

СЗУСК
К-138

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3494 / 2-76

6/ix-76

9 - 9750

Р.Б.Кадыров, В.Л.Степанюк

ВАРИАНТ
ПРЕДУСКОРИТЕЛЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
НА ЭНЕРГИЮ 2,4 МЭВ/А
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКИ

1976

9 - 9750

Р.Б.Кадыров, В.Л.Степанюк

ВАРИАНТ
ПРЕДУСКОРИТЕЛЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
НА ЭНЕРГИЮ 2,4 МЭВ/А
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БНБ/МОТЕНА

Кадыров Р.Б., Степанюк В.Л.

9 - 9750

Вариант предускорителя многозарядных ионов на энергию 2,4 МэВ/А с использованием высокочастотной жесткой фокусировки

Приведены результаты расчета основных параметров предускорителя многозарядных ионов с $Z/A \geq 0,4$ и энергией на выходе 2,4 МэВ/А. Ускоряющая структура предускорителя - однородная четырехпроводная линия, запитываемая с помощью двойного Н-резонатора. Фокусировка пучка осуществляется высокочастотным электрическим полем.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

Введение

Очевидно, что при создании нуклотрона - ускорительного комплекса релятивистских ядер ^{1/} - необходимо особое внимание уделить линейному ускорителю - инжектору, поскольку именно здесь формируются основные параметры ускоряемого пучка. Из-за низкого относительного заряда Z/A многозарядных ионов /МЗИ/ ускорение их в линейном ускорителе классического типа /схема Альвареца-Блюэта/ представляет определенные трудности, особенно в начальной части ускорителя. С уменьшением Z/A существенно возрастают габариты, сложность и стоимость такого ускорителя, а эффективность ускорения частиц падает. Это наглядно подтверждается на примере таких ускорителей, как Super Nilac, Unilac и др. ^{2/}. В связи с этим представляет интерес рассмотрение возможности использования для ускорения МЗИ более эффективных ускоряющих систем.

Значительным достижением в технике линейного ускорения ионов можно считать разработанный учеными СССР ^{2-15/} метод ускорения и фокусировки пучка частиц высокочастотным /ВЧ/ электрическим полем, не обладающим аксиальной симметрией. Этот метод позволяет существенно улучшить параметры ионного линейного ускорителя, упростить его конструкцию, уменьшить габариты и стоимость.

В настоящей работе приведены результаты расчета основных параметров начальной части инжектора нуклотрона - предускорителя МЗИ с $Z/A \geq 0,4$ и энергией на выходе 2,4 МэВ/А. Ускоряющая структура предускорителя - однородная четырехпроводная линия, запитываемая

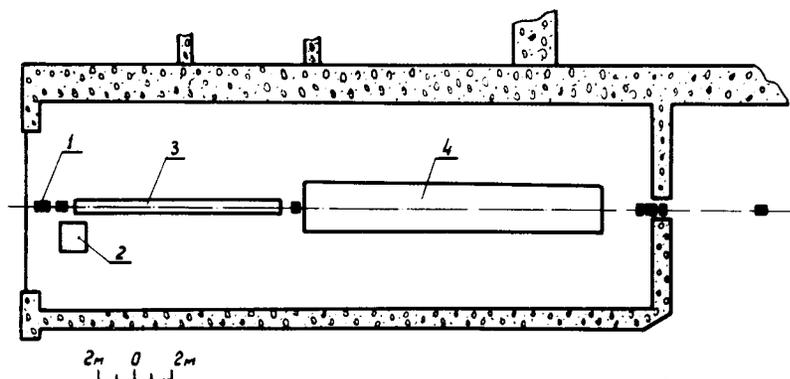


Рис. 1. Вариант схемы инжектора многозарядных ионов на 12,4 МэВ/А. Предускоритель - с ВЧ фокусировкой, основной ускоритель - классического типа. 1 - источник многозарядных ионов и форинжектор; 2 - импульсный трансформатор на 100 кВ; 3 - предускоритель, 2,4 МэВ/А, $Z/A \geq 0,4$; 4 - основной ускоритель, 12,4 МэВ/А, $Z/A \geq 0,5$.

с помощью двойного Н-резонатора /4,6,10,11,13/. Примерная схема инжектора МЗИ, построенная с использованием такого предускорителя, приведена на рис. 1. Этот вариант инжектора представляет собой комбинацию метода ускорения и фокусировки частиц ВЧ электрическим полем в предускорителе 3 с классической структурой в основной части инжектора 4.

