

РАСЧЕТ УСКОРЕНИЯ И ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

С. А. Костромин, Л. М. Онищенко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Выполнен расчет вывода пучка регенеративным методом из фазотрона ОИЯИ при помощи специально созданной компьютерной программы. Предварительные расчеты показали, что эффективность вывода не может превышать 40 %.

The proton beam regenerative extraction from the JINR Phasotron is examined with the specially prepared computer code for beam dynamic simulation. The beam extraction efficiency in the preliminary calculations was found to be more than 40%.

PACS: 29.20.-c

Для вывода пучка из синхроциклотрона обычно применяется регенеративный метод радиальных колебаний [1, 2]. В этом методе используются локальные (по азимуту и радиусу) неоднородности магнитного поля для параметрического резонансного возбуждения (раскачки) радиальных колебаний вблизи равного единице значения частоты радиальных колебаний. Теория метода в значительной степени развита трудами В. П. Дмитриевского [3, 4]. Из [4], в частности, следует, что соответствующим выбором параметров неоднородностей магнитного поля (обычно их две: возбудитель Р — область с отрицательным градиентом магнитного поля и регенератор R — область с положительным градиентом магнитного поля) можно добиться неустойчивости радиальных колебаний при сохранении устойчивости аксиальных. При этом частота радиальных колебаний смещается в область резонанса $\nu_r \approx 1$, а амплитуда увеличивается по экспоненциальному закону с инкрементом λ , который определяется уравнением

$$\operatorname{ch} \lambda = \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) - \frac{T_P + T_R}{2\nu} \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) + \frac{T_P T_R}{2\nu^2} \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2, \quad (1)$$

где ν — частота радиальных колебаний; $T_{P,R} = \frac{r \partial B}{B \partial r} \Delta \varphi_{P,R}$ — «силы» возбудителя и регенератора; $\vartheta_1 = \nu \varphi$, $\vartheta_2 = \nu(2\pi - \varphi)$, φ — угловое расстояние между возбудителем и регенератором.

Уравнение (1) используется для предварительного выбора параметров системы раскачки.

Конечно, окончательный выбор параметров системы вывода и определение ее эффективности требует проведения численных расчетов и моделирования.

На рис. 1 показано размещение системы вывода в вакуумной камере фазотрона. Элементы системы вывода (возбудитель, регенератор и секции канала) могут перемещаться вдоль радиуса независимо друг от друга. Канал вывода состоит из четырех секций. Первая секция — железно-токовая с толщиной септума 4 мм. На рис. 2 даны основные параметры возбудителя и регенератора.

