

## Фазовая группировка пучка заряженных частиц при захвате в процесс ускорения в синхрофазотроне ОИЯИ

Г. С. Казанский, А. И. Михайлов, Н. Б. Рубин, А. П. Царенков

Излагается метод повышения захвата, в котором используется предварительное включение ВЧ-ускоряющего поля. Частота ускоряющего поля изменяется в соответствии с законом сворачивания орбиты в «квазибетатронном» режиме. Оцениваются точность и возможные погрешности при осуществлении данного режима и приводятся экспериментальные результаты.

Как известно, пучок частиц, инжектируемый в камеру синхрофазотрона, обладает определенным угловым и энергетическим разбросом \*. Это приводит к образованию достаточно сложной структуры пучка протонов в «квазибетатронном» режиме, что создает определенные трудности при осуществлении захвата частиц в синхрофазотронный режим ускорения. Известно, что из квазибетатронного режима в синхрофазотронный захватывается 17% инжектируемого пучка. Такая эффективность захвата определяется двумя основными факторами [1]:

1) частицы с большими амплитудами радиальных бетатронных колебаний неизбежно теряются в процессе захвата и формирования пучка ускоренных частиц в синхрофазотронном режиме;

2) в синхрофазотронный режим захватываются частицы из части кольцевого сгустка, определяемой фазовым размером области устойчивости. Для синхрофазотрона ОИЯИ область устойчивости составляет  $\sim 200^\circ$ .

В настоящей работе рассматривается метод увеличения эффективности захвата в синхрофазотронный режим за счет группировки частиц в азимутальном направлении [2]. Такая группировка связана с подтягиванием в процессе захвата доли частиц, находящихся в обыч-

ном режиме за пределами области устойчивости. Если создать область устойчивости, фазовый размер которой составит  $360^\circ$ , и перемещать ее по радиусу внутрь, а затем стянуть эту область до обычных азимутальных размеров, то при определенных условиях можно увеличить эффективность захвата в синхрофазотронный режим. Насколько известно, подобный режим изучался на Беватроне (США) \*.

Рассмотрим возможности осуществления этого режима. Равновесное движение частиц в ускорителях типа «Рейстрек» описывается следующими уравнениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_s}{dt} &= ec\beta_s \frac{V_0}{\Pi_s} \cos \varphi_s - \frac{2\pi}{\Pi_s \cdot c} \frac{\partial F_s}{\partial t}; \\ \frac{dE_s}{dt} &= \frac{E_s}{K_s} \left( -\dot{\omega} + \alpha_s \frac{\dot{B}_0}{B_0} \right); \\ \dot{\Pi}_s &= \alpha_s \Pi_s \left( \frac{\dot{E}_s}{E_s \beta_s^2} - \frac{\dot{B}_0}{B_0} \right), \\ z_s &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $E_s$  — равновесная энергия;  $B_0$  — магнитная индукция при  $z = 0$  и некотором фиксированном радиусе в секторах электромагнита;  $V_0$  — амплитуда ускоряющего напряжения;  $\varphi_s$  — равновесная фаза;  $F_s$  — поток через площадь орбиты;  $c$  — скорость света;  $\beta_s = \frac{V}{c}$ ;  $K_s = 1 + \frac{\alpha_s - 1}{\beta_s^2}$ ;  $\alpha_s = \frac{1}{I(1-n)}$  (здесь  $n$  — показатель спада магнитного поля;  $I = 1 + \frac{4L}{2\pi r_s}$ );  $\Pi_s = 2\pi r_s + 4L$  — периметр равновесной орбиты (здесь  $r_s$  — равновесный радиус;  $L$  — длина прямолинейного промежутка);  $\omega$  — частота ускоряющего поля.

\* Для синхрофазотрона ОИЯИ энергетический разброс  $\frac{\Delta W}{W} = 0,5\%$ ; угловой  $\alpha = \pm 5'$ .

\* Какими-либо расчетами группы Беватрона авторы настоящей работы не располагали.







составляет 14,3 Мгц/сек, в то время как скорость изменения частоты для синхрофазотронного режима в начальном участке равна 4,5 Мгц/сек. В точке В (рис. 2) должен быть осуществлен переход с одного закона частоты на другой. Это накладывает высокие требования на программный генератор частоты. Не менее жесткие требования предъявляются и к амплитуде ВЧ-напряжения, создающего ВЧ-электрическое поле на период режима фазовой группировки.

