

**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна**

К-592

9-87-896

**С.И.Козлов**

**НАКОПЛЕНИЕ ЧАСТИЦ  
В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ**

**1987**

Обычный изохронный циклотрон генерирует почти непрерывные пучки ионов, поэтому использование его в качестве инжектора частиц в накопительное кольцо или синхротрон малоэффективно, т.к. существующие методы инжекции пучка в эти установки в основном импульсные, если, конечно, не предполагать перезарядную схему инжекции<sup>/1/</sup>.

Имеется ряд методов, позволяющих осуществить накопление частиц на конечных радиусах изохронного циклотрона. Они связаны с изменением характера движения ионов в радиально-фазовом пространстве.

Например, введение биполярного изменения распределения среднего магнитного поля на конечных радиусах изохронного циклотрона (рис. 1а) позволяет смещать пучок по фазе так, что набор энергии за оборот ионом уменьшается, а радиальная плотность частиц увеличивается. Здесь предполагается накопить порядка 100 оборотов пучка в интервале радиусов  $2 \div 3$  см<sup>/1,2/</sup>. Возможно, однако, что в данной схеме появятся трудности, связанные с пространственной устойчивостью движения ионов, поскольку существуют определенные ограничения на величину допустимого градиента среднего магнитного поля.

При другом способе<sup>/2/</sup> используется внешняя инжекция пучка в циклотрон с регулированием фазы сгустков относительно ускоряющего высокочастотного напряжения так, что последовательные сгустки частиц оказываются на конечном радиусе ускорения, совершив разное число оборотов одновременно, т.е. можно накопить до 50 оборотов.

Регулирование распределения частиц в радиально-фазовом пространстве на конечных радиусах ускорения изохронного циклотрона можно осуществить модификацией формы (пространственной, временной) распределения ускоряющего поля. Так, например, известно, что введение дополнительных дуантов, работающих на частоте в два или три раза больше, чем основные, позволяет улучшить режим ускорения частиц на плоской части волны ускоряющего напряжения (т.н. режим флат-

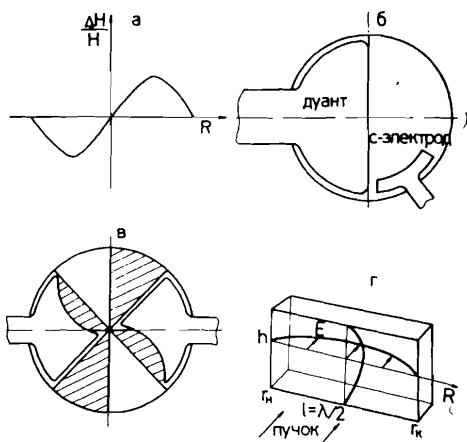


Рис. 1

топпинга)<sup>/3/</sup>. Это дает возможность в значительной мере улучшить энергетическую неоднородность в ускоренном пучке.

Эффект расширения фазовой протяженности сгустка на конечных радиусах ускорения в целях увеличения коэффициента заполнения путем применения дополнительного С-электрода (рис. 1б) используется в ряде синхроциклотронов<sup>/4/</sup>. При этом радиальное электрическое поле С-электрода, зависящее от времени так, что производит требуемый фазовый сдвиг, увеличивает радиальную плотность пучка.

Фазовая ширина сгустка частиц на конечных радиусах зависит от распределения амплитуды ускоряющего электрического поля по радиусу. Полученное в работе<sup>/5/</sup> соотношение между максимальным набором энергии и фазой частицы для двух радиусов ускорения  $R_1$  и  $R_2$ :  $\Delta W_2 \cdot \sin \phi(R_1) = \Delta W_{R_2} \cdot \sin \phi(R_2)$  — показывает, что при увеличивающемся по радиусу ускоряющем напряжении ( $\Delta W_{R_2} > \Delta W_{R_1}$ ) происходит сжатие сгустка ионов по фазам, при уменьшающемся — расширение. Так, уменьшения набора энергии частицей за оборот можно достигнуть изменением по радиусу физической азимутальной протяженности дуантов  $\phi_d$  (рис. 1в). Поскольку прирост энергии за оборот  $\Delta W \sim \sin(n\phi_d/2)$ , где  $n$  — номер гармоники ускоряющего напряжения, то значение  $\Delta W$  на радиусе инжекции максимально ( $n = 4$ ,  $\phi_d = 45^\circ$ ), а в конце ускорения ( $\phi_d = 90^\circ$ ) равно нулю.

