

СЗУСК
Д-67

23/111-8

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



2691/2-73

9 - 7043

Е.Д.Донец, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов,
А.А.Смирнов

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УСКОРЕНИЯ
АТОМНЫХ ЯДЕР В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 7043

Е.Д.Донец, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов,
А.А.Смирнов

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УСКОРЕНИЯ
АТОМНЫХ ЯДЕР В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Направлено в ЖТФ

Одной из особенностей ускорения дейтронов и α -частиц в синхрофазотроне ОИЯИ является двухэтапное ускорение в синхротронном режиме при кратности 2 на первом этапе и кратности 1 на втором ^{/1-4/}. Переход с одного этапа на другой осуществляется при выключенном ускоряющем напряжении и постоянном во времени магнитном поле.

Ускорение более тяжелых ионов по сравнению с He^{2+} сопровождается возрастанием потерь из-за изменения заряда ускоряемых частиц в результате столкновения их с атомами остаточного газа ^{/5/}.

В работе рассматривается один из методов ускорения атомных ядер в синхротронном режиме, основанный на форсированном нарастании магнитного поля на первом этапе, чем может быть обеспечено значительное уменьшение потерь ускоряемых ядер.

1. Оценка потерь частиц из-за изменения заряда

Известно, что вероятность изменения заряда частицы в результате столкновений с атомами вещества, через которое эта частица проходит, прямо пропорциональна " ν "-числу атомов вещества в 1 см^3 среды, сечению перезарядки " σ " и длине пути " dx ". Вероятность прохождения отрезка dx без изменения заряда равна $1 - \nu \sigma dx$. Число частиц " N ", не изменивших заряд на пути " $x + dx$ ", можно рассматривать и как некоторую функцию этого пути $N(x + dx)$ и как число частиц $N(x)$, не изменивших свой заряд на отрезке dx .

Иными словами,

$$N(x+dx) = N(x)(1 - \nu \sigma dx). \quad /1/$$

После разложения функции $N(x+dx)$ в ряд, с точностью до бесконечно малых второго порядка, будем иметь:

$$\frac{dN}{N} = -\nu \sigma dx. \quad /2/$$

Выразив dx через относительную скорость частицы " β ", после интегрирования получим:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\nu c \int_0^t \beta \sigma dt}, \quad /3/$$

где N_0 - число частиц, не изменивших заряд, в момент времени $t=0$; c - скорость света.

Трудность определения потерь частиц заключается в знании сечения перезарядки " σ ". Для приближенной оценки сделаем некоторые замечания и допущения.

Во-первых, при ускорении ядер изменение заряда может произойти только за счет захвата электронов. Во-вторых, будем считать, что основной вклад в потери интенсивности вносит изменение заряда за счет захвата одного электрона. Согласно экспериментальным данным^{/6/}, отношение сечения захвата двух электронов к сечению захвата одного электрона $\sigma_{z, z-2} / \sigma_{z, z-1}$ в азоте возрастает с ростом скорости частицы, приближаясь к 0,1 - 0,2, и при скоростях $v > 10^9$ см/сек практически остается постоянным.*

В-третьих, будем считать, что перезарядка частиц происходит при столкновении с атомами азота.

Сечение захвата частицей электрона зависит, главным образом, от скорости и заряда частицы и слабо

* Инжектор ЛУ-9 /на энергию 9 Мэв для протонов/ способен ускорять дейтроны и другие ядра с отношением заряда к массе $Z/A = 0,5$ до энергии $\sim 2,25$ Мэв/нуклон, что соответствует скорости $\sim 2 \cdot 10^9$ см/сек

зависит от среды. В азоте например, $\sigma_{z,z-1} \sim 1/v \div 1/v^2$ при $v = 2,6 - 4 / 10^8$ см/сек *, а при $v \sim 10^9$ см/сек $\sigma_{z,z-1}$ становится пропорциональным $1/v^5 \div 1/v^7 / 8 /$. Для грубой оценки потерь частиц будем считать, что

$$\sigma_{z,z-1} \approx \sigma_{i,z,z-1} \beta_i^5 \frac{1}{\beta^5}, \quad /4/$$

где $\sigma_{i,z,z-1}$ - сечение захвата одного электрона ядром, имеющим относительную скорость β_i , соответствующую энергии инжекции /для синхрофазотрона ОИЯИ $\beta_i \sim 0,07 /$.

