

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ДВОЙНЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ ПУЧКА

Л.З.Барабаш, Д.Г.Кошкарев, Ю.Я.Лапицкий, А.Г.Стадников
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Г.И.Бацких, В.Г.Кульман, В.В.Кушин, Б.П.Мурин, В.М.Пироженко
Радиотехнический институт АН СССР, Москва

1. В последнее время рассматривается ряд проектов ускорителей тяжелых ионов, в первую очередь ускорителей ионов урана^{/1,2,3/}. Тяжелые ионы обладают специфическими свойствами, затрудняющими их ускорение в кольцевых ускорителях. Во-первых, отношение зарядности q к атомному весу A для тяжелых ионов значительно меньше 1, поэтому ослабляется взаимодействие их с электромагнитными полями. Во-вторых, высокое эффективное сечение перезарядки ионов на остаточном газе на начальном этапе ускорения приводит к необходимости создания в камере кольцевого ускорителя весьма глубокого вакуума порядка $10^{-9} + 10^{-10}$ тор.

Задача значительно облегчается при использовании в качестве инжектора линейного ускорителя с энергией 20–25 МэВ/нуклон. Эта энергия достаточна для оптимального построения кольцевого ускорителя, так как после перезарядки на входе кольцевого ускорителя получаются ионы с зарядом, лишь на 10% меньшим полного заряда ядра. Кроме того, в линейном ускорителе из-за высокого темпа ускорения нет каких-либо трудностей с вакуумной системой, требуемый вакуум порядка 10^{-6} тор.

2. Если принять зарядность ионов урана при инъекции в линейный ускоритель равной $7/3$, то ускорение их до энергии $T=25$ МэВ/нуклон потребовало бы эффективного напряжения

$$U_э = \frac{A \cdot T}{q} \approx 850 \text{ МВ.} \quad (I)$$

С целью снижения величины эффективного напряжения необходимо производить перезарядку ионов при ускорении.

Для определения параметров ускорителя необходимо знать заряд ионов после перезарядки. Хорошие результаты для среднего заряда \bar{q} дает полуэмпирическая формула, приведенная в работах /4,5/:

$$\bar{q} = Z \left\{ 1 + \left[Z^{-0,45} \cdot \frac{v}{v_0} \right]^{-\frac{1}{0,6}} \right\}^{-0,6} \quad (2)$$

где Z - атомный номер иона; v - скорость иона; $v_0 = 3,6 \cdot 10^8$ см/с. Результаты расчета для урана ($Z=92$) даны на рис.1.

Отметим, что если бы было возможно ускорение на равновесном заряде, то для достижения энергии 25 МэВ/нуклон потребовалось бы $U_0 = 78$ МВ.

Распределение зарядности после перезарядки хорошо представляется гауссовой кривой

$$f(q) = (d\sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left[-\frac{(q - \bar{q})^2}{2d^2} \right] \quad (3)$$

где $d = 0,32 \cdot Z^{0,45}$; для урана $d = 2,46$.

Результаты расчета по формуле (3) представлены в табл.1, из которой видно, что высокий коэффициент захвата (94 %) получается при использовании зарядностей от $\bar{q} - 4$ до $\bar{q} + 4$.

Таблица I

Зарядность	\bar{q}	$\bar{q} \pm 1$	$\bar{q} \pm 2$	$\bar{q} \pm 3$	$\bar{q} \pm 4$
Доля пучка	0,162	0,46	0,69	0,85	0,94

При ускорении с двойным прохождением пучка /6/ одна и та же ускоряющаяся система используется два раза с промежуточной перезарядкой ионов: после первого ускорения ионы пропускаются через обдирочную мишень, а затем по специальному каналу направляются на вход ускоряющей системы для повторного ускорения. Условие синхронизации будет соблюдено, если скорости ионов при первом и втором прохождении отличаются в целое число раз:

$$\beta_2 = K \beta_1 \quad (K = 2, 3, \dots) \quad (4)$$

При использовании ускоряющей системы с трубками дрейфа (типа Альвареса) второе ускорение производится с периодом, равным

$\beta\lambda$, а первое — с периодом, равным $K\beta\lambda$ (λ — длина волны). Набор энергии для обеспечения синхронизации при первом ускорении должен быть в K^2 раз (без учета релятивизма) меньше, чем при втором. Уменьшение набора энергии происходит, во-первых, из-за меньшей зарядности ионов и, во-вторых, из-за меньшего коэффициента пролетного времени (F). Тонкая подгонка с целью

