вторых, обеспечить максимальный прирост энергии за оборот ( $\Delta E = 4 \frac{Z}{A} U_d \sin \frac{n\psi}{2}$ , где  $U_d$  - напряжение на дуанте,  $n$  - номер гармоники,  $\psi$  - угловая протяженность дуанта/. Напряжение на каждом дуанте должно составлять 50 кВ, частота ускоряющего напряжения для иона  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  /основная ускоряемая частица/ - 20,5 МГц. Грубая перестройка частоты резонансной системы осуществляется закорачивающей пластиной, которая не имеет прижимных контактов и соединена с баком и штоком посредством полос из медной фольги толщиной 0,3 мм. Эти полосы позволяют перемещать пластину в пределах  $\pm 50$  мм от нейтрального положения. Для плавной перестройки частоты используется триммер. Основные геометрические характеристики высокочастотной системы представлены в табл.1.

Таблица 1

Угловая протяженность дуанта	$34^\circ$
Высота дуанта	47 мм
Вертикальный зазор дуанта - плакировка	30 мм
Минимальный горизонтальный зазор дуант - плакировка	10 мм
Длина резонансного бака	1080 мм
Диаметр резонансного бака	800 мм
Диаметр штока	100 мм
Ход закорачивающей пластины	100 мм

Измерения, выполненные на реальном ВЧ-резонаторе, показали, что он имеет добротность 4700 и обеспечивает получение частотного диапазона  $20,2 \pm 20,9$  МГц /перестройка частоты закорачивающей пластиной и триммером составляет 3% и 0,5% соответственно/. Питание резонаторов осуществляется от типового ВЧ-генератора мощностью 25 кВт и частотным диапазоном  $3 \pm 24$  МГц. Генератор связан с резонаторами коаксиальной фидерной линией с волновым сопротивлением 130 Ом.

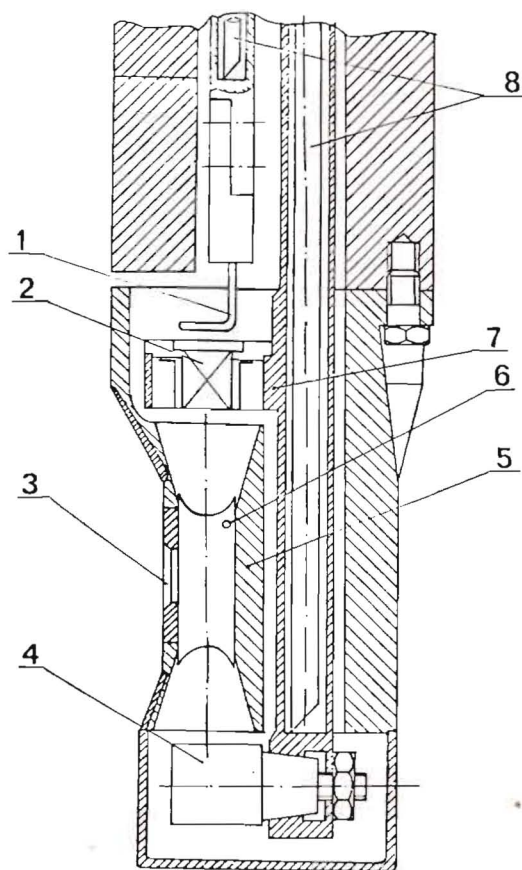


Рис.3. Основные элементы конструкции источника ионов ИЦ-100. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - эмиссионная щель, 4 - антикатод, 5 - газоразрядная камера /анод/, 6 - канал напуска рабочего газа, 7 - держатель катода и антикатада, 8 - каналы охлаждения держателя нити и катодов.

#### ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Для ИЦ-100 используется вертикальный ионный источник дугового типа, разработанный для циклотрона У-200 [3]. Основные элементы конструкции этого источника приведены на рис.3. В табл.2 даны результаты по выходу ионов Ne и Ar из источника, полученные в стендовых исследованиях.

Таблица 2

Рабочий газ	Интенсивность, $c^{-1}$							
	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Ne	$3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$			
Ar	$1 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{13}$ *	$1,5 \cdot 10^{13}$

\* Результаты получены при использовании танталового катода и антикатада. При оптимальном режиме разряда источника с вольфрамовым катодом интенсивность ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  в 3 раза ниже указанной.

Эксперименты, выполненные на циклотроне У-200, показали, что источник обеспечивает получение на радиусе 50 см /область конечного радиуса ИЦ-100/ ускоренного пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  с интенсивностью  $2 \cdot 10^{12} c^{-1}$ .