Рассмотрим более подробно движение частиц в сепаратрисе в режиме фазовой группировки. Первый интеграл фазового уравнения в общем случае имеет вид

$$Q = \frac{\dot{\varphi}}{\omega_s \sqrt{\frac{eV_0 K_s}{\pi E_s}}} = V \sqrt{(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s) - (\sin \varphi_{нач} - \varphi_{нач} \cos \varphi_s) + Q_{нач}^2}, \quad (6)$$

где  $Q_{нач}$  и  $\varphi_{нач}$  — начальные значения  $Q$  и  $\varphi$ ;  $\varphi$  и  $\varphi_s$  — текущая и равновесная фазы.

На рис. 3 представлены сепаратриса при  $V_0 = 10 \text{ кэ} = \text{const}$  и фазовые траектории дви-

можно найти положение частиц в фазовой области через промежуток времени, равный  $\tau$ , так как

$$\int_{\varphi_{нач}}^{\varphi_{кон}} \frac{d\varphi}{\sqrt{\sin \varphi - \sin \varphi_{нач} + Q_{нач}^2}} = \int_0^{\tau} \omega_s \sqrt{\frac{eV_0 K_s}{\pi E_s}} dt. \quad (7)$$

Можно задать закон изменения  $eV_0$  в функции времени и определить значение  $\varphi_{кон}$  из выражения (7) или, задав значение  $\varphi_{кон}$  для частиц,двигающихся по траектории, близкой к сепаратрисе, определить значение  $eV_0$ . На рис. 3

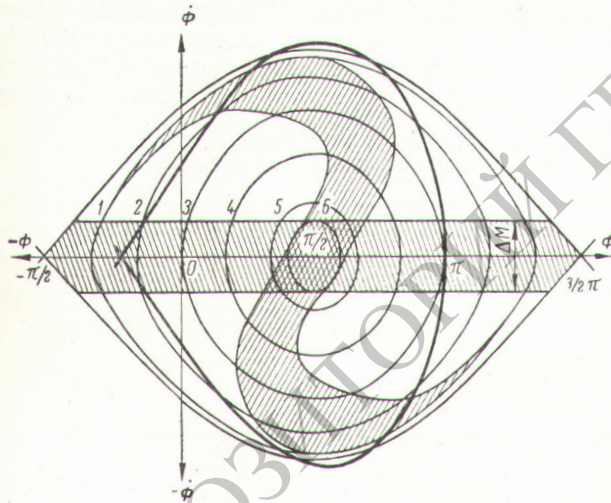


Рис. 3. Сепаратриса и фазовые траектории движения частиц в режиме фазовой группировки.

жения частиц в режиме фазовой группировки ( $\varphi_s = \frac{\pi}{2}$ ). На этом же рисунке показана область набора мгновенных орбит ( $\Delta M$ ), занимающая по радиусу 20 см к моменту включения ВЧ-поля. Интересно определить расположение частиц к моменту захвата в синхрофазотронный режим. Воспользовавшись уравнением (6),

показано положение пучка в момент времени  $t = \tau$  при  $V_0 = 10 \text{ кэ} = \text{const}$ . Как видно из рисунка, к моменту захвата в синхрофазотронный режим частицы в основном будут сгруппированы в районе равновесной фазы  $\varphi_s = \frac{\pi}{2}$ . Движение частиц в узкой области вблизи сепаратрисы не рассматривалось. Частицы, расположенные около угловых точек сепаратрисы ( $-\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ ), очевидно, сместятся незначительно, а частицы с фазами  $-\frac{\pi}{2}$  и  $\frac{3\pi}{2}$  останутся в идеальном случае неподвижными.

При расчете начальные условия брались в точках, обозначенных цифрами 1, 2, 3, ..., ( $\varphi_{нач} = +\frac{\Delta M}{2}$ ), и в соответствующих точках с теми же фазами  $\varphi_{нач}$ , но имеющих значения  $\dot{\varphi}_{нач} = -\frac{\Delta M}{2}$ .