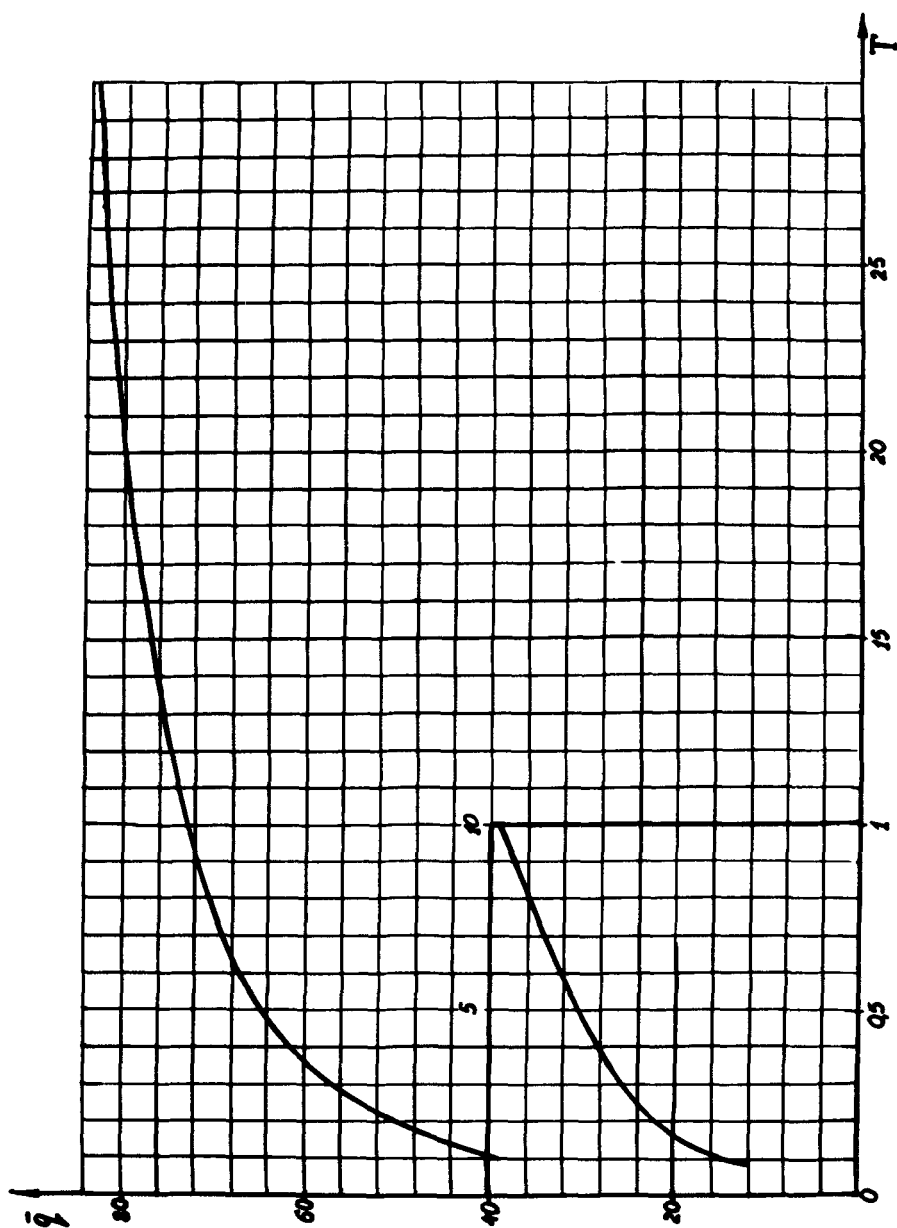


Рис. I.

точного выполнения условия (4) осуществляется подбором синхронных фаз (φ_s) при первом ($\varphi_{s,1}$) и втором ($\varphi_{s,2}$) прохождениях. Таким образом, должно выполняться соотношение

$$q_1 F_1 \cos \varphi_{s,1} / q_2 F_2 \cos \varphi_{s,2} = K^{-2}. \quad (5)$$

Фокусировка пучка в линейном ускорителе может быть обеспечена с помощью магнитных квадрупольных линз (токовых или на постоянных магнитах). Частоты (ω) и амплитуды (a) поперечных колебаний в жесткофокусирующем канале линейного ускорителя при первом и втором прохождениях связаны соотношениями

$$\omega_1 / \omega_2 = q_1 \sqrt{T_2} / q_2 \sqrt{T_1} ; \quad a_1 / a_2 = \sqrt{q_2} / \sqrt{q_1}.$$

3. В начале ускорения использование двойного прохождения пучка нецелесообразно, так как для его осуществления пришлось бы выбрать неоптимальные технические параметры ускорителя. Поэтому линейный ускоритель содержит начальную часть, в которой осуществляется предварительное ускорение ионов до энергии 1,5 МэВ/нуклон, и основную часть с двойным прохождением пучка. Схема ускорителя дана на рис.2, где: 1 – форинжектор; 2 – группирователь; 3 – начальная часть ускорителя; 4 – поворотное устройство; 5 – перезарядная мишень; 6 – ребанчер; 7 – основная часть ускорителя.

