

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ДИНАМИКУ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ

*С. А. Костромин<sup>а</sup>, Г. А. Карамышева<sup>а</sup>, Е. В. Самсонов<sup>а</sup>, И. Йонген<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Фирма ИВА, Лювен-ла-Нев, Бельгия

Действие магнитных компонент поля, создаваемого ВЧ-системой при работе циклотрона, может приводить к изменению поперечных размеров пучка и фазовой протяженности сгустков при ускорении. Как следствие, могут измениться фазовые портреты пучка на входе в дефлектор, а значит, и эффективность выводной системы ускорителя. Получены выражения для компонент магнитного поля от ВЧ-системы в окрестности медианной плоскости циклотрона. При помощи расчетов показано влияние этого поля на параметры пучка при ускорении и на входе в электростатический дефлектор. Для протонного циклотрона С235 величина изменения параметров пучка приблизилась к 50 %.

Magnetic components of HF-field in a cyclotron can lead to change of the transverse beam size as well as bunch phase width during the acceleration. As a consequence the beam phase portraits at entrance of the electrostatic deflector of extraction system can be distorted and efficiency of the extraction system changed. Analytical description of the magnetic field components from HF-system is obtained in a vicinity of a cyclotron median plane. Influence of this field on the beam parameters during acceleration and at the deflector entrance is shown by numerical simulation of the beam dynamics in C235 cyclotron. The value of changes in the parameters of beam can be estimated as up to  $\sim 50\%$  for this machine.

PACS: 29.20.-c; 29.25.-t; 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность вывода пучка — одна из важнейших характеристик любого циклического ускорителя. Поэтому оптимизация вывода является важным вопросом в процессе разработки, а затем и запуска циклотрона. В НЭОНУ ЛЯП ОИЯИ создан комплекс программных кодов для расчетов динамики пучка в циклотронах, которые позволяют рассчитывать и затем учитывать в своей работе магнитные поля, создаваемые ВЧ-системой циклотрона при своей работе.

Учет этих полей в расчете приводит к изменению поперечных размеров пучка и фазовой протяженности сгустков при ускорении, следовательно, изменяется портрет пучка на входе в электростатический дефлектор выводной системы циклотрона.

## 1. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ПОПРАВКИ К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ОТ ВЧ-СИСТЕМЫ

Меллер и Маарт показали [1], что в изохронном циклотроне при ускорении пучка выполняется условие

$$V(r)\Delta\phi(r) \cos(\phi_c) = \text{const}, \quad (1)$$

где  $V$  — ускоряющее напряжение на дуанте;  $\Delta\phi$  — фазовая протяженность банча частиц;  $\phi_c$  — фаза центральной частицы банча. Авторы показали, что выполнение условия (1) обеспечивается действием  $B_z$ -компоненты магнитного поля в средней плоскости ускорителя, возникающей при работе ускоряющей системы.

Изучение влияния магнитного поля, которое создает ВЧ-система, проведено на примере расчета динамики ускорения пучка в изохронном циклотроне С235 [2], созданном бельгийской фирмой ИВА для протонной терапии. В этой машине фазовая протяженность банча к концу ускорения должна быть существенно меньше, чем в центре циклотрона из-за значительного роста ускоряющего напряжения с радиусом (рис. 1).

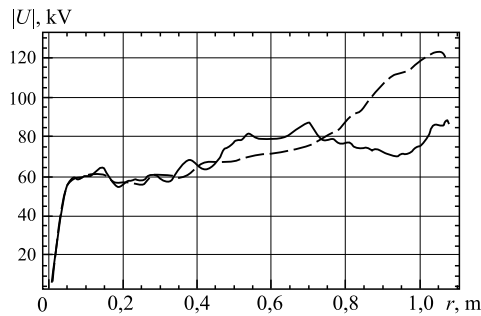


Рис. 1. Зависимость ускоряющего напряжения от радиуса на двух кромках дуанта циклотрона С235

Для численного изучения вопроса и учета эффекта при расчете ускорения пучка необходима карта  $B_z$ -компоненты магнитного поля от ВЧ-системы. Ее можно получить, используя карты компонент электрического поля ВЧ-системы  $E_r$  и  $E_\phi$ . Ниже представлены аналитические выражения для  $B_z$ -компоненты через  $E_r$  и  $E_\phi$ .

Электрическое поле в средней плоскости циклотрона зависит от времени и может быть выражено как

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, \varphi, z, t) = \mathbf{E}(r, \varphi, 0, t) &= \{E_r(r, \varphi) \cos \psi, E_\varphi(r, \varphi) \cos \psi, 0\} \equiv \\ &\equiv \{E_r \cos \psi, E_\varphi \cos \psi, 0\}, \end{aligned}$$

где  $E_r(r, \varphi)$  и  $E_\varphi(r, \varphi)$  могут быть взяты из расчетов ускоряющей системы,

$$\psi = h(2\pi f_{\text{rev}} t_i + \xi_i + \phi_k)$$

— фаза ускоряющего поля для каждой отдельно взятой из банча ускоряемой частицы;  $t_i$  — время для каждой частицы;  $\xi_i$  — начальная фаза каждой частицы;  $\phi_k$  — начальная фаза ВЧ-напряжения на дуантах;  $f_{\text{rev}}$  — резонансная частота обращения.

