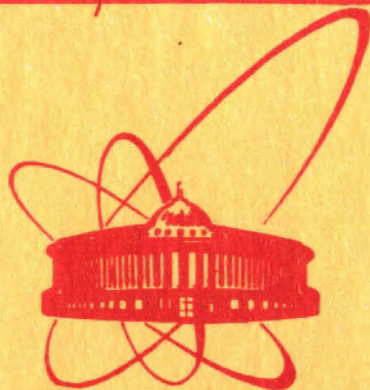


2759/2-80

23/VI-80



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-80-151

М.С.Хвастунов

**ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ
УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ**

Направлено в ПТЭ

1980

В настоящее время пучки тяжелых ионов кроме традиционного применения в ядерно-физических экспериментах все шире используются в прикладных исследованиях и промышленности^{2,3}. Ускорители ионов /линейный ускоритель, циклотрон, синхротрон/ сложны по конструкции, дороги, для их эксплуатации требуется высококвалифицированный персонал. Это в значительной степени снижает возможности прикладного применения пучков ионов.

В статье обсуждается циклический индукционный ускоритель /ЦИУ/, по принципу близкий к бетатрону, и так же, как бетатрон, - простой по конструкции и в эксплуатации. Ниже описаны протонный ЦИУ и два варианта его использования в каскадных системах ускорителей.

1. СХЕМА ЦИУ

По своей структуре ЦИУ подобен бетатрону с постоянным полем¹, но отличается тем, что ведущее поле в нем переменное во времени. Это дает ускорителю ряд преимуществ⁴. Магнитная система ЦИУ подобна магнитной системе слабофокусирующего синхротрона; в прямолинейных промежутках размещаются устройства ввода, вывода и ускоряющие ферромагнитные сердечники - индукторы. Источник питания включает резонансный LC-контур на низкой частоте, например, 50 Гц. В индукторах и магнитах используется рулонная электротехническая сталь, например, марки Э330А. Основные расчетные формулы приведены в⁴.

На рисунке представлена схема ЦИУ. Для всех его вариантов было выбрано 12 элементов периодичности, показатель спада поля взят близким к 0,5, а отношение длины прямолинейного промежутка к длине орбиты в отдельном магните - 2,03. При этом число бетатронных колебаний $\nu_x \approx \nu_z = 1,24$, форм-фактор огибающей пучка $F=1,05$.

2. ПРОТОННЫЙ ЦИУ

Были выполнены оценки параметров протонного ЦИУ для трех энергий: 50, 100 и 200 МэВ. В табл. 1 и 2 /колонки 3,4 и 5/ приведены параметры индукторов и магнитов ЦИУ. Индукторы имеют форму полого цилиндра со стенкой толщиной $t_i = R - r$. Магниты - С-

Таблица 1
Параметры индукторов

№ п/п	Параметр	Величина					
		3	4	5	6	7	8
1.	r , внутренний радиус, м	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2.	R , внешний радиус, м	0,66	0,90	1,25	0,90	0,90	0,90
3.	l , суммарная длина, м	7,45	9,85	14,48	11,15	12,77	15,4
4.	M , масса, т	70	171	485	193	221	270
5.	B , амплитуда индукции, т	1,55	1,71	1,68	1,71	1,71	1,71
6.	$P_{\text{ак}}$, мощность потерь, кВт	78	270	695	305	350	420
7.	$P_{\text{р}}$, реактивная мощность, МВт	0,67	5,41	11,2	6,2	7,0	8,5

Таблица 2
Параметры магнитов

№ п/п	Параметр	Величина					
		3	4	5	6	7	8
1.	l , суммарная длина, м	4,41	5,82	8,15	6,60	7,54	9,11
2.	t , радиальный размер зазора, см	16	16	16	16	16	16
3.	g , высота зазора, см	8	8	8	8	8	8
4.	M , масса, т	3,9	5,0	7,1	5,7	6,6	8,0
5.	B_0 , постоянная составляющая индукции в зазоре, т	0,807	0,843	0,856			
6.	B_m , амплитуда переменной индукции в зазоре, т	0,694	0,757	0,794	0,675	0,588	0,484
7.	$P_{\text{ак}}$, мощность потерь, кВт	120	160	210	180	200	245
8.	$P_{\text{р}}$, реактивная мощность, МВт	3,4	5,4	8,3	4,8	4,2	3,4