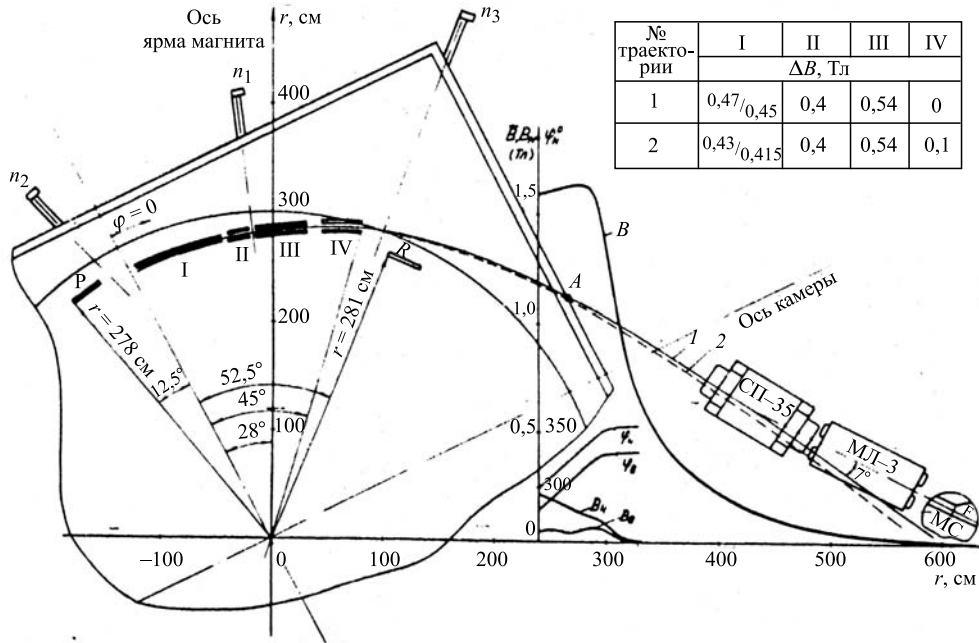


Рис. 1. Схема размещения системы вывода протонного пучка из фазотрона. P — возбудитель; R — регенератор; I, II, III, IV — секции канала вывода

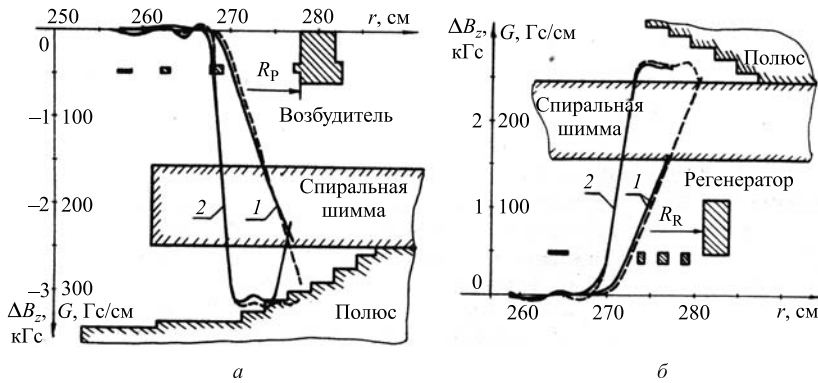


Рис. 2. Магнитное поле возбудителя (а) и регенератора (б) (1) и его градиент (2)

Ускорение пучка, а также его характеристики при забросе на вход выводной системы рассчитывались по специально созданной программе для расчета динамики частиц в циклотронах и фазотронах.

В программе используются следующие полные уравнения движения [5] заряженной частицы в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\ddot{r} &= r\dot{\varphi}^2 + \frac{qc^2}{E} \left[\varepsilon_r - r\dot{\varphi}B_z + \dot{z}B_\varphi - \frac{\dot{r}}{c^2}(r\dot{\varepsilon}_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right], \\ \ddot{z} &= \frac{qc^2}{E} \left[\varepsilon_z + r\dot{\varphi}B_r - \dot{r}B_\varphi - \frac{\dot{z}}{c^2}(r\dot{\varepsilon}_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right], \\ \ddot{\varphi} &= -\frac{2\dot{r}\dot{\varphi}}{r} + \frac{qc^2}{rE} \left[\varepsilon_\varphi + \dot{r}B_z - \dot{z}B_r - \frac{r\dot{\varphi}}{c^2}(r\dot{\varepsilon}_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right],\end{aligned}$$

где r, φ, z — координаты частицы; $B_r, B_\varphi, B_z, \varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z$ — компоненты магнитного и электрического полей; q — заряд частицы; c — скорость света; E — полная энергия частицы, точка над координатами означает дифференцирование по времени. Для интегрирования уравнений используется метод Рунге–Кутты четвертого порядка. Магнитное поле вводится в программу в виде карты $B_z(r, \varphi)$ в средней плоскости ускорителя. Ускоряющее поле описывается выражением

$$\varepsilon_{\varphi, z}^{\text{RF}} = \varepsilon_{\varphi, z}^{\text{max}} \cos \left(2\pi \int_0^t f(t) dt + \psi \right),$$

где $f(t)$ — частотная программа фазотрона (для случая циклотрона это константа); ψ — стартовая фаза частицы. Для расчета амплитуд $\varepsilon_\varphi^{\text{max}}, \varepsilon_z^{\text{max}}$ используется аналитическое представление [6]. На каждом шаге интегрирования частица приобретает или теряет энергию в соответствии со знаком выражения

$$\Delta w = q(\dot{r}\varepsilon_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \Delta t,$$

где Δt — шаг интегрирования. Файл исходных данных программы содержит карту магнитного поля, описание геометрии и частотной программы ускоряющей системы, а также стартовое распределение частиц в восьмимерном фазовом пространстве $(r, dr/d\varphi, z, dz/d\varphi, \varphi, \psi, f, w)$, где $(dr/d\varphi, dz/d\varphi)$ — производные поперечных координат по азимутальному углу φ . Стартовое положение частиц образует один банч.