Расчет основных параметров предускорителя

В предложенном И.М.Калчинским и В.А.Тепляковым линейном ускорителе ионов /4/ фокусировка и ускорение осуществляются ВЧ электрическим полем, образованным четырехпроводной длинной линией. Действительно, если к электродам линии приложено ВЧ напряжение, то при движении вдоль оси этой линии ионы последовательно испытывают действие полей с изменяющимся знаком градиента, т.е. возникает эффект жесткой фокусировки. Расстояние между противоположными электродами одной полярности периодически изменяется. Это, в свою

очередь, приводит к тому, что в такой системе возникает продольная ускоряющая компонента поля. Пространственный период модуляции расстояния между электродами при этом равен $\beta\lambda$, фазы изменений в горизонтальной и вертикальной плоскостях сдвинуты на полпериода.

В одном из наиболее оптимальных вариантов технической реализации этой идеи, предложенном и экспериментально проверенном В.А.Тепляковым с сотрудниками /13,22/, в качестве системы ВЧ питания ускоряюще-фокусирующих электродов четырехпроводной линии используется двойной Н-резонатор. Он выполнен в виде сплошной металлической трубы - экрана /и вакуумного контейнера/, внутри которой находятся две трубы меньшего диаметра, разрезанные по образующим. К краям разрезов крепятся ускоряющие электроды. Внутренние трубы являются резонирующими камерами двойного Н-резонатора, настроенными на рабочую частоту.

В предлагаемом варианте предускорителя МЗИ на 2,4 МэВ/А за основу взята вышеописанная конструкция В.А.Теплякова. Расчет предускорителя проводился по методике, изложенной в работах /10,11,13,14/. Основные расчетные параметры предускорителя приведены в таблице.

В процессе расчета предускоритель был разбит на четыре секции. В первой секции для обеспечения достаточного захвата МЗИ в режим ускорения начальное значение синхронной фазы выбрано равным 76° . Далее на протяжении всей секции осуществляется адиабатическое стягивание области фазовой устойчивости так, что синхронная фаза изменяется от 76° до 37° при постоянном значении частоты продольных колебаний и геометрической длины сгустков ускоряемых частиц. В последующих трех секциях значение синхронной фазы остается постоянным и равным 37° .

В работе /10/ определены условия отсутствия резонансов связи, которые имеют вид:

$$\frac{\Omega}{\Omega_r} < \frac{1}{I_{0 \max}}; \quad 1 < \frac{\Omega}{\Omega_r} < \frac{2}{I_{0 \max}}; \quad \frac{\Omega}{\Omega_r} > 2. \quad /1/$$

Здесь Ω и Ω_r - частота продольных и средняя частота

поперечных колебаний, нормированные к рабочей частоте,

$$I_{0 \max} = I_0 \left(\frac{K_1 r_{0 \max}}{2} \right), \quad /2/$$

$r_{0 \max}$ - максимальный радиус канала, $K_1 = 2\pi/\beta_c \lambda$, I_0 - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. Рабочая длина волны λ была выбрана равной 206,75 см. Было решено работать в первой области устойчивости /1/, поскольку во второй и третьей областях возрастает вероятность возникновения резонанса из-за уменьшения частоты продольных колебаний в процессе ускорения. Средняя относительная частота поперечных колебаний есть:

$$\Omega_r = \frac{\mu}{2\pi}, \quad /3/$$

где μ - набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки. Задав μ и радиус апертуры - a , учитывая /1/ и /2/, можно определить максимально возможное значение продольной частоты. Рабочая частота продольных колебаний принималась на 10% меньше максимально возможной.

Уменьшение частоты продольных колебаний Ω по мере набора энергии ведет к снижению темпа ускорения. Поэтому в начале третьей и четвертой секций значение Ω было увеличено. Одновременно пришлось уменьшить величину набег фазы μ с 0,5 в первой секции до 0,3 в четвертой. Чтобы сохранить постоянной пропускную способность канала V_k , уменьшение μ было компенсировано увеличением апертуры канала. Полученные в результате аналитических оценок данные были приняты как исходные для расчета геометрии ускоряюще-фокусирующей структуры и динамики частиц на ЭВМ.