Компрессию пучка на конечных радиусах изохронного накопительного кольца<sup>/5/</sup> предполагается осуществить с помощью резонаторов, работающих на половине длины волны (рис. 1г), когда используется внешняя инжекция пучков ионов  $H^-$  на начальный радиус ( $r_H$ ), далее — перезарядка на мишени, затем следует ускорение ионов  $H^+$  до конечного радиуса ( $r_K$ ) и замедление до  $r_H$ , потом цикл повторяется. Оценки показывают, что возможно накопление пучка в интервале радиусов  $\Delta r = 0,04 \cdot (r_K - r_H)$  с очень высокой интенсивностью. Применение этого способа ограничивается циклотронами с разделенными секторами, поскольку аксиальные размеры используемых резонанс-

ных полостей значительны ( $f = \frac{c\sqrt{\ell^2 + h^2}}{2\ell n}$ ,  $c$  — скорость света, для  $f = 50$  МГц  $\ell = 3,5$  м,  $h = 6$  м). С той же целью применяются четвертьволновые резонаторы в ускорительно-накопительном кольце ASTOR<sup>/6/</sup>, служащем промежуточным звеном между изохронным циклотроном SIN и быстроциклическим синхротроном.

Сделать амплитуду ускоряющего напряжения спадающей по радиусу до 0 в области конечных радиусов ускорения на изохронном циклотроне со сплошным полюсом можно с помощью резонатора на  $3/4$  длины волны (рис. 2). В данной работе исследование процесса накопления ионов в четырехметровом изохронном циклотроне проведено для частиц с отношением  $A/Z = 10$ . Распределение магнитного поля было следующим:  $H(r, \theta) = H(r)(1 - f_0 \cos 4\theta)$ ,  $H(r) = H_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $H_0 = 19300$  Э,  $f_0 = 0,25$ . Стартовыми условиями для интегрирования уравнений движения служили координаты и скорости части-

цы, соответствующие ее равновесной орбите. Ускоряющая система циклотрона состоит из двух  $45^\circ$  дуантов, установленных в двух противоположных долинах и возбуждаемых коаксиальными резонаторами с длиной волны  $3/4$  так, что нулевое значение напряжения приходится на радиус  $R_H = 168$  см (рис. 2). Это соответствует ускорению выбранных ионов на 15-й гармонике ВЧ-напряжения ( $f \approx 45$  МГц).

Из рис. 2, где представлена зависимость среднего радиуса последовательных орбит ( $\bar{R} = \frac{1}{2\pi} \int r d\theta$ ) от числа оборо-

тов иона, следует, что смещение области накопления, характеризующейся большой плотностью орбит (0,1 мм/об.), от  $R_H$ , зависит от амплитуды радиальных колебаний, т.е. от глубины вариации магнитного поля  $f_0$ . Эволюция начального радиального фазового пространства, занимаемого пучком около равновесной орбиты с  $R_{p.o.} = 164$  см, в процессе накопления через 100, 150, 200 оборотов показывает (рис. 3), что порядка 100 оборотов пучка циркулирует в интервале радиусов  $169 \div 171$  см и энергий  $201 \div 203$  МэВ (для ионов  $A_{40}^{+4}$ ). Используя данный циклотрон в качестве постускорителя, когда в его центральной области установлена физическая мишень, производящая с помощью инжектируемого пучка от другого ускорителя продукты ядерных реакций, можно осуществить ускорение и накопление вторичных частиц. Этому способствует и большой прирост энергии за оборот в этой области, позволяющий обходить пучком

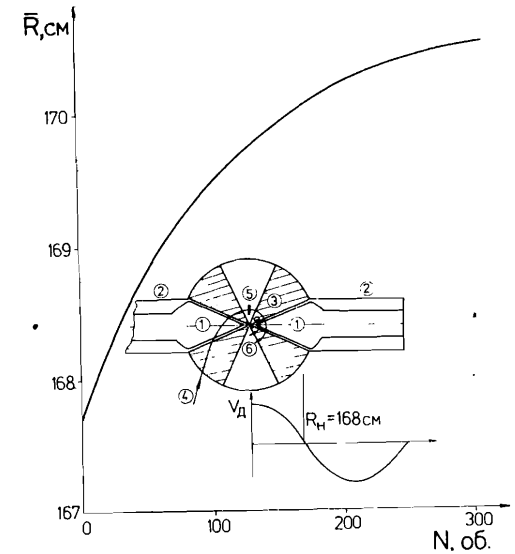


Рис. 2

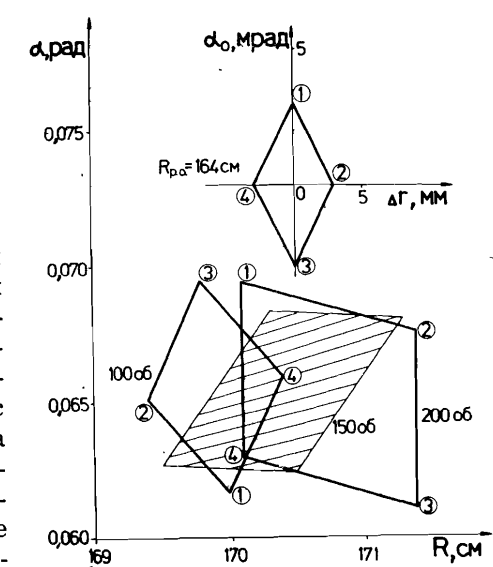


Рис. 3

физическую мишень. В этом же случае постускоритель используется как мощный анализатор вторичных пучков рождающихся ионов по отношению  $A/Z$ .