Скорость частицы в синхротронном режиме возрастает с ростом напряженности магнитного поля в соответствии с выражением /4/

$$\beta = \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{E_{OA}}{300 R_0} \cdot \frac{A}{Z}\right)^2 + H^2}}, \quad /5/$$

где E_{OA} - полная энергия покоя ядра, приходящаяся на один нуклон и равная $\sim 0,94 \cdot 10^9$ эв; R_0 - радиус центральной орбиты ускорителя, равный для синхрофазотрона ОИЯИ 28 м. Так как на начальном участке ускорения

$H^2 \ll \left(\frac{E_{OA}}{300 R_0} \cdot \frac{A}{Z}\right)^2$, то учитывая это обстоятельство

и заменяя далее dt на dH/\dot{H} / \dot{H} - скорость нарастания магнитного поля/, после интегрирования показателя экспоненты в уравнении /3/ получим

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\frac{v c}{3} \left(\frac{E_{OA}}{300 R_0} \cdot \frac{A}{Z}\right)^4 \sigma_{i,z,z-1} \beta_i^5 \frac{[1 - \left(\frac{H_i}{H}\right)^3]}{\dot{H} H_i^3}} \quad /6/$$

* При оценке ожидаемых потерь ускоряемых ионов в омнитроне в диапазоне скоростей $0,01 \leq \beta \leq 0,07$ произведение $\sigma(\beta)\beta$ /где $\sigma(\beta)$ - общее сечение захвата и потери электронов ускоряемыми ионами/ принято постоянным и равным, приблизительно, 10^{-17} см² /7/.

где H_i - значение напряженности магнитного поля в момент инжекции.

Выразив " H_i " через кинетическую энергию частиц на нуклон " W_{iA} " в соответствии с известным соотношением для нерелятивистского случая

$$W_{iA} \approx 4,8 \cdot 10^{-5} H_i^2 R_0^2 \left(\frac{Z}{A}\right)^2 \quad /7/$$

и принимая $A/Z=2$; $\beta_i = 0,07$, получим

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0,8 \cdot 10^{30} \sigma_{i,z,z-1} \cdot p \frac{[1 - (\frac{H_i}{H})^3]}{H W_{iA}^{3/2}}} \quad , \quad /8/$$

где p - давление в вакуумной камере в торах; H и \dot{H} соответственно в [кэ] и [кэ/сек]; W_{iA} - кинетическая энергия в [кэв/нуклон].

Из уравнения /8/ следует, что уменьшения потерь частиц из-за изменения заряда можно добиться улучшением вакуума, а также повышением энергии инжектируемых частиц и скорости нарастания магнитного поля.

Эффективность ускорения при повышенной скорости нарастания магнитного поля

Улучшение вакуума и повышение энергии инжекции сопряжено с большими техническими и экономическими трудностями, обусловленными реконструкцией вакуумной камеры и сооружением нового инжектора. Повышение скорости нарастания магнитного поля во всем цикле еще более трудная задача. Однако потери можно значительно уменьшить, если форсировать нарастание магнитного поля лишь на участке наибольших потерь.

На рис. 1 показана зависимость $[1 - (\frac{H_i}{H})^3] / W_{iA}^{3/2}$ в функции " H " для различных значений W_{iA} , на основании которой можно судить о характере изменения показателя степени экспоненты в /8/, а следовательно, и о потерях

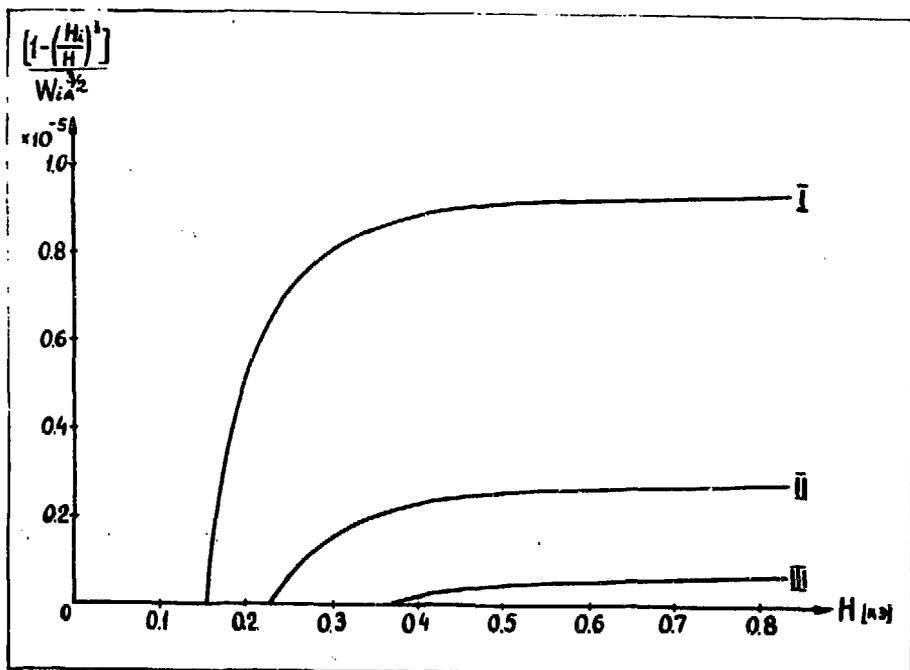


Рис. 1. Зависимость $\frac{[1 - (\frac{H_i}{H})^3]}{W_{iA}^{3/2}}$ в функции напряженности магнитного поля H для различной энергии инжектируемых ядер W_{iA} ; I - 2,25 Мэв/нуклон; II - 5 Мэв/нуклон; III - 12,5 Мэв/нуклон.