При расчете геометрии ускоряюще-фокусирующей структуры предускорителя форма электродов специально подбиралась такой, чтобы высшие азимутальные гармоники ускоряющего поля на оси ускорителя были минимальны, то есть чтобы реальное поле было по возможности линейным /4,10,11/. Однако даже в этом случае аналитически трудно учесть возникающие искажения фа-

зового объема ускоряемого пучка. Метод численного моделирования движения частиц позволяет обойти эту трудность, а также рассчитать аксептанс канала, эмиттанс пучка и спектр энергии на выходе /14/.

Для непосредственного счета на ЭВМ была использована система четырех уравнений:

$$\frac{d\phi}{dz} = Y_1,$$

$$\frac{dY_1}{dz} = -D \cdot T(N) \cos(K_1 z) I_0(K_1 r) (Y_1)^3 \cos \phi,$$

$$\frac{dr}{dz} = Y_2,$$

$$\frac{dY_2}{dz} = \{c \cdot r + A(N) [I_1(K_1 r) \sin K_1 z - Y_2 I_0(K_1 r) \cos K_1 z]\} \times (Y_1)^2 \cos \phi.$$

/4/

Здесь r и ϕ - текущие значения радиального и продольного положения частицы в канале ускорителя, величины $T(N)$ и $A(N)$ постоянны на периоде ускорения, N - номер периода ускорения, D и C постоянны в каждой секции. Точность интегрирования была выбрана равной 0,01% /для r и ϕ /.

На рис. 2 показана область входных фаз и скоростей, соответствующих устойчивому продольному движению ионов, полученная интегрированием первых двух уравнений /4/ для нескольких β . Как видно из рисунка, протяженность сепаратрисы по фазам составляет 4,3 рад, что соответствует коэффициенту захвата ~ 0,7. Для сравнения в ускорителях И-2 и И-100 при оптимальной величине синхронной фазы $\phi_c = 37^\circ$ и выключенном группирователе коэффициент захвата равен 0,33. Предварительная

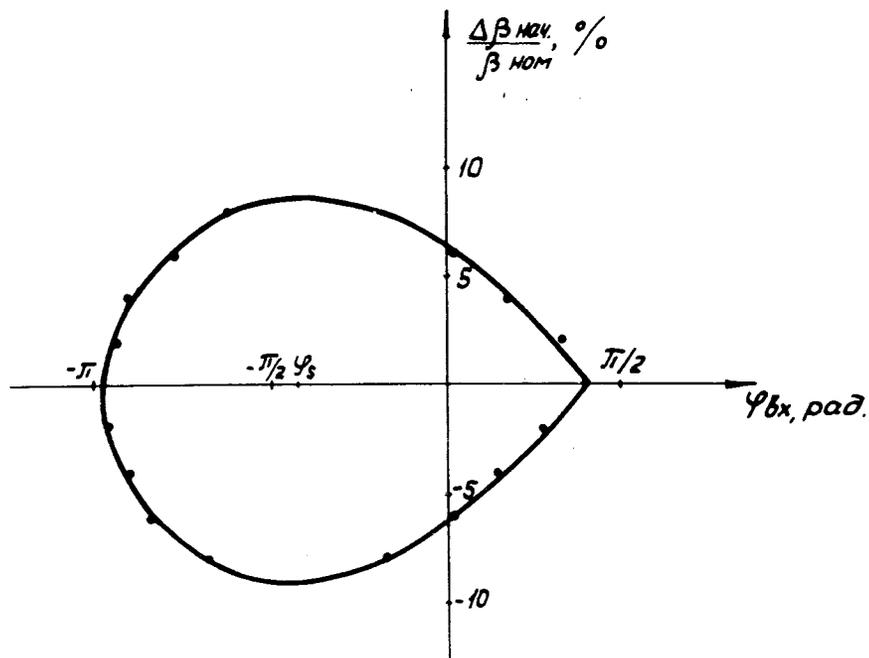


Рис. 2. Сепаратриса предускорителя.

группировка с оптимальным коэффициентом группирования 1,65 - 1,75 в ускорителе И-2^{/20/} увеличивает коэффициент захвата до 0,55-0,57.