Наличие аксиального отверстия в верхней балке и полюсе электромагнита ИЦ-100 позволяет осуществить внешнюю инжекцию пучка в центральную область [4]. Такая система даст возможность, с одной стороны, увеличить интенсивность пучка при использовании существующего дугового источника /улучшение условий фазового захвата пучка и уменьшение давления в вакуумной камере/, с другой стороны, - расширить диапазон ускоряемых ионов за счет применения ионных источников новых типов /ECR, лазерный и др./

#### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Как известно, при ускорении тяжелых ионов происходит их потеря из-за обдирки на остаточном газе в вакуумной камере. Величина потерь может быть оценена по формуле  $N/N_0 = \exp[-(3,54 \cdot 10^{16} \cdot \sigma \cdot p \cdot L)]$ , где  $N_0$  и  $N$  - начальное и конечное число ионов,  $\sigma$  - сечение обдирки,  $p$  - давление в камере,  $L$  - длина пути, проходимого ионом. Для обеспечения 70% прохождения пучка ускоренных ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  при длине пути 63 м и сечении обдирки  $4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$  необходимое рабочее давление в камере ускорителя ИЦ-100 должно быть  $4 \cdot 10^{-6} \text{ Тор}$ . Вакуумный объем ИЦ-100 состоит из восьмигранной камеры, выполненной из дюралюминия, к которой присоединены два резонансных бака. Газовая нагрузка вакуумной системы складывается из внешнего натекания, газоотделения с внутренних поверхностей, количества газа, подаваемого в ионный источник, и составляет  $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ л} \cdot \text{Тор} \cdot \text{с}^{-1}$ . Необходимая скорость откачки рассчитывается по формуле  $V = \frac{Q}{p \cdot k}$  /где  $Q$  - величина газовой нагрузки,  $p$  - рабочее давление,  $k$  - коэффициент проводимости/ и равняется  $3500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ . Для реализации расчетных значений средств откачки ИЦ-100 выбран один диффузионный агрегат ВА-8-7, установленный на вакуумной камере, и два агрегата АВП-2 - на резонансных баках. Параметры вакуумных агрегатов приведены в табл.3.

Распределение давления по радиусу в вакуумной камере ИЦ-100, измеренное при различных газовых потоках, подаваемых в ионный источник, представлено на рис.4. Как видно из рисунка, без ионного источника / $Q = 0$ / давление в камере составляет  $\sim 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Тор}$ . При работе дугового источника с расходом рабочего газа  $Q = 0,4 \div 0,5 \text{ см}^3 \text{ мин}^{-1}$  система высоковакуумной откачки обеспечит среднее давление в камере ИЦ-100  $4 \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ Тор}$ .



Таблица 3

Тип насосов	ВА-8-7	АВЛ-2
Предельное давление, Тор	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Скорость откачки, л с <sup>-1</sup>	4000	500
Потребляемая мощность, Вт:		
основного насоса	2400	1800
вспомогательного насоса	2100	
Расход воды, л ч <sup>-1</sup>	300	150

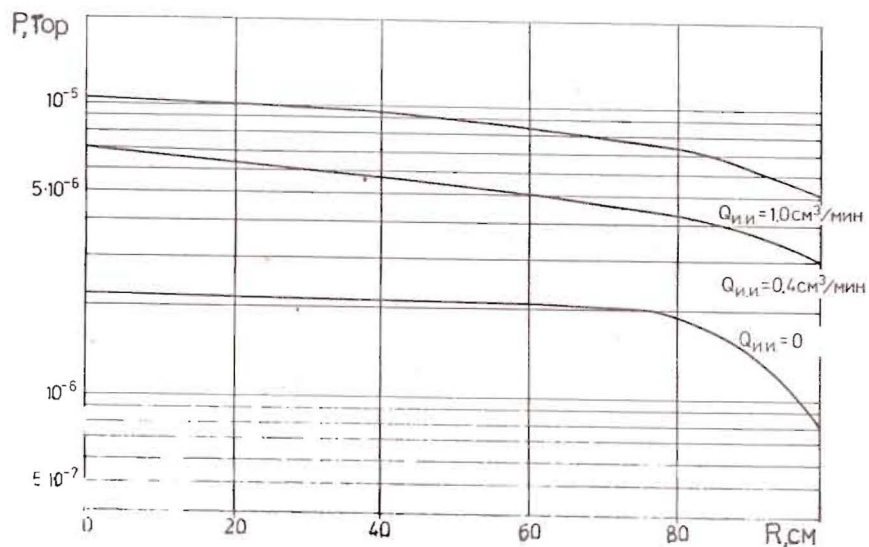
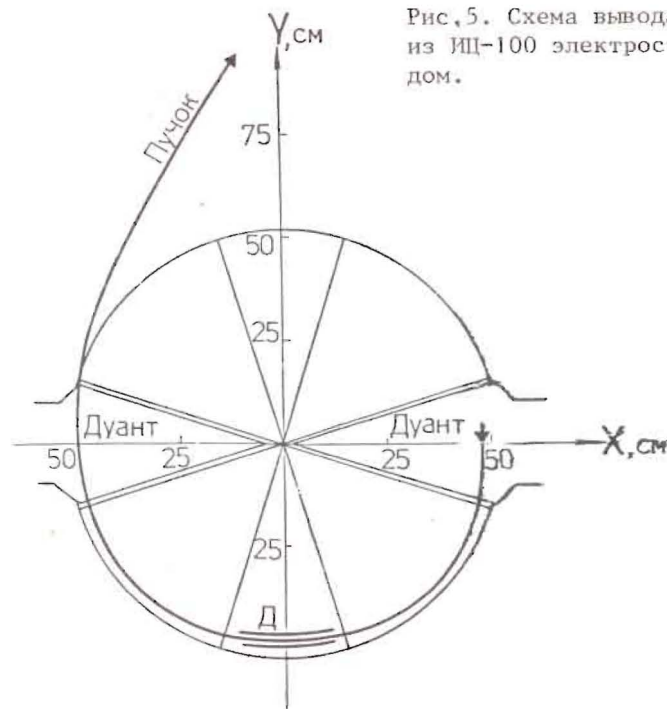