интенсивности на начальном участке ускорения. Увеличение энергии инжектируемых частиц приводит, с одной стороны, к увеличению магнитного поля H_i в соответствии с /7/, а с другой - к уменьшению показателя степени в /8/, а следовательно, и к уменьшению потерь частиц. Кроме того, как следует из рис. 1, потери частиц в процессе синхротронного ускорения уже при $H \sim 500$ э / $\beta = 0,22$ / становятся практически не зависящими от величины магнитного поля. Поэтому одним из эффективных методов уменьшения потерь частиц из-за изменения заряда является сокращение длительности ускорения при росте поля до ~ 500 э за счет увеличения \dot{H} . При двухэтапном ускорения предоставляется возможность совместить первый этап с участком наибольших потерь и осуществлять ускорение на этом

этапе при повышенной скорости нарастания магнитного поля.

Сделаем количественные оценки потерь при ускорении атомных ядер на синхрофазотроне ОИЯИ. Формула для

расчета потерь на первом этапе при $[1 - (\frac{H_i}{H})^3] \rightarrow 1$, в соответствии с /8/ принимает вид:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.8 \cdot 10^{30} \sigma_{i,z,z-1} \frac{P}{\dot{H} W_{iA}^{3/2}}} \quad /9/$$

Для определения сечений захвата одного электрона $\sigma_{i,z,z-1}$ ядрами азота воспользуемся экспериментальными данными работы /8/, экстраполируя значения $\sigma_{z,z-1}$ до скорости, соответствующей $\beta_i = 0,07$, а ядрами неона и кальция по формуле /6/

$$\sigma_{z,z-1} \sim Z^2 \left(\frac{v}{2v_0} \right)^3 \sigma_{10} \quad /10/$$

где v - скорость ядра; $v_0 = 2,19 \cdot 10^8$ см/сек; σ_{10} - сечение захвата электрона протоном при взаимодействии с атомами азота.

Результаты вычислений $\sigma_{i,z,z-1}$, а также потерь частиц, выраженных отношением N_0/N /такое количество инжектируемых частиц потребуется, чтобы до конца ускорилась одна частица/, при различных значениях скорости поля \dot{H} , выраженных отношением $\dot{H}/\dot{H}_{ном.}$ /для синхрофазотрона ОИЯИ $\dot{H}_{ном.} = 4$ кэ/сек/, энергиях инжектируемых ядер и давлениях в вакуумной камере представлены в таблице 1.

Как следует из таблицы, увеличение \dot{H} , например, в 4 раза способствует значительному сокращению потерь при ускорении ядер вплоть до Ne^{10+} . Для получения релятивистских ядер с большим атомным номером одного увеличения \dot{H} недостаточно. Потребуется технические решения, связанные с увеличением энергии инжекции

Таблица

Ядро	N_{14}^{7+}	Ne_{20}^{10+}	Ca_{40}^{20+}
$\sigma_{i,z,z-1} \text{ (см)}^2$	$2,1 \cdot 10^{-18}$	$0,8 \cdot 10^{-17}$	$3,2 \cdot 10^{-17}$
N_0/N при $p = 3 \cdot 10^{-6}$ тор	$\dot{N} / \dot{N}_{\text{НОМ.}} = 1$ 10^5	$5 \cdot 10^{18}$	10^{74}
$W_{IA} = 2,25 \text{ МэВ/нукл.}$	$\dot{N} / \dot{N}_{\text{НОМ.}} = 4$ 17	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{18}$
N_0/N при $p = 3 \cdot 10^{-6}$ тор	2,35	26	$4,5 \cdot 10^5$
$\dot{N} / \dot{N}_{\text{НОМ.}} = 4;$ $W_{IA} = 5 \text{ МэВ/нукл.}$	$p = 1 \cdot 10^{-6}$ тор 1,32	3	75

или улучшения вакуума в камере ускорителя. Например, увеличение энергии инъекции до 5 Мэв/нуклон при одновременном увеличении \dot{N} в 4 раза может обеспечить условия для получения релятивистских ядер кальция.

Литература

1. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. Препринт ОИЯИ, Р9-4214, Дубна, 1968.
2. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. ПТЭ, 4, 202 /1969/.
3. А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, И.Б.Исинский, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов, Г.П.Пучков. ПТЭ, 3, 29 /1971/.
4. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков, ОИЯИ, 9-5821, Дубна, 1971.
5. M.V.Isaila et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-19, 2, 204 (1972).
6. В.С.Николаев. УФН, т. 85, 4, 679 /1965/.
7. E.T.Cole and R.M.Main. Proc. of the 6th Int.Conf. on High Energy Accel., Cambridge. P18, 1967.
8. В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева, Я.А.Теплова. ЖЭТФ, 40, 4, 989 /1961/.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1973 года.