В карту магнитного поля были внесены возмущения, создаваемые возбудителем и регенератором в зоне вывода пучка.

Банч из 2000 частиц ускорялся (без учета пространственного заряда пучка) от радиуса ~ 100 см (начальный набор частиц (рис. 3) был взят из расчета ускорения при первых 3000 оборотах с учетом сил пространственного заряда пучка) до места раскачки радиальных колебаний и заброса в выводную систему. Вертикальный профиль пучка показан на рис. 4.

На рис. 5 показана зависимость частоты обращения первого иона в банче от номера оборота и частотная программа фазотрона. Хорошо видны синхротронные колебания, период которых составляет ~ 600 оборотов.

На рис. 6 показаны рассчитанные на основе анализа карты поля, а также анализа вертикального движения частиц при ускорении частоты вертикальных бетатронных колебаний, расчетные данные по Q_z согласуются с точностью $\sim 10\%$.

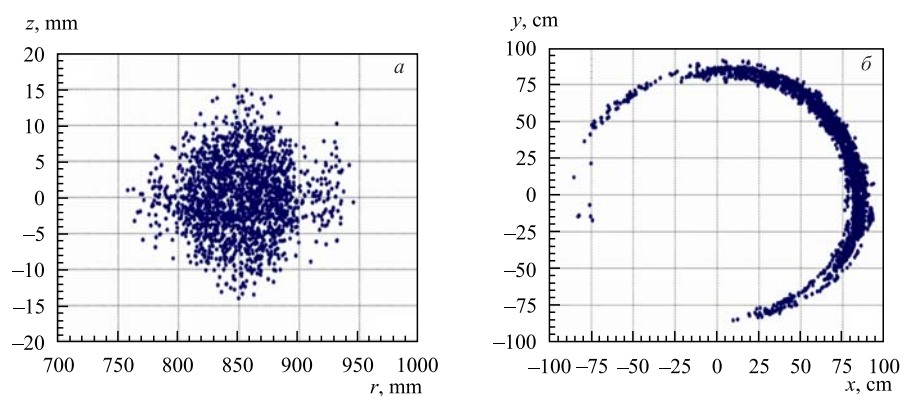


Рис. 3. Начальные данные банча частиц на плоскостях (r, z) (а) и (x, y) (б), используемые в расчете ускорения

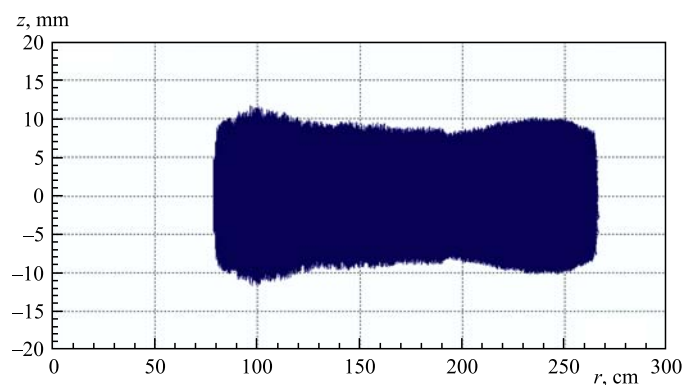


Рис. 4. Вертикальный профиль пучка при ускорении. z -координаты частиц снимались один раз за оборот