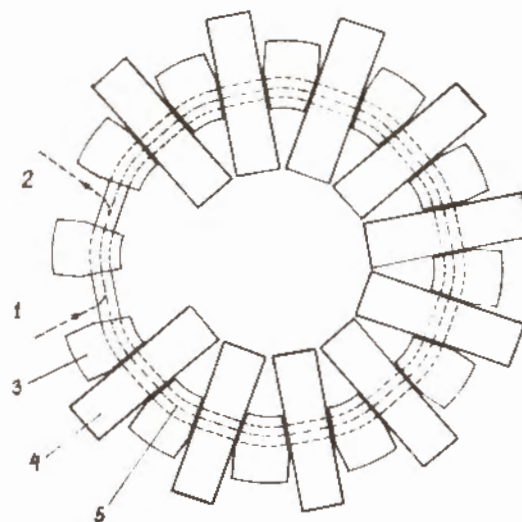


Рис.1. Схема циклического индукционного ускорителя ионов: 1 и 2 - прямолинейные промежутки для ввода и вывода ионов; 3 - магниты; 4 - ускоряющие ферромагнитные сердечники - индукторы; 5 - вакуумная камера.

-образные. Величина B_1 - амплитуда индукции в ускоряющем сердечнике, усредненная по сечению. Основная часть потерь в индукторах - потери в стали, а в магнитах - потери в обмотках.

В табл.3 приведены данные о протонном ЦИУ. Вакуумная камера круглого сечения - диаметром 7 см, диаметр пучка при инжекции равен 5 см. Интенсивность пучка оценивалась по формуле для циклического ускорителя с учетом эффектов пространственного заряда и влияния стенок камеры. Интенсивность пучка составляет $\sim 10^{13}$ прот./с, эффективность вывода - 80%. Время однооборотной инжекции составляет /1,8 - 3,2/ мкс, ток источника - 10 мА в импульсе.

В протонном ЦИУ можно ускорять тяжелые ионы с произвольными Z/A . Так, ионы $Z/A = 0,5$ приобретают энергию 13,5; 27 и 54 МэВ/А в разных вариантах ЦИУ. Для перехода от ускорения протонов к ускорению ионов достаточно изменить уровень постоянной составляющей индукции в зазоре магнита.

Разрабатывается протонно-ионный синхротрон на энергию протонов 200 МэВ $^{5/7}$. В нем планируется ускорять также ионы с $Z/A = 0,5$ до энергий ~ 50 МэВ/А.

Проведем сравнение ЦИУ с синхротроном. Масса активной стали в ЦИУ значительно больше, чем в синхротроне. Это недостаток ЦИУ. Объем стали можно снизить, если вместо одного ускорителя использовать каскадную систему, например, из двух последовательно работающих ЦИУ. При этом вес стали снижается с 492 до ~ 180 т. У ЦИУ есть и положительные стороны. Это - простота ускоряющей системы, настройки и эксплуатации. Кроме того, у

Таблица 3
 Параметры протонного ЦИУ

№	Параметр	Величина		
		3	4	5
I.				
1.	T, конечная энергия, МэВ	50	100	200
2.	T ₀ , энергия инжекции, МэВ	0,3	0,3	0,3
3.	N _p , интенсивность: а) 10 ¹¹ протон/имп. б) 10 ¹² протон/с	1,86	1,40	1,03
		7,4	5,6	4,1
4.	ρ, радиус орбиты в магните, м	0,70	0,93	1,30
5.	ℓ, средний радиус орбиты, м	2,12	2,81	3,82
6.	M, масса активной стали, т	74	176	49.
7.	f, частота питающего напряжения, Гц	50	50	50
8.	P, мощность источника питания, МВт	4,3	11,2	20,4
9.	P ₂ , мощность потерь, кВт	200	430	910
10.	A, адмитанс ускорителя, 10 ⁻³ м.рад.	1,09	0,82	0,60
11.	g _i , доля орбиты, занятая индукторами.	0,558	0,558	0,555
12.	g _p , доля орбиты, занятая магнитами.	0,332	0,330	0,330

него есть качество, которого нет у синхротрона. Это - универсальность, возможность ускорения ионов с произвольным отношением заряда к массе без существенного изменения режима работы; для перехода от одного Z/A к другому достаточно изменить уровень постоянной составляющей индукции в зазоре магнита. Далее, по предварительным оценкам, импульсный разброс пучка ионов, ускоренных в ЦИУ, меньше синхротронного разброса.