$$hf_{\text{rev}} = f_{\text{rf}},$$

где  $f_{\text{rf}}$  — частота работы ускоряющей системы;  $h$  — номер гармоники ускорения. Производная по времени электрического поля равна

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \dot{\psi} = 2\pi hf_{\text{rev}} = 2\pi f_{\text{rf}}.$$

Из уравнений Максвелла для электромагнитного поля циклотрона в объеме около средней плоскости  $z = 0$ :

$$B_z = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} E_\varphi - \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} \right] \sin \psi \frac{1}{\dot{\psi}} \equiv B_z^{\text{rf}}. \quad (2)$$

Это дополнительное магнитное поле  $B_z^{\text{rf}}$ , создаваемое ускоряющей системой в средней плоскости циклотрона. В окрестности средней плоскости ускорителя выражения для компонент магнитного поля выглядят так:

$$B_z(z) = B_z^{\text{map}}(0) + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} E_\varphi - \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} \right] \sin \psi \frac{1}{\dot{\psi}} - \frac{z^2}{2} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial \varphi^2} \right], \quad (3)$$

$$B_r(z) = z \frac{\partial B_z}{\partial r}(0) = \left[ \frac{\partial B_z^{\text{map}}}{\partial r}(0) + \left( -\frac{1}{r^2} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_r}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} E_\varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} \right) \sin \psi \frac{1}{\dot{\psi}} \right] z, \quad (4)$$

$$B_\varphi(z) = \frac{z}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \varphi}(0) = \left[ \frac{\partial B_z^{\text{map}}}{\partial \varphi}(0) + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial \varphi \partial r} \right) \sin \psi \frac{1}{\dot{\psi}} \right] \frac{z}{r}, \quad (5)$$

где  $B_z^{\text{map}}(0) = B_z(r, \varphi, 0)$  — вертикальная компонента магнитного поля в средней плоскости циклотрона, полученная из измерений или расчетов магнитной системы.

Таким образом, величина магнитного поля, которую частица «видит» во время ускорения, зависит от ее фазы по отношению к ускоряющему напряжению на дуантах. Это может приводить к уменьшению или увеличению фазовой протяженности банча во время ускорения.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ С235

Банч из 1000 протонов с начальными амплитудами радиальных колебаний до 2 мм (эмиттанс  $\sim 2\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ) и фазовой протяженностью  $\sim 45^\circ$  ВЧ был ускорен от радиуса 6 см до входа в электростатический дефлектор, расположенный на радиусе 105 см. Сравнение результатов расчета ускорения с учетом поля от ВЧ-системы  $B_z^{\text{ВЧ}}$  и без него показано на рис. 2–5.

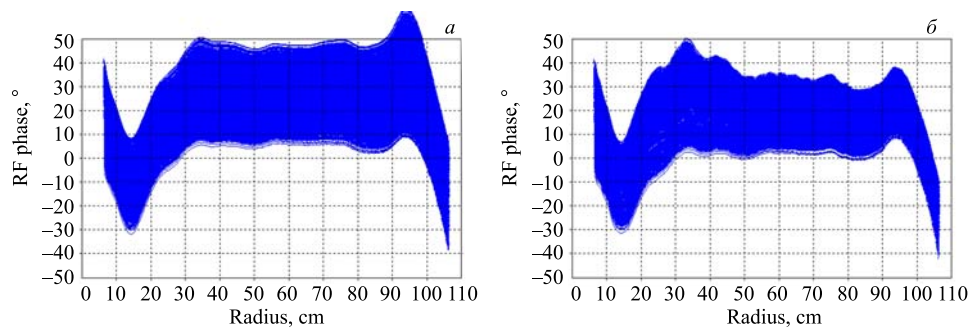


Рис. 2. Фазовое движение банча протонов в зависимости от среднего радиуса орбиты: а) без учета  $B_z^{BЧ}$ ; б) с учетом  $B_z^{BЧ}$

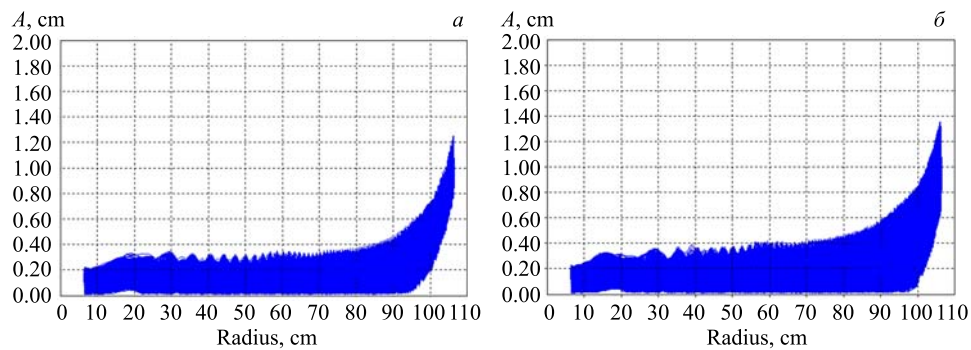


Рис. 3. Амплитуды радиальных колебаний в зависимости от среднего радиуса орбиты: а) без учета  $B_z^{BЧ}$ ; б) с учетом  $B_z^{BЧ}$