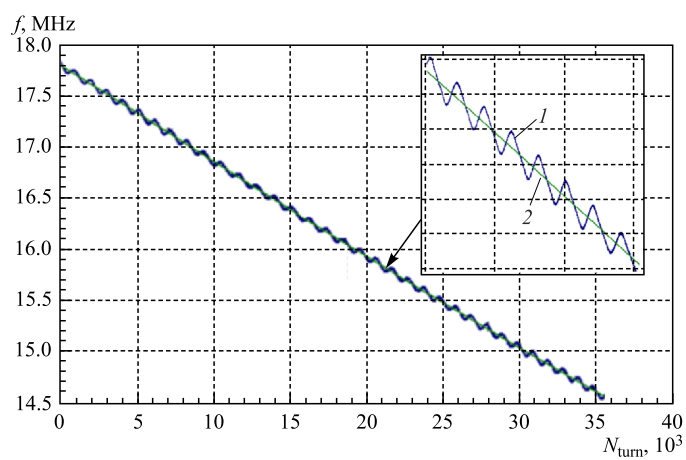


Рис. 5. Частота обращения 1-го иона в банче (1) в зависимости от номера оборота и частотная программа фазотрона (2)

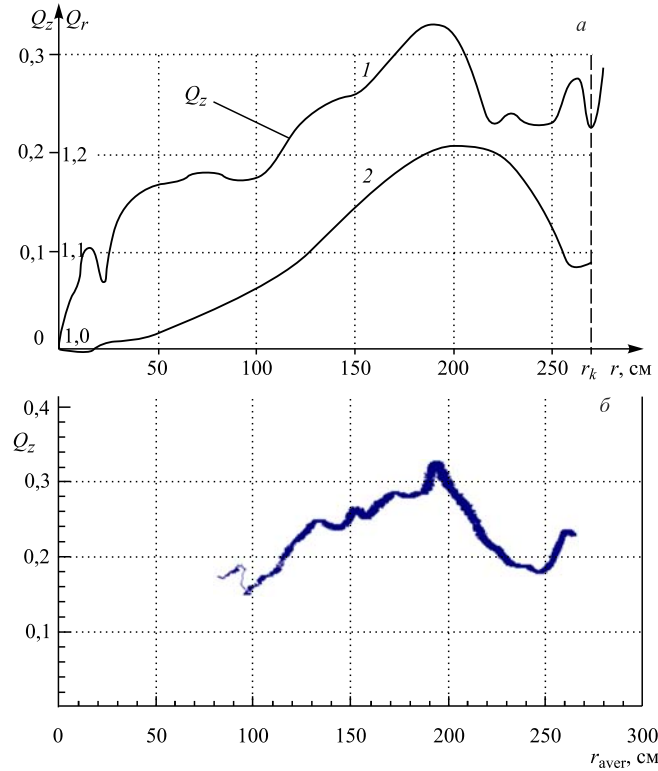


Рис. 6. Зависимости рассчитанных на основе анализа карты поля (а), а также анализа вертикального движения частиц при ускорении (б) частот вертикальных бетатронных колебаний от среднего радиуса орбиты

Для получения портрета пучка на входе в железно-токовую секцию (ЖТС) (рис. 7–10) моделировалось ускорение банча частиц до конечных радиусов. Затем проводился анализ радиального положения каждой частицы на азимуте входа в ЖТС: она попадала на железно-токовую пластину либо на вход ЖТС, либо на ее септум. Если радиус частицы

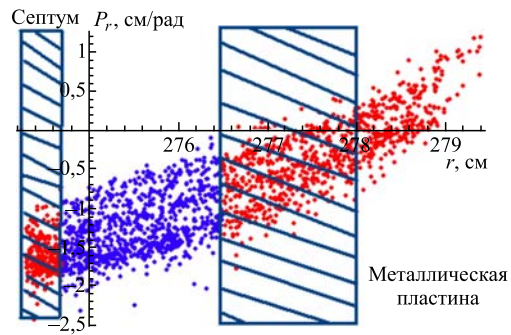


Рис. 7. Положение частиц на радиальной фазовой плоскости, которая соответствует азимуту входа в систему вывода