3. КАСКАДНАЯ СИСТЕМА А Система включает в себя ионный источник, инжектор на 300 кВ, 1-й ЦИУ, перезарядную мишень, 2-й ЦИУ и устройства ввода и вывода ионов. Ионы вводятся в камеру 1-го ЦИУ, ускоряются в течение 10 мс, выводятся из нее и направляются на перезарядную

мишень. После выхода из мишени часть ионов с повышенным зарядом вводится в камеру 2-го ЦИУ и ускоряется в течение 10 мс. В табл. 1 и 2 /колонки 6 и 7/ приведены параметры индукторов и магнитов 1-го и 2-го ЦИУ, а в табл. 4а, 4в и 4с - параметры 1-го и 2-го ЦИУ. Интенсивность пучка 1-го ЦИУ составляет $\cdot 10^{13}$ ион/с /эффективность вывода принята равной 80%/. При однооборотной инжекции ток ионов, например, Ag⁴⁺, от источника составляет ~9,6 мА в импульсе длительностью ~8 нкс. Ионный источник с подогревным катодом ⁸ может выдавать большие токи. Интенсивность пучка 2-го ЦИУ - /10¹¹ ÷ 10¹² / ион/с. Конечная энергия ионов до ксенона включительно ~6,3 МэВ/А. Вакуум в камере должен быть не хуже 10⁻⁸ Торр.

Известна каскадная система, состоящая из двух циклотронов ⁷. Каскадная система ЦИУ не может конкурировать с циклотронной системой по интенсивности пучка. Но у первой системы есть несомненные достоинства. Это - простота конструкции, настройки и эксплуатации, а также возможность ускорения ионов с произвольным отношением заряда к массе. Как уже отмечалось выше, для перехода от одного Z/A к другому достаточно изменить уровень постоянной составляющей индукции в зазоре магнита /см. табл. 4в и 4с/. Другое важное качество ЦИУ - высокая монохроматичность пучка /более высокая, чем у циклотрона/.

Таблица 4а
 Параметры ЦИУ каскадной системы А

№	Параметр	Величина	
		3	4
I.			
1.	T/Z, энергия инжекции, МэВ	0,3	
2.	ρ, радиус орбиты в магните, м	1,05	1,20
3.	ℓ, средний радиус орбиты, м	3,18	3,63
4.	f, частота питающего напряжения, Гц	50	50
5.	M, масса активной стали, т	200	230
6.	P, мощность источника питания, МВт	11,5	11,8
7.	P ₂ , мощность потерь, кВт	495	550
8.	A, адмитанс ускорителя, 10 ⁻³ м.рад	2,91	2,56
9.	g _i , доля орбиты, занятая индукторами	0,557	0,557
10.	g _p , доля орбиты, занятая магнитами	0,330	0,330

Таблица 4в

Параметры 1-го ЦИУ каскадной системы А

№ п/п	П а р а м е т р	В е л и ч и н а					
		2H^{1+}	12C^{6+}	20Ne^{2+}	40Ar^{4+}	64Kr^{6+}	132Xe^{8+}
1.	Конечная энергия а) МэВ	57	41,6	26,9	53,4	60,7	70,7
	в) МэВ/А	26,5	3,46	1,34	1,34	0,72	0,54
2.	Интенсивность *) а) 10^{11} ион/имп.	5,0	2,43	2,47	1,24	0,82	0,62
	в) 10^{13} ион/сек	2,0	0,97	0,99	0,50	0,33	0,25
3.	Постоянная составляющая индукции в зазоре магнита, т	0,781	0,853	0,913	0,913	0,955	0,979
4.	Амплитуда переменной индукции в зазоре магнита, т	0,676	0,676	0,676	0,676	0,676	0,676
5.	Заряд иона после перезарядной мишени		6+	8+	14+	20+	24+
6.	Эффективность перезарядки		0,50	0,50	0,22	0,14	0,08

*/ Оценка по пространственному заряду.

Таблица 4с

Параметры 2-го ЦИУ каскадной системы А

№ п/п	П а р а м е т р	В е л и ч и н а				
		12C^{6+}	20Ne^{8+}	40Ar^{14+}	84Kr^{20+}	132Xe^{24+}
1.	Энергия инжекции, МэВ	41,6	26,9	53,4	60,7	70,7
2.	Конечная энергия а) МэВ	520	500	842	852	830
	в) МэВ/А	43,3	25,0	21,0	10,1	6,3
3.	Интенсивность а) 10^{10} ион/имп.	9,73	9,88	2,18	0,92	0,40
	в) 10^{12} ион/сек.	3,90	3,95	0,87	0,37	0,16
4.	Постоянная составляющая индукции в зазоре магнита, т	1,035	0,935	0,988	1,016	1,072
5.	Амплитуда переменной индукции в зазоре магнита, т	0,588	0,588	0,588	0,588	0,588

4. КАСКАДНАЯ СИСТЕМА В

В систему входят ионный источник, инжектор на 300 кВ, линейный ускоритель Видероз, перезарядная мишень, накопительное кольцо, ЦИУ и устройства ввода и вывода. Линейный ускоритель работает в импульсном режиме: - 0,2 мс - работа, следующие -19,8 мс - пауза. В течение первых 200 мкс происходит ускорение низкозарядных ионов до энергии 1,4 МэВ/А, их перезарядка в мишени и накопление в кольце. Затем - быстрый вывод накопленных ионов из кольца и их ввод в камеру ЦИУ. Ускорение на 2-й ступени длится 10 мс. Вакуум в камере ЦИУ порядка 10^{-7} Торр.

