

## РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ У-400 - У-400М

Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Андриянов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекия,  
А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер,  
В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чутреев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Исследования, проводимые на ускоренных пучках тяжелых ионов, позволяют решить большой круг крупномасштабных научных и прикладных задач. В Лаборатории ядерных реакций в течение последних 25 лет ведутся разработки циклотронного способа ускорения тяжелых частиц. В настоящее время здесь действует четыре ускорительные установки: классический циклотрон У-300 /1/, изохронные - У-200 /2/, У-400 /3/ и запущенный в 1985 году - специализированный циклотрон ИЦ-100 /4/. Эти ускорители позволяют получать широкий диапазон ионов с массой  $A=3+140$  и энергиями 0,5+20 МэВ/н. Однако требования современных физических программы исследований на пучках тяжелых ионов включают в себя как увеличение энергии ускоряемых частиц до 100+200 МэВ/н, так и расширение диапазона масс ускоряемых частиц практически всех элементов периодической системы.

К циклотронным установкам, нацеленным на ускорение тяжелых ионов до энергии 100 МэВ/н, можно отнести GANIL (Франция) /5/, представляющую комплекс из трех последовательно работающих циклотронов, два сверхпроводящих циклотрона в Мичигане (США) /6/. Такая каскадная схема ускорения тяжелых ионов была впервые испытана в ЛЯР ОИЯИ в 1971 году на тандеме циклотронов У-300 - У-200 /7/. Создание ускорительного комплекса ЛЯР У-400 - У-400М, проект которого был представлен несколько лет назад /8/, позволит решить задачу получения пучков ионов от He до U с энергией 120+20 МэВ/н и интенсивностью до  $10^{12}$  ч/с.

В настоящем докладе представлено современное состояние работ по исследованию и сооружению тандема циклотронов У-400 - У-400М. Схема установки представлена на рис.1.

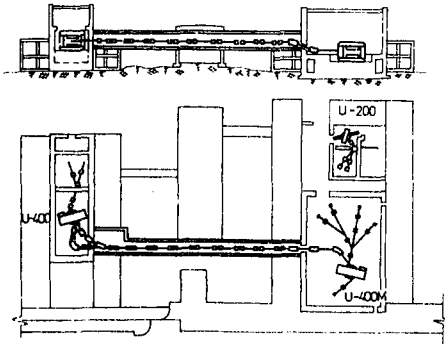


Рис.1. Схема ускорительного комплекса ЛЯР У-400 - У-400М.

Инжектором ускорительного комплекса является изохронный циклотрон У-400 с параметрами ускоренных пучков, представленными в таблице 1. Вывод пучков осуществляется методом обдирки частиц на тонкой мишени. Для перевода циклотрона У-400 в инжекторный режим работы потребуется внести ряд изменений. Анализ показал, что для получения ионов на ускорительном комплексе с указанными энергиями циклотрон У-400 должен ускорять пучки ионов с  $A/Z = 16+25$  до энергии 1+2 МэВ/н. Используемый на У-400 дуговой конный источник (рис.2), как показали стендовые испытания, может обеспечить высокоинтенсивные пучки очень тяжелых ионов с выбранными отношениями  $A/Z$  (рис.3). Ускорение ионов будет производиться на самом высоком уровне среднего магнитного поля