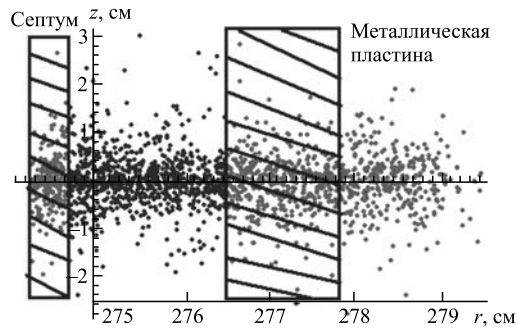


Рис. 8. Положение частиц на плоскости $r-z$, которая соответствует входу в ЖТС

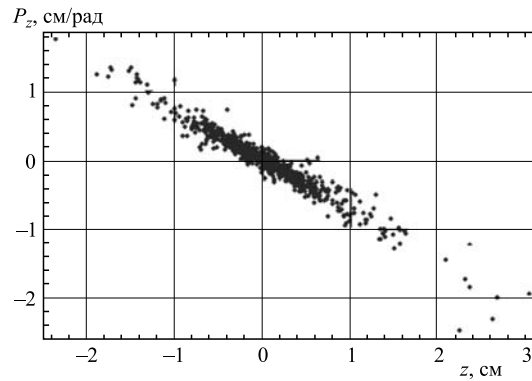


Рис. 9. Положение частиц на аксиальной фазовой плоскости на входе в ЖТС

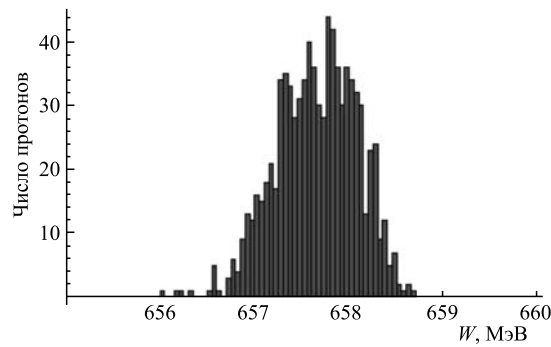


Рис. 10. Энергетическое распределение частиц, попавших в апертуру ЖТС

был меньше радиуса расположения септума, то она ускорялась дальше до попадания в одну из указанных областей.

Из 2000 частиц, которые принимались в расчет, после примерно 37000 оборотов попала в сепаратрису и была заброшена на вход в систему вывода 1951 (98%) частица. 49 (2%) частиц в процессе ускорения и заброса выпали из сепаратрисы, возможно, из-за возбуждения слишком больших радиальных амплитуд. Положение частиц на радиальной

фазовой плоскости, которая соответствует входу в ЖТС, показано на рис. 7. Из 1951 частицы, заброшенной на плоскость входа в систему вывода, 857 (43 % от стартовавших в расчете) попали в апертуру ЖТС, 241 (13 %) частица оказалась на торце септума и 814 (42 %) частиц потерялись на противоположной пластине ЖТС.

Поперечные среднеквадратичные эмиттансы пучка, попавшего в апертуру ЖТС, оказались равными $\varepsilon_r = 25\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, $\varepsilon_z = 8\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Таким образом, эффективность ускорения в фазотроне ОИЯИ можно оценить как $\sim 40\%$. Для полной оценки эффективности ускорения и вывода необходимо провести расчет прохождения пучка через выводную систему фазотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Le Couter* // Proc. Phys. Soc. B-64. 1951. P. 1073.
2. *Дмитриевский В. П. и др.* // ПТЭ. 1957. Т. 1. С. 11.
3. *Дмитриевский В. П.* Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. 1953.
4. *Дмитриевский В. П. и др.* ОИЯИ, Р9-3434-1. Дубна, 1967.
5. *Кольга В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в ускорителях на ЭВМ // Материалы междунар. шк. молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979. С. 300.
6. *Hazewindus N. et al.* The Magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central Region // Nucl. Instr. Meth. 1974. V. 118. P. 125.