В табл. 1 и 2 /колонки 8/ приведены данные об индукторах и магнитах ЦИУ, а в табл.5 - параметры ЦИУ. Заряд ионов, инжектированных в камеру ЦИУ, довольно высок. Это позволяет эффективно ускорять ионы всех элементов /до урана включительно/ до энергий ≥ 9 МэВ/А. Максимальная интенсивность пучка, оцененная по пространственному заряду, составляет $\sim 10^{13}$ ион/с. Фактически интенсивность пучка ограничена возможностями ионного источника на уровне $10^{10} + 10^{11}$ / ион/с.

Линейный ускоритель ионов UNILAC⁸ ускоряет все ионы /до урана включительно/ до энергий $\sim 7,5$ МэВ/А. Интенсивность пучка составляет $\sim 10^{11}$ ион/с для ксенона и $\sim 10^{10}$ ион/с - для урана. Ускоритель включает систему Видероз, структуру Альвареца и 20 отдельных резонаторов. В головной части ускорителя /система Видероз/ ионы ускоряются до энергии 1,4 МэВ/А, затем в перезарядной мишени повышают свой заряд, далее часть ионов вводится в ускоритель Альвареца и ускоряется до конечной энергии. Отдельные резонаторы служат для регулирования энергии ускоренных ионов путем торможения пучка до заданной энергии.

Как следует из изложенного, каскадная система: ускоритель Видероз + ЦИУ по параметрам ускоренного пучка близка к UNILAC, и в то же время существенно проще и дешевле линейного ускорителя UNILAC. Регулирование энергии ускоренных ионов в нашей системе осуществляется весьма просто - путем изменения амплитуды питающего напряжения в индукторах и магнитах и соответствующего изменения величины постоянного тока в обмотках магнита. Кроме того, монохроматичность ускоренного пучка в нашей системе выше, чем в UNILAC.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Индукционный метод ускорения частиц, реализованный в бетатроне, может быть с успехом применен для ускорения тяжелых ионов. Циклический индукционный ускоритель ионов обладает ценными качествами: простотой конструкции и эксплуатации, универсальностью и высокой монохроматичностью пучка.

Таблица 5
Параметры ЦИУ каскадной системы В

№ п/п	П а р а м е т р	В е л и ч и н а			
		А1	К1	Ке	U
1.	Заряд иона после перезарядной мишени	14+	24+	30+	44+
2.	Эффективность перезарядки	0,23	0,14	0,18	0,14
3.	Конечная энергия иона а) МэВ в) МэВ/А	845	1330	1590	2125
4.	Интенсивность ж) а) 10^{11} ион/имп. в) 10^{13} ион/с	21,2	15,8	12,0	8,9
5.	Постоянная составляющая индукции в зазоре магнита, т	3,41	2,43	2,45	2,05
6.	Амплитуда переменной индукции в зазоре магнита, т	1,36	0,97	0,98	0,82
		0,820	0,896	1,000	1,118
		0,484	0,484	0,484	0,484

ж/ Оценки по пространственному заряду.

Автор благодарен И.Н.Семенюшкину за интерес к работе и ее стимулирование, В.С.Алфееву за помощь и М.Д.Шафранову - за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канунников В.Н. и др. АЭ, 1975, 38, с.234.
2. Флеров Г.Н., Барашенков В.С. УФН, 1974, 114, с.351.
3. Гольдин Л.Л. и др. УФН, 1973, 110, с.77.
4. Хвастунов М.С., ОИЯИ, Р9-12811, Дубна, 1979.
5. Абдульманов В.Г. и др. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, июль 1977, т.1, с.345, Серпухов, 1977.
6. Воробьев Е.Д., Пасюк А.С. ОИЯИ, Р7-5177, Дубна, 1970.
7. Shelaev I.A., et al. Proc. of the 6-th Int.Cycl.Conf., Vancouver, 232, 1972.
8. Вöhne D. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 5-7 октября 1976 г., т.1, с.71, "Наука", М., 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 февраля 1980 года.