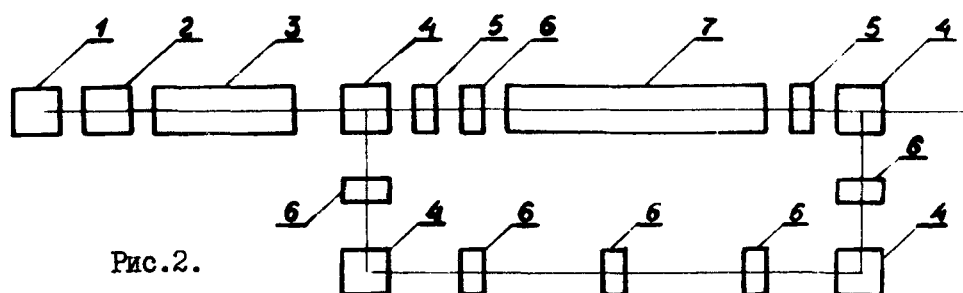


Рис.2.

Основные параметры ускорителя приведены в табл. 2.

Особенностью начальной части является низкое значение скорости ионов. Длины ускоряющих зазоров должны быть не меньше диаметра апертуры, равного $d = 2 - 4$ см, иначе появляется сильная неравномерность ускоряющего поля по радиусу. По этой причине в начальной части необходимо использовать большую длину волны, величина которой ограничивается лишь габаритами ускоряющих резонаторов.

Таблица 2

	Начальная часть		Основная часть	
	Резонатор		Прохождение	
	Первый	Второй	Первое	Второе
Напряжение инъекции, кВ	500	—	—	—
Энергия ионов, МэВ/нукл.	0,015–0,4	0,4–1,5	1,5–6,1	6,1–25
Относительная скорость	0,005–0,029	0,029–0,057	0,057–0,113	0,113–0,22
Зарядность	7	7	46 ± 4	68 ± 4
Эффективное напряжение, МВ	13,6	37,4	23,8	66,2
Ток пучка, мА	3,5	3,5	23,0	34,0
Синхронная фаза	$\mp 60^\circ$	45°	$57 \mp 3^\circ$	$32 \mp 5^\circ$
Тип ускоряющей структуры	Н-резонатор		Альварец	
Тип фокусировки	$\Phi \Pi \Phi$		Магнитные квадрупольи	
Период ускорения	$\frac{\beta\lambda}{2} - \frac{3\beta\lambda}{2}$	$\frac{\beta\lambda}{2}$	$2\beta\lambda$	$\beta\lambda$
Коэффициент пролетного времени	0,7–0,8	0,8	0,43	0,82
Рабочая частота, МГц	25	75	150	
Напряженность поля в зазоре, кВ/см	130		100	
Длина ускоряющей системы, м	4	20	39	
Импульсная высокочастотная мощность, МВт	3	3,5	7	

При применении специальных фокусирующих устройств возникают трудности с их размещением внутри ускоряющей системы, поэтому в этой части более целесообразно использовать фокусировку пучка высокочастотным полем, в частности, фазопеременную фокусировку, которая наиболее эффективна в области малых скоростей частиц ^{/7/}. В качестве ускоряющей структуры применен Н-резонатор, в котором трубки крепятся на гребенчатых пластинах ^{/8/}. Эта структура обладает особенно высокой эффективностью ускорения при малых скоростях частиц и имеет малые поперечные габари-

ты, что позволяет использовать ее на низких частотах. Рабочая частота первого резонатора 25 МГц. В этом резонаторе реализована фокусировка ФОДО, при которой синхронная фаза $\varphi_s = 60^\circ$ периодически меняет знак от зазора к зазору. Фазовая протяженность области захвата составляет около 60° , аксептанс ускорителя не менее $0,2 \pi$ мрад.см., предельная величина ускоренного тока не менее 3,5 мА. На входе ускорителя предусмотрен группирователь, повышающий захват частиц до 40–50 %. Переход на более высокую частоту 50 МГц, необходимый для уменьшения диаметра второго резонатора, осуществляется при энергии 0,4 МэВ/нуклон практически без потерь частиц. Ускоренные в начальной части ионы при энергии 1,5 МэВ/нуклон проходят через перезарядную мишень, где приобретают среднюю зарядность 46. После первого прохождения основной ускоряющей системы ионы приобретают энергию 6,1 МэВ/нуклон, перезаряжаются до $\bar{q} = 68$ и возвращаются на вход ускоряющей системы. При втором прохождении ионы ускоряются до энергии 25 МэВ/нуклон и после перезарядки имеют средний заряд 82.

