

С 345

Р-931

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 3806

В.С.Рыбалко

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ МЕТОДОВ
ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ УСКОРИТЕЛЕЙ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 052 - электрофизика

**Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук**

Дубна 1968

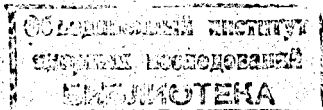
9 - 3806

В.С.Рыбалко

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ МЕТОДОВ
ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ УСКОРИТЕЛЕЙ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Специальность 052 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук



Накопленные опытные данные и современные теоретические представления о ядерных процессах убедительно показывают, что задача существенного повышения интенсивности ускорителей в области энергий до 1 Гэв является весьма актуальной. В последнее время исследование новых возможностей, которые заложены в неоднородных структурах стационарных магнитных полей, являлось одним из основных направлений развития ускорителей в этой области энергий/1/.

В Лаборатории ядерных проблем под руководством чл.-корреспондента АН СССР В.П.Джелепова проводится широкая программа научно-исследовательских работ по изучению проблем, связанных с созданием сильноточных ускорителей в основном в этом диапазоне энергий /2,3/.

Использование сильноточных ускорителей типа РЦ как физических установок и нормальная эксплуатация их возможны только при практически полном выводе частиц из камеры ускорителя (коэффициент вывода $K \geq 0,9$). Поэтому одной из основных проблем, возникающих при разработке таких ускорителей, является проблема высокоэффективного вывода пучка. В ускорителях с пространственной вариацией имеются возможности для создания выводных систем, которые обеспечат значительно больший коэффициент выпуска частиц, чем достигнутый на синхротронах/4/. Это связано, в основном, со следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, в ускорителях типа РЦ при тщательной отработке центральной оптики и магнит-

ного поля в резонансных зонах можно обеспечить более высокое качество внутреннего пучка. Во-вторых, использование в ускорителях этого типа крутоспиральных структур магнитного поля приводит к появлению достаточно сильных нелинейных резонансов радиальных колебаний, которые могут быть использованы в качестве эффективного механизма заброса частиц в магнитный