Акцептанс предускорителя для синхронной фазы в плоскости $\psi = \pi/2$, а также эмиттанс пучка на выходе представлены на рис. 3. Площадь акцептанса составляет 71 см.мрад, соответствующая пропускная способность равна 0,7 см.мрад. Как видно из рис. 3, канал предускорителя может принять пучки со значительным угловым расхождением, что важно при работе с такими источниками ионов, как лазерные, а также при использовании обдирки в процессе ускорения.

С точки зрения практической реализации метода ускорения и фокусировки ВЧ электрическим полем для ускорения ядер важным является вопрос оценки допусков

на нарушение регулярной структуры ускоряюще-фокусирующей системы. Основные источники случайных возмущений продольных и поперечных колебаний указаны в работе /11/, там же изложена методика расчета допусков. Результаты расчетов, приведенные в таблице, показывают, что единая система допусков, которая может быть принята при изготовлении предускорителя ядер, определяется данными первой и второй секций. При этом величины допусков оказываются одного порядка с принимаемыми для ускорителей системы Альвареца^{/20/}.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.А.Теплякова и А.П.Мальцева за оказанную поддержку и консультации в процессе выполнения работы, В.А.Попова - за полезные дискуссии при обсуждении ее результатов, А.И.Говорова - за помощь при отладке программ, И.П.Голембевскую - за помощь в оформлении графического материала.

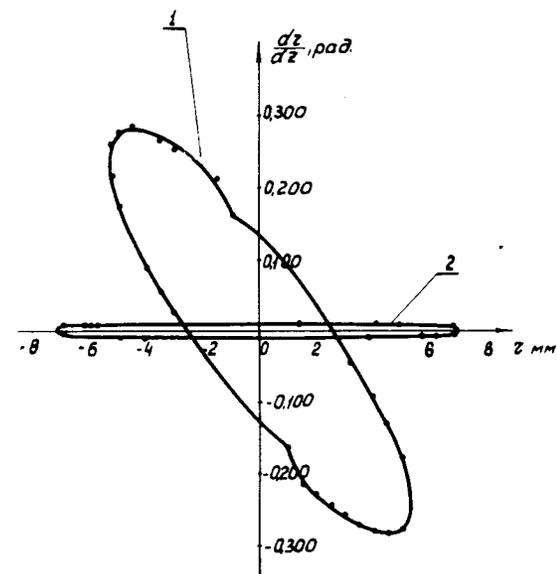


Рис. 3. Акцептанс предускорителя и ожидаемый эмиттанс ускоренного пучка: 1 - акцептанс, 2 - эмиттанс.

Таблица

ПАРАМЕТРЫ ПРЕДУСКОРИТЕЛЯ

№ пп	Параметры	Обозначения и ед. измерения	в е ж и ч и н а		
			1 и 2 секция	3 секция	4 секция
1	2	3	4	5	6
1	Энергия инжекции	W_0 , МэВ/А	0,040	0,400	1,200
2	Выходная энергия	W_k , МэВ/А	0,400	1,200	2,400
3	Относительный заряд	Z/A	0,4	0,4	0,4
4	Длина волны ускоряющего поля	λ , см	206,75	206,75	206,75
5	Синхронная фаза	φ_c	$76^\circ-37^\circ$	37°	37°
6	Коэффициент захвата	$\phi/2\pi$	69%		
7	Напряжение на бортах	U , кВ	140	150	180
8	Максимальная напряженность поля на поверхности электродов	кВ/см	213-227	215-221	215-221
9	Эффективность ускорения	θ	0,013 - 0,129	0,118 - 0,195	0,295 - 0,303
10	Частота продольных колебаний	Ω	0,0546 - 0,0420	0,0546 - 0,0309	0,0423 - 0,0299
11	Относительная скорость синхронной частицы	β_c	0,00925 - 0,0291	0,0291 - 0,0506	0,0506 - 0,0715
12	Максимальный размер области устойчивости по импульсам на входе	$\pm \frac{\Delta P}{P}$	9%		
13	Минимальная безразмерная частота поперечных колебаний	ν_{min}	0,395	0,328	0,257
14	Набег фазы поперечных колебаний синхронной частицы на периоде фокусировки	μ	0,5	0,4	0,3
15	Пропускная способность канала	см·мрад	0,7	0,7	0,7
16	Число периодов ускорения		183	88	68