Выбранная нами кратность ускорения при первом прохождении $K = 2$ позволяет нам оптимизировать параметры ускоряющих резонаторов. Оптимальный коэффициент зазора α (отношение длины зазора к периоду системы) для данного диапазона скоростей частиц при $K = 1$ составляет 0,25 – 0,3. Зависимость коэффициента пролетного времени от длины зазора и кратности ускорения приведены

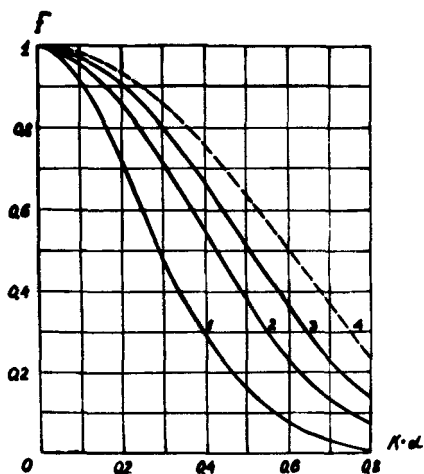


Рис.3

на рис.3, где кривым с номерами 1,2,3 соответствуют значения β 0,05, 0,1, 0,2, а кривая 4 есть $F = \sin \alpha K \pi / \alpha K \pi$.

Выбор большей кратности ускорения при первом прохождении (например, $K = 3$ с соответствующим понижением энергии на входе в основную часть) нецелесообразен, поскольку для получения нужного соотношения $F_1/F_2 = 1/3$ приходится брать коэффициент зазора, как видно из рис.3, равным 0,1 – 0,2, что приводит к ухудшению параметров ускорителя.

Для предотвращения расплывания сгустков в канале возврата необходимо установить ребанчеры. При разбросе по скоростям $\simeq 1\%$ требуется 6 ребанчеров, которые представляют собой однозакорные резонаторы с суммарной амплитудой высокочастотного напряжения 3 МВ. Возврат ионов для повторного ускорения осуществляется по специальному ионопроводу с ахроматичной системой четырех поворотов. Каждый поворот на угол $\frac{\pi}{2}$ происходит на паре магнитов без градиента и фокусирующего триплета квадрупольных линз между магнитами.

Таким образом, линейный ускоритель ионов урана на энергию 25 МэВ/нуклон, использующий изложенные технические решения, может иметь общую длину около 70 м и запитываться четырьмя типовыми высокочастотными генераторами с суммарной мощностью 13,5 МВт.

Литература

1. K.A.Prelec. IEEE Trans of Nucl.Sci., N 5-22, N 3, p.1690, 1975.
2. J.Barale et al. Ibid., p.1672.
3. Н.И.Веников и др. "Ускоритель тяжелых ионов на энергии сотни мегаэлектронвольт на нуклон", доклад на У Всесоюзном совещании по ускорителям, г.Дубна, 1976.
4. H.D.Betz. Rev of Mod.Phys., 44, p.465, 1972.
5. V.S.Nikolaev et al.Phys.Lett., 28A, p.277, 1968.
6. Д.Г.Кошкарёв. "К вопросу об ускорении тяжелых ионов". Препринт ИТЭФ-23, М., 1977.
7. В.В.Кушин. Труды РТИ АН СССР, №9, стр.23, 1972.
8. П.М.Зейдлиц, В.А.Ямницкий. "Атомная энергия", т.10, вып.5, стр.469, 1961.

ДИСКУССИЯ

А.А. Коломенский: Каковы требования к поворотной системе?

Д.Г. Кошкарёв: Поворотная система должна включать несколько резонаторов для сохранения структуры. Что касается магнитных поворотов, то они должны обеспечить поворот частиц с довольно большим разбросом по q (± 4). Такие поворотные системы вполне реализуемы.

L. Teng: What do you estimate the charge exchange efficiency be ?

Д.Г. Кошкарёв: Эффективность перезарядки по оценкам около 95%.

В.Г. Рогозинский: Оценивались ли потери ионов, например урана, и влияние на состояние ускоряющих промежутков заряжения ураном?

Д.Г. Кошкарёв: Частицы, потерянные при второй перезарядке, не попадают в ускоряющую систему; потери частиц при первой перезарядке невелики ($\sim 5\%$), влияние этих потерь на состояние ускоряющей системы не рассматривалось.