Рис.4. Радиальное распределение давления в вакуумной камере ИЦ-100, измеренное при различном количестве газа, подаваемого в ионный источник.

#### СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА

Вывод пучка ускоренных ионов из ИЦ-100 будет осуществляться электростатическим полем дефлектора, имеющего угловую протяженность  $28^\circ$  и расположенного в долине. Численное моделирование

Рис.5. Схема вывода ускоренных ионов из ИЦ-100 электростатическим методом.



вывода пучка осуществлялось на ЭВМ решением уравнений движения ионов в электрическом и реальном магнитном полях. Схема вывода представлена на рис.5. При выводе пучка с радиусом ускорения  $47 \div 47,5$  см требуемое напряжение на потенциальной пластине дефлектора  $40 \div 30$  кВ. Так как дефлектор расположен в области практически однородного магнитного поля, которое не приводит к радиальной дефокусировке пучка, то профиль потенциальной и заземленной пластин выбран плоским. Разделение орбит в районе конечного радиуса ускорения составляет  $\sim 6$  мм, что позволит вывести пучок с эффективностью не менее 50%.

В качестве дополнительного метода вывода может быть использован метод обдирки, однако его эффективность из-за сравнительно малой энергии ускоренных ионов ( $\sim 1$  МэВ/нуклон) будет  $\sim 20\%$ .

#### РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

В связи с тем, что энергия ускоренных ионов циклического имплантатора ИЦ-100, составляющая  $\sim 1$  МэВ/нуклон, существенно меньше кулоновского барьера реакций на различных мишенях, при его работе наведенное радиоактивное излучение отсутствует. Поэтому имплантатор размещается в обычном помещении без биологиче-

ской защиты. Единственным источником излучения является рентгеновское излучение с  $E_{\gamma} \leq 50$  кэВ, возникающее при пробоях ВЧ-напряжения с дуантов. Расчеты показывают, что для его полного поглощения достаточно внешнюю поверхность вакуумной камеры покрыть листовым свинцом толщиной  $\sim 1$  мм.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время изготовлены узлы и системы ИЦ-100 и ведется сборка имплантатора. В процессе пусконаладочных работ будут уточнены и скорректированы его параметры, полученные расчетным и модельным путем. На первом этапе пуска планируется получить внутренний пучок ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  с энергией 1 МэВ/нуклон и интенсивностью  $5 \cdot 10^{11} \text{с}^{-1}$ .

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флерову за постановку задачи и постоянное внимание на всех этапах выполнения этой работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. Вестник АН СССР, 1984, № 4, с.35-49.
2. Берени Д. ЭЧАЯ, 1979, т.10, в.2, с.356-376.
3. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
4. Ruckewaert G.H. Proc. of the IX Int.Conf. on Cyclotrons and their Applications. Caen, France, 1981, p.241.
5. Кутнер В.Б. ОИЯИ, P9-81-139, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 июня 1985 года.

Андрянов А.М. и др.  
Циклический имплантатор тяжелых ионов ИЦ-100

9-85-532

В Лаборатории ядерных реакций завершается создание циклического имплантатора тяжелых ионов /ИЦ-100/. Имплантатор представляет собой четырехсекторный изохронный циклотрон, предназначенный для получения пучков тяжелых ионов с энергией 1 МэВ/нуклон. В работе приведены параметры имплантатора, а также дано описание его основных узлов и систем.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Andrianov A.M. et al.  
ITs-100 Heavy Ion Cyclic Implantator

9-85-532

The creation of heavy ion cycle implantator has been completed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. This is a four-sector isochronous cyclotron intended for acceleration of heavy ions upto 1 MeV/nucleon energy. The parameters of implantator are given, and principal units are described.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985