1	2	3	4	5	6
17	Диаметр апертуры	$2a$, мм	14-13	14	16
18	Глубина модуляции	R_{max}/a	1,05-1,21	1,30-1,31	1,54-1,53
19	Средний радиус канала	R_0 , мм	7,2	8,1	10,3
20	Длина полупериода модуляции	l , мм	9,55-29,97	30,30-52,19	52,53-73,76
21	Максимальный диаметр электрода	D_{max} , мм	9,33-10,40	12,37	17,46
22	Средний диаметр электрода	D_0 , мм	8,92	10,09	12,81
23	Минимальный диаметр электрода	D_{min} , мм	8,60-7,61	8,03-8,17	8,82-8,98
24	Длина резонатора	L_p , м	2,86	3,69	4,33
25	Шунтовое сопротивление одной резонирующей камеры	$R_{ш}$, ком	80	62	52,5
26	Потребляемая мощность (без пучка)	P_{Σ} , МВт	0,245	0,365	0,620
27	Внутренний диаметр вакуумного контейнера	мм	600	600	600
28	Внутренний диаметр резонирующей камеры	$2R_1$, мм	194	194	194
29	Собственная добротность резонатора	Q_0	6000	6000	6000
30	Мощность пучка при токе 100 мА	P_n , МВт	0,040	0,120	0,240
31	Допустимая среднеквадратичная погрешность разности радиусов канала ($R_{max} - R_{min}$)	$\frac{\langle \delta(R_{max}-R_{min}) \rangle}{мк}$	30	40	100
32	Допустимая среднеквадратичная погрешность среднего радиуса канала	$\frac{\langle \delta R_0 \rangle}{мк}$	30	38	45
33	Допустимая среднеквадратичная погрешность длины полупериода модуляции и его координаты	$\frac{\langle \delta l, L \rangle}{l, L}$	0,06%	0,11%	0,13%
34	Допустимая среднеквадратичная величина неравномерности напряжения вдоль резонатора	$\frac{\langle \delta U \rangle}{U}$	1,2%	1,3%	1,24%

Литература

1. В.П.Алексеев, А.М.Балдин и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. В.В.Владимирский. ПТЭ, №3, 35 /1956/.
3. Г.М.Анисимов, В.А.Тепляков. ПТЭ, №1, 21 /1956/.
4. И.М.Капчинский, В.А.Тепляков. ПТЭ, №2, 19 /1970/.
5. М.П.Мальцев, С.И.Ермаков, В.А.Тепляков. АЭ, т.23, вып. 3, 195 /1967/.
6. И.М.Капчинский, В.А.Тепляков. ПТЭ, №4, 17 /1970/.
7. В.Б.Степанов, В.А.Тепляков. Радиотехника и электроника, №11, 1965 /1968/.
8. И.М.Капчинский, А.П.Мальцев, В.А.Тепляков. Труды VII Международной конференции по ускорителям. Ереван, 153, 1970.
9. С.А.Ильевский и др. Препринт ИФВЭ, инж. 72-17, Серпухов, 1972.
10. И.М.Капчинский. Препринт ИФВЭ, инж. 72-79, Серпухов, 1972.
11. И.М.Капчинский. Препринт ИФВЭ, инж. 72-30, Серпухов, 1972.
12. А.П.Мальцев, В.Б.Степанов, В.А.Тепляков. Препринт ИФВЭ, инж. 69-2, Серпухов, 1969.
13. А.П.Мальцев, В.Б.Степанов, В.А.Тепляков. Препринт ИФВЭ, инж. 71-116, Серпухов, 1971.
14. Е.А.Коноплев, А.П.Мальцев, В.Б.Степанов. Препринт ИФВЭ, инж. 72-24, Серпухов, 1972.
15. В.А.Тепляков, В.Б.Степанов. Препринт ИФВЭ, инж. 67-31-К, Серпухов, 1967.
16. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-3124, Дубна, 1968.
17. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969.
18. О.Б.Ананьин, А.М.Балдин и др. Письма ЖЭТФ, 19, в. 1, 19 /1974/.
19. О.А.Вальднер, А.Д.Власов, А.В.Шальнов. Линейные ускорители. Атомиздат, М., 1969.
20. В.А.Баталин и др. Линейный ускоритель протонов И-2 на энергию 25 МэВ. ПТЭ, №5, 1967.
21. М.Влапп. NIM, 91, No. 1, 1971.
22. Н.И.Голосай, Г.Н.Дерновой и др. АЭ, 39, 2, 123 /1975/.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 апреля 1976 года.