Фазовые траектории одинаковы для «сходственных» точек, различающихся знаком  $\varphi_{нач}$ . В конечный момент ( $t = \tau$ ) частицы из каждой пары дают границы положения пучка вдоль своей траектории. Максимальное число частиц захватится в режим ускорения в том случае, если в момент времени  $t = \tau$  скачком увеличить  $V_0$  до 25 кэ и мгновенно изменить фазу на  $\sim 30^\circ$ . (Положение области устойчивости для синхрофазотронного режима показано на этом же рисунке жирной линией.) На рис. 4 представлена зависимость радиального положения частиц, имеющих различные начальные условия в функции времени. Нумерация кри-



вых соответствует нумерации начальных условий на рис. 3. При расчете учитывалось смещение равновесной орбиты (3) во времени.

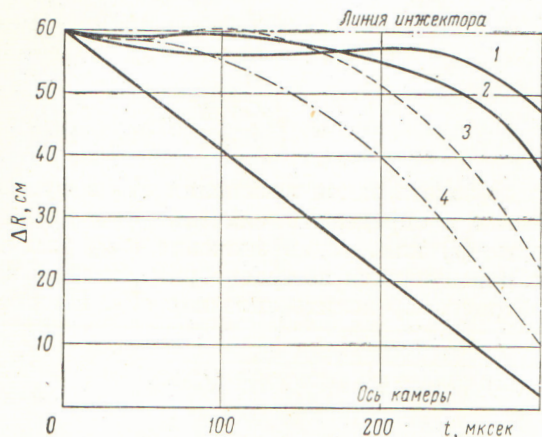


Рис. 4. Зависимость радиального положения частиц с различными начальными условиями в режиме фазовой группировки. Прямая линия показывает радиальное сжатие орбиты частиц при выключенном ВЧ-напряжении.

Как видно из рисунка, частицы, имеющие указанные начальные условия, в режиме фазовой группировки будут двигаться по орбитам вблизи инжектора. Поэтому выбор амплитуды

пированным пучком и, как следствие этого, к большим потерям частиц на инжекторе. В связи с этим настройка режима фазовой группировки сводится к выбору  $V_{0нач}$  и закона изменения  $V_0$  в течение времени группировки.

Для исследования режима фазовой группировки в группе электроники Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) ОИЯИ была разработана специальная аппаратура, включающая частотно-модулированный генератор частоты с большим быстродействием по тракту модуляции (запаздывание в тракте модуляции равно 10 мксек) и элементы, обеспечивающие программное управление частотой и амплитудой ВЧ-поля в режиме фазовой группировки и перехода в синхрофазотронный режим. Временная синхронизация работы отдельных элементов аппаратуры иллюстрируется импульсной диаграммой, представленной на рис. 5.

Работа по проверке влияния фазовой группировки частиц на захват в синхрофазотронный режим проводилась при длительности ускорения 30 мсек. Захват частиц в синхрофазотронный режим с фазовой группировкой сравнивался с захватом без нее. Чтобы исключить ряд нестабильностей, была проведена многочисленная серия статистических измерений. Учитывались лишь те циклы ускорения, при которых значения частот начального момента

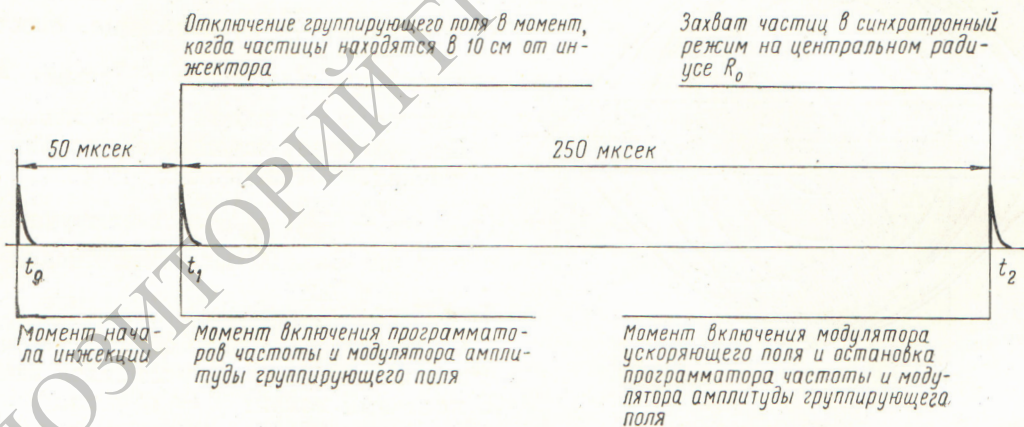


Рис. 5. Временная диаграмма работы аппаратуры.