Таблица I

Параметры ускоренных пучков циклотрона У-400

Ионы	Энергия (МэВ/нукл.)	Интенсивн. (ч/с)
$^{13}\text{C}^{2+}$	14,0	$10^{13}$
$^{14,15}\text{N}^{2+}$	12,6-8,5	$2 \cdot 10^{14}$
$^{16}\text{O}^{2+}$	8,0	$3 \cdot 10^{14}$
$^{20,22}\text{Ne}^{2,3+}$	3,9-13,5	$2 \cdot 10^{12} - 10^{14}$
$^{24,26}\text{Mg}^{3+}$	7,9-6,7	$10^{14} - 5 \cdot 10^{13}$
$^{40}\text{Ar}^{4,5+}$	5,5-8	$10^{14} - 9 \cdot 10^{13}$
$^{42,44,48}\text{Ca}^{4,5+}$	5,3-6,7	$5 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{13}$
$^{48-50}\text{Ti}^{5+}$	5,0-5,5	$4 \cdot 10^{13} - 10^{13}$
$^{51}\text{V}^{5+}$	5,5	$5 \cdot 10^{13}$
$^{52-54}\text{Cr}^{5,6+}$	5,3-6,8	$10^{13} - 5 \cdot 10^{12}$
$^{55}\text{Mn}^{6+}$	5,5	$6 \cdot 10^{13}$
$^{56,58}\text{Fe}^{6+}$	5,3	$2 \cdot 10^{13}$
$^{58,64}\text{Ni}^{6+}$	5,3	$10^{13}$
$^{59}\text{Co}^{5,7+}$	3,6-7	$2 \cdot 10^{13} - 10^{12}$
$^{64,70}\text{Zn}^{7,8+}$	5,2-6,2	$10^{12} - 5 \cdot 10^{11}$
$^{75}\text{Ge}^{8+}$	5,3	$2 \cdot 10^{12}$
$^{84}\text{Kr}^{9+}$	6,0	$5 \cdot 10^{11}$
$^{90}\text{Zr}^{11+}$	9,0	$10^{10}$

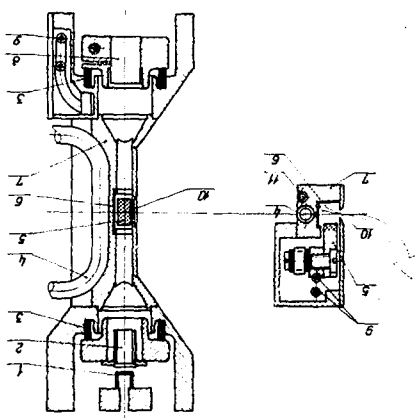


Рис.2. Схема дугового источника тяжелых ионов.

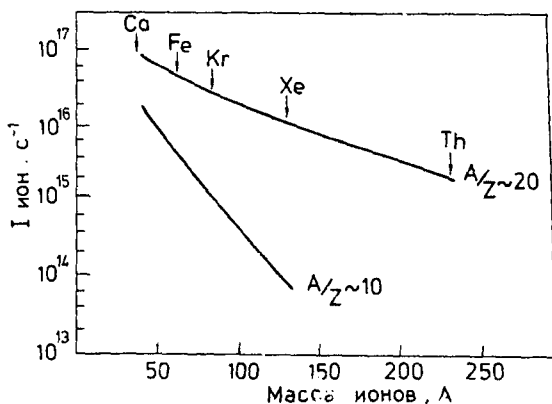


Рис.3. Интенсивности пучков тяжелых ионов в зависимости от массы для дугового источника.

(2I,3 кГс) на четвертой гармонике ВЧ-напряжения. При этом необходимо внести соответствующую коррекцию в центральную монооптическую систему циклотрона. Угол установки щели ионного источника и дулера по отношению к оси резонансных линий ускорителя, как следует из результатов численного моделирования движения частиц на первых оборотах, должен составлять  $40^\circ$ , а радиус - 70 мм (при напряжении на дуантах 80 кВ). Решение этого вопроса упрощается при использовании вертикального ионного источника, изготовленного в настоящее время. Задача эффективного ускорения очень тяжелых ионов до конечного радиуса У-400 с точки зрения временной и пространственной устойчивости движения частиц не встретит дополнительных трудностей. Однако она предъявляет достаточно жесткие требования к величине давления остаточного газа в камере ускорителя.

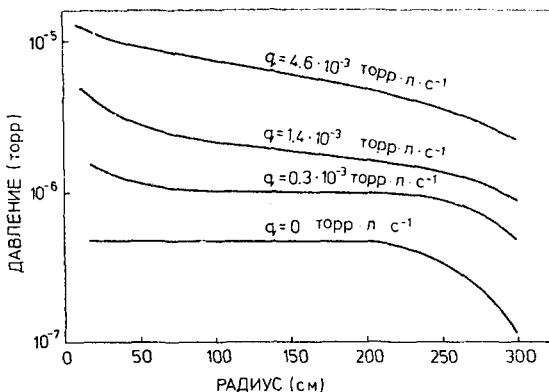


Рис.4. Зависимость давления в камере циклотрона У-400 по радиусу при разном уровне натекания.