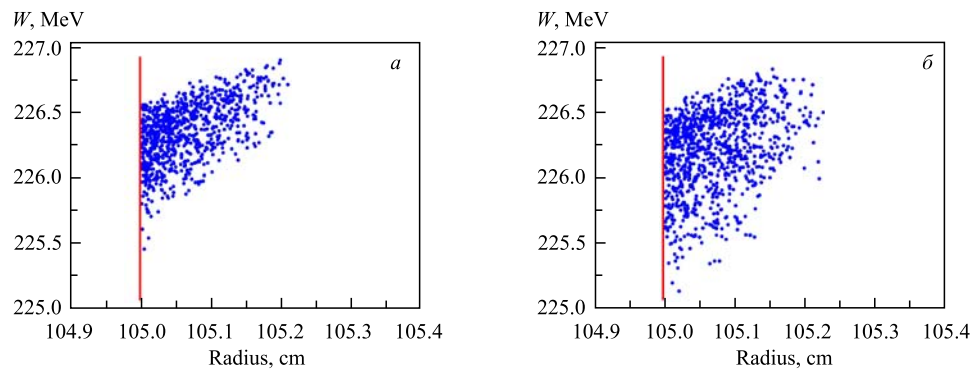


Рис. 4. Положение протонов на плоскости  $(r, W)$ , на входе в электростатический дефлектор: а) без учета  $B_z^{BЧ}$ ; б) с учетом  $B_z^{BЧ}$

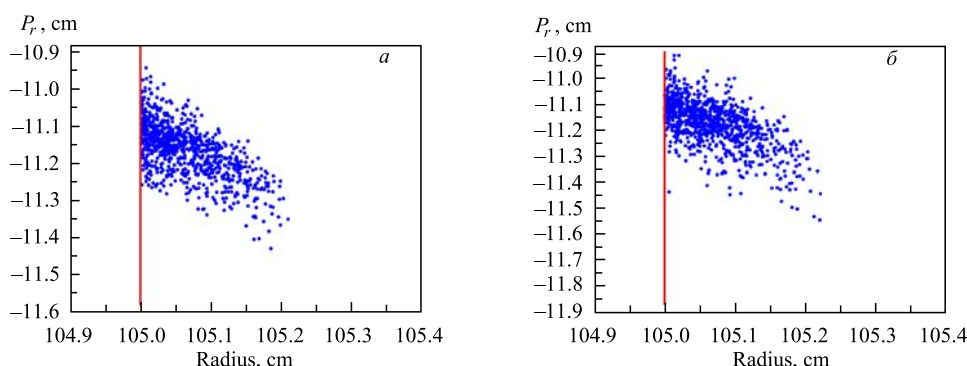


Рис. 5. Положение протонов на фазовой плоскости  $(r, P_r)$ , на входе в электростатический дефлектор: а) без учета  $B_z^{BЧ}$ ; б) с учетом  $B_z^{BЧ}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены аналитические выражения для компонент магнитного поля, создаваемого ВЧ-системой циклотрона при ускорении пучка, которые используют карты электрических полей, полученные предварительно при расчете этой системы. Учет  $B_z^{BЧ}$  как поправки к основному магнитному полю ускорителя позволил оценить эффект фазовой компрессии в циклотроне С235.

Результаты расчетов подтвердили существование интеграла движения (1) с точностью  $\sim 5\%$ : фазовая протяженность банча частиц при ускорении обратно пропорциональна величине ускоряющего напряжения на дуантах, зависящего от радиуса.

Параметры пучка на входе в электростатический дефлектор представлены в таблице.

**Параметры пучка на входе в электростатический дефлектор**

Начальный ( $r \sim 5-6$ см) эммиттанс $\varepsilon_r, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	Параметры на входе в дефлектор			
	$\varepsilon_r, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$		$\Delta W/W, \pm\%$	
	Без учета $B_z^{BЧ}$	С учетом $B_z^{BЧ}$	Без учета $B_z^{BЧ}$	С учетом $B_z^{BЧ}$
2,25	1,00	1,57	0,21	0,27

Несмотря на уменьшение ( $\sim 40\%$ ) фазовой протяженности банча к концу ускорения, качество фазовых портретов пучка на входе в дефлектор ухудшилось. Можно предположить, что это произошло из-за увеличения амплитуд радиальных колебаний (см. рис. 3). Величина изменения параметров пучка на входе в электростатический дефлектор приблизилась к 50%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muller R. W., Mahrt R. Phase Compression and Phase Dilatation in the Isochronous Cyclotron // Nucl. Instr. Meth. 1970. V. 86. P. 241–244.
2. Jongen Y. et al. The Proton Therapy System for the NPTC // 4th Eur. Conf. on Accelerators in Applied Research and Technology. Zurich, 1995.