ВЧ-поля в режиме группировки весьма критичен с точки зрения эффективности захвата в синхрофазотронный режим. С одной стороны, необходимо выбрать  $V_0$  достаточно большим, чтобы частицы за время фазовой группировки успели расположиться около равновесной фазы. С другой стороны, чрезмерное увеличение  $V_0$  ведет к увеличению области, занимаемой сгруп-

группирующего электрического поля и момента начала синхрофазотронного режима поддерживались с точностью  $\pm 0,1\%$  от найденных оптимальных значений. Оптимальное начальное значение и закон изменения амплитуды ВЧ-напряжения в режиме фазовой группировки выбирались по максимуму захвата частиц в синхрофазотронный режим ускорения.



Наилучшие результаты получены при линейном изменении амплитуды от  $V_{\text{нач}} = 8$  кВ до  $V_{\text{окон}} = 12$  кВ. По окончании режима фазовой группировки амплитуда  $V_0$  скачком увеличивалась до 20 кВ (амплитуда 20 кВ является оптимальной для синхрофазотронного режима ускорения).

В результате проведенных работ установлено, что использование описанного метода фазовой

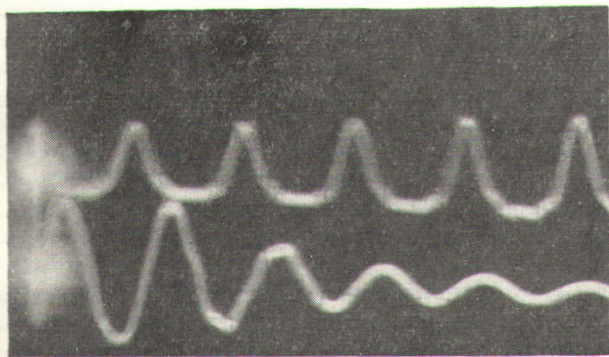


Рис. 6 Форма сгруппированного пучка (верхний луч) в момент выключения бунчирующего поля (нижний луч).

группировки частиц на синхрофазотроне ОИЯИ в настоящее время позволяет повысить захват частиц в синхрофазотронный режим на 30%. На рис. 6 представлена оциллограмма, на которой виден сгруппированный пучок ( $\theta \approx 270^\circ$ ) в момент выключения группирующего электрического поля.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Электрическое поле, образующееся в камере ускорителя во время инжектирования частиц, создает эффект фазовой группировки, приводящий к увеличению эффективности захвата в синхрофазотронный режим.

2. Эффективность фазовой группировки зависит от ширины энергетического спектра и углового разброса инжектируемого пучка.

3. Режим фазовой группировки частиц относительно критичен к настройке. Так, отклонение частоты в этом режиме на 0,3% от заданного закона практически уже не дает выигрыша в захвате.

4. Полученные результаты на наш взгляд полезны для дальнейших работ в этом направлении и могут быть использованы в ускорителях, располагающих длительной и многооборотной инжекцией.

Авторы благодарят А. Б. Кузнецова за полезные обсуждения и советы, а также сотрудников радиотехнического отдела ЛВЭ ОИЯИ Г. А. Бокова, Г. П. Пучкова, С. Н. Юрова, принимавших участие в работах по исследованию рассмотренного режима работы ускорителя.

Поступила в Редакцию 24/VI 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Рабинович. «Труды ФИАН СССР», X (1958).
2. Г. С. Казанский и др. «Атомная энергия», 14, 153 (1963).
3. Н. Б. Рубин. Диссертация, ОИЯИ, 1961.

УДК 621.384.611.1

## Усовершенствования, введенные на фазотроне ЦЕРНА за последние 3 года\*

П. Лапостолл

Европейская организация по ядерным исследованиям, Женева

Описаны меры, введение которых позволило повысить интенсивность фазотрона ЦЕРНА в 5—6 раз. Обсуждается применение аргона в газе ионного источника, использование постоянного напряжения смещения на центральном вспомогательном дуанте, модуляция амплитуды ВЧ-напряжения, применение вибрирующей мишени и т. д. Приводится программа дальнейших экспериментов.

\* Перевод с английского.

В течение последних трех лет на фазотроне ЦЕРНА было сделано несколько усовершенствований. При этом в конструкцию самой машины существенных изменений не вносилось, однако благодаря этим усовершенствованиям интенсивность фазотрона выросла в 5—6 раз (рис. 1), и результаты работы могут представлять интерес, хотя и не все детали