Длительный процесс накопления (число оборотов  $N \approx 200$ ), высокая гармоника ускоряющего напряжения ( $n$ ) накладывают довольно жесткие ограничения на точность стабилизации уровня магнитного поля и отклонения реального распределения среднего поля от изохронного ( $\Delta H < 1$  Э), поскольку смещения по фазе иона  $-\Delta \sin \phi \approx \pm 2\pi n N (\Delta H/H)$ .

Ускорение и накопление ионов с другими отношениями  $A/Z$  должно производиться при варьировании уровня и соответствующем изменении распределения среднего магнитного поля по радиусу без перестройки частоты ускоряющего напряжения, т.к. иначе это будет связано со смещением нулевой точки ( $R_n$ ).

Для всех рассмотренных способов накопления частиц на конечных радиусах изохронных циклотронов характерна одна проблема — усложняется процесс вывода пучка из ускорителя из-за малого прироста радиуса пучка за оборот. Радиальный размер накопленного пучка в машине определяет и требуемый радиальный заброс пучка в канал дефлектора или магнитный канал.

Здесь можно использовать регенеративный способ раскочки радиальных колебаний<sup>/7/</sup>, причем работающий импульсно. Для создания требуемых радиальных градиентов возбудителя и регенератора можно

применить т.н.  $\alpha$  — катушки ( $H = H_0 (1 - \alpha \frac{r - r_0}{r_0} + \dots)$ ), представляю-

щие собой токовые слои, позволяющие возбуждать квадрупольную компоненту магнитного поля необходимой величины.

Вывод накопительного пучка тяжелых ионов также можно осуществить методом перезарядки частиц на тонкой мишени<sup>/9/</sup>. Так, для ионов  $A_{40}^{+4}$ , ускоренных до конечного радиуса рассматриваемого циклотрона, равновесный заряд пучка после прохождения мишени составит +16. Выпуск такого пучка перезарядкой аналогичен используемому в настоящее время двухоборотному выводу частиц на изохронном циклотроне У-400<sup>/10/</sup>. Импульсный режим вывода тяжелых ионов в этом случае выполняется вращающейся с соответствующей частотой перезарядной углеродной мишенью. Таким образом, учитывая большие возможности циклотронного способа в получении высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов и методов накопления частиц на конечных радиусах ускорения, которые, конечно, не ограничиваются приведенными в данной работе, представляется обоснованным использовать циклотрон в качестве инжектора пучка ионов в накопительно-ускорительное кольцо.

Автор выражает благодарность Г.Г.Гульбеяну за полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Richardson R. — *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1979, NS-26, p.2436.
2. Pollock R.E. — *In: Ninth Int. Conf. on Cycl. and their Appl.*, 1987, Caen, p.731.
3. Schryber U. — *In: The Tenth Int. Conf. on Cycl. and their Appl.*, 1984, Michigan, p.195.
4. Абрисимов Н.К. и др. — *В сб.: Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, М.: Наука, 1973, с.94.
5. Joho W. — *Part. Accel.*, 1974, v.6, p.41.
6. Joho W. — *In: The Tenth Int. Conf. on Cycl. and their Appl.*, 1984, Michigan, p.611.
7. Finlay E.A. — *Nucl. Instr. and Meth.*, 1963, 18, 19, p.475.
8. Camplau J., Mennier R. — *Nucl. Instr. and Meth.*, 1981, 186, p.445.
9. Вялов Г.Н. и др. *ОИЯИ*, 1884, Дубна, 1964.
10. Оганесян Ю.Ц. и др. *ОИЯИ*, 9-11993, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 декабря 1987 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1.2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1.2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Козлов С.И.

9-87-896

### Накопление частиц в изохронном циклотроне

Представлены результаты численного моделирования процесса накопления частиц на конечных радиусах изохронного циклотрона с использованием ускоряющей дуантной системы, возбуждаемой коаксиальными резонаторами на  $3/4$  длины волны так, что нуль ускоряющего напряжения приходится на радиус вывода. Полученные результаты указывают на возможность накопления более чем ста оборотов пучка в радиальном интервале 15 мм. Используя вывод пучка импульсными катушками или вращающейся перезарядной мишенью, можно получить интенсивный импульсный пучок, пригодный для инжекции в накопительно-ускорительное кольцо.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Kozlov S.I.

9-87-896

### Particle Storage in Isochronous Cyclotron

Results of numerical simulation of storing process of particles on the final radius of the isochronous cyclotron are presented. The accelerating dee system excited by coaxial three quarter wave short-circuit line which has zero of accelerating voltage on extraction radius was used. The obtained results demonstrate a possibility of storing more than hundred turns of a beam in a 15 mm radial interval at the extraction radius. Extraction of this stack with fast coils or by the rotating stripping foils produces an intense pulsed beam. This beam is suitable for a further injection into the storage-accelerating ring.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987