источника не является кардинальным решением данного вопроса. В настоящее время

в ЛЯР завершается проектирование и начинается изготовление элементов системы внешней инжекции пучка, которая позволит при использовании дифференциальной откачки значительно улучшить вакуумные условия, а применяя внешние, более мощные дуговые источники ионов, а также основанные на других принципах работы, повысить почти на порядок интенсивность пучков тяжелых ионов.

Вывод ионов из циклотрона У-400, при его работе в режиме инжектора, будет осуществляться электростатическим полем дефлектора угловой протяженностью  $38^\circ$  и апертурой 10 мм с максимальным напряжением 60 кВ и радиально-фокуси-

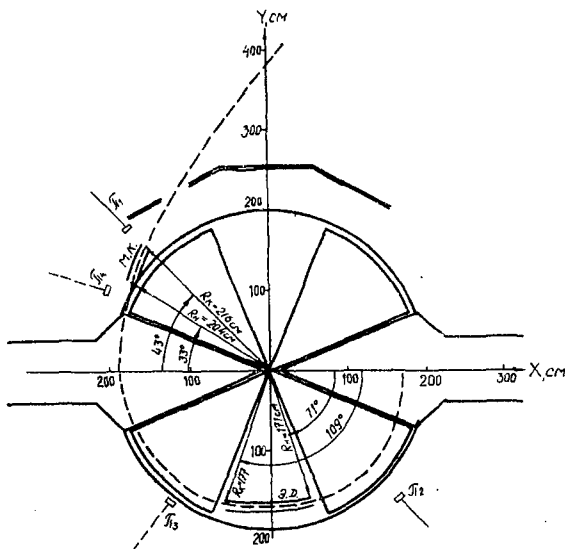


Рис.5. Электростатическая система вывода пучков ионов из циклотрона У-400.

В процессе эксплуатации циклотрона У-400 в его камере с помощью масляных диффузионных насосов с азотными экранами (рис.4) достигнуто давление остаточного газа, составляющее  $5 \cdot 10^{-7} + 10^{-6}$  Торр /9/, что вызовет, по оценкам, двух-трехкратное уменьшение интенсивности пучков тяжелых ионов. Снижение натекания рабочего газа из жонного источника, являющегося основной газовой нагрузкой вакуумной системы ускорителя, путем внедрения импульсной подачи газа, тщательным подбором режимов работы жонного

источника не является кардинальным решением данного вопроса. В настоящее время в ЛЯР завершается проектирование и начинается изготовление элементов системы внешней инжекции пучка, которая позволит при использовании дифференциальной откачки значительно улучшить вакуумные условия, а применяя внешние, более мощные дуговые источники ионов, а также основанные на других принципах работы, повысить почти на порядок интенсивность пучков тяжелых ионов. Вывод ионов из циклотрона У-400, при его работе в режиме инжектора, будет осуществляться электростатическим полем дефлектора угловой протяженностью  $38^\circ$  и апертурой 10 мм с максимальным напряжением 60 кВ и радиально-фокусирующим пассивным магнитным каналом с градиентом магнитного поля  $I+I,5$  кЭ/см (рис.5). Такая система вывода позволит реализовать наиболее простую и испытанную схему инжекции ионов в циклотрон У-400М с помощью их перезарядки в центральной области медианной плоскости ускорителя. Расчетная эффективность вывода ионов составит 50%.

Система транспортировки тяжелых ионов длиной около 100 м размещается в специально создаваемой галерее, связанной с залом ускорителей У-400 и У-400М (рис.1). Она состоит из шести поворотных магнитов: двух магнитов, служащих для перевода пучка из зала циклотрона У-400 в галерею, двух магнитов - для снижения пучка

в медианную плоскость У-400 и магнита для поворота частиц к циклотрону У-400М (рис.1). Для фокусировки частиц будут применены 12 пар квадрупольных линз с максимальным градиентом 600 Э/см. Для эффективного захвата ионов в ускорителе на У-400М требуется временное согласование работы инжектора и пост-ускорителя. Как показывает анализ, это достигается выбором уровней средних магнитных полей циклотронов и зарядов ускоряемых ионов, т.е. при выполнении условия кратности частот обращения ионов в ускорителях -  $k_1 f_1 = k_2 f_2$ . Однако существует проблема, заключающаяся в том, что на длине 120 м при 1% разбросе энергии частиц в пучке длительность спуска частиц увеличивается более чем в два раза. При этом фазовый акцептанс циклотрона У-400М составит около 0,3.

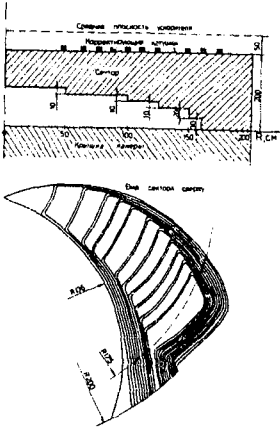


Рис.6. Магнитная структура циклотрона У-400М.

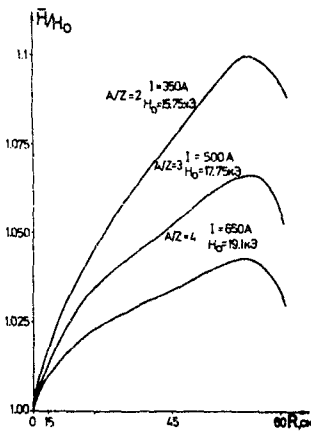


Рис.7. Распределение среднего магнитного поля по радиусу модели циклотрона У-400М.

В системе транспортировки предполагается использование банчера на восьмой гармонике ВЧ-напряжения циклотрона У-400 -  $f_b = 48+52$  МГц с напряжением до 50 кВ. Как уже сообщалось, циклотрон У-400М создается на основе электромагнита ускорителя У-300. Для У-400М разработана магнитная структура /10/ с четырьмя  $45^\circ$  секторами, имеющими растущую по радиусу толщину и угол спиральности на конечном радиусе  $40^\circ$  (рис.6), с максимальным уровнем среднего магнитного поля 19,5 кЭ. Для исследования распределений магнитных полей создана модель электромагнита в масштабе 1:3, измерения на которой показали на удовлетворительное согласие с результатами численного моделирования магнитной цепи ускорителя. Распределения средних магнитных полей и флаттера по радиусу (рис.7,8) удовлетворяют условиям устойчивого ускорения частиц с отношениями  $A/Z = 2+5$ . Коррекция среднего магнитного поля по радиусу будет осуществляться системой токовых корректирующих катушек, устанавливаемых на поверхности секторов.

Система инжекции пучков включает в себя дублет квадрупольных линз, магнит коррекции положения пучка в горизонтальной плоскости, магнитный радиально фокусирующий канал и устройство перемещения перезарядной мишени в требуемое радиальное и азимутальное положение. Проведено численное

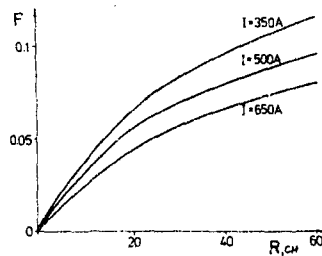


Рис.8. Распределение флаттера магнитного поля по радиусу модели циклотрона У-400М.

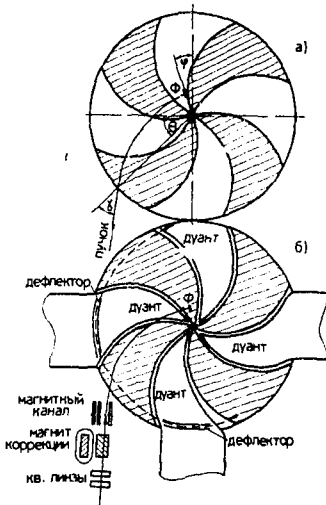


Рис.9. Схема инжекции пучков тяжелых ионов в циклотрон У-400М.

достаточно благоприятны, поскольку при отсутствии ионного источника и натекшего из него в объем рабочего газа давление в камере циклотрона будет поддерживаться на уровне  $10^{-7}$  Торр с помощью паромасляных насосов. В автономном режиме циклотрона У-400М при ускорении ионов, в основном легких - от He до Ne, генерируемых собственным внутренним источником, потери пучка будут также незначительны ввиду малого сечения перезарядки легких частиц на остаточном газе ускорителя.

Вывод пучков ускоренных ионов из циклотрона У-400М будет осуществляться двумя электростатическими дефлекторами угловой протяженностью  $38^\circ$ , расположенными в дуантах ускорителя (рис.9). При зазорах между пластинами дефлектора 5 мм для вывода частиц с максимальной энергией 120 МаВ/н потребуются напряжение до 70 кВ. Фокусировка пучка в рассеянном магнитном поле ускорителя будет выполняться трехэлементным магнитным каналом. Эффективность вывода частиц, определяемая приростом радиуса пучка за оборот в конце ускорения, толщиной ножа дефлектора, величиной амплитуд некогерентных колебаний и рядом других причин, по оценкам составит 40+60% для всего диапазона отношений A/Z ускоренных ионов.

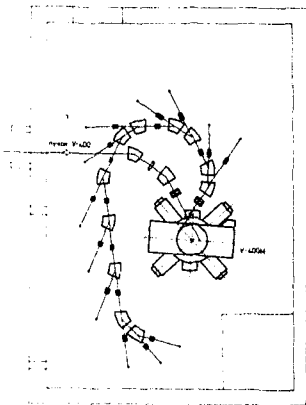


Рис.10. Система разводки внешних пучков циклотрона У-400М.

исследование динамики инжекции пучка для двух вариантов установки (а) и (б) (рис.9). Рабочий вариант (а) (рис.9) характеризуется тем, что инжектируемый пучок не испытывает дефокусирующего действия азимутальной составляющей магнитного поля и ортогональных к пучку сил электрического поля дуантов. Эти исследования позволили выбрать основные параметры элементов системы инжекции, угол подхода монопровода к ускорителю, определить радиальные и азимутальные положения мишеней, требуемые для выполнения условий согласования пучка, прошедшего перезарядную мишень, с его равновесной орбитой.

Ускоряющая система циклотрона У-400М включает в себя четыре дуанта, расположенных в долинах ускорителя (рис.9) с напряжением до 150 кВ в диапазоне частот  $15 \pm 25$  МГц. В настоящее время завершается исследование систем возбуждения, согласования и фазирования на моделях резонаторов. При работе циклотрона У-400М в качестве постускорителя очень тяжелых ионов вакуумные условия

Разрабатываемая система разводки внешних пучков циклотрона У-400М (рис.10) включает 11 каналов транспортировки пучков на физические мишени.

Полная эффективность ускорения частиц тандемом циклотронов У-400 - У-400М составит:

$$= 0,1 (\text{фаз.аксепт.У-400}) * 0,3 (\text{ускорение-У-400}) * 0,5 (\text{вывод}) * 0,5 (\text{транспортировка}) * 0,5 (\text{инжекция}) * 0,5 (\text{фаз.аксепт.У-400М}) * 0,5 (\text{ускорение-У-400М}) * 0,4 (\text{вывод}) * 0,5 (\text{транспортировка}) = 2 \cdot 10^{-4}, \text{ что позволит получить пучки ионов с интенсивностями}$$

$10^{11}+10^{12}$  ч/с (см.рис.3). Завершение строительства ускорительного комплекса ДЯР намечено к 1989 году. К настоящему времени заканчивается ряд научных и конструкторских проработок основных узлов ускорительного комплекса. Ведется изготовление вакуумной камеры ускорителя У-400М, полюсов, секторов, близится к завершению строительство галереи.

#### Л и т е р а т у р а

1. Вялов Г.Н. Природа, № 10, с.42, 1966.
2. Шалаев И.А. и др. ОИЯИ 9-3988, Дубна, 1968.
3. Флеров Г.Н. и др. Труды У Всесоюзн. совещ. по уск. заряд. частиц. М.: Наука, с.58, 1976.
4. Андриянов А.М. и др. ОИЯИ 9-85-532, Дубна, 1985.
5. Ferme J., Ninth Int. Conf. on Cycl. and their Appl., Caen, p.147, 1981.
6. Blosser H.G. Ninth Int. Conf. on Cycl. and their Appl., Caen, p.147, 1981.
7. Шалаев И.А. и др. ОИЯИ Р9-6062, Дубна, 1971.
8. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ 9-84-555, Дубна, 1984.
9. Гульбекин Г.Г. и др. ОИЯИ 13-80-843, Дубна, 1980.
10. Козлов С.И. и др. ОИЯИ 9-83-125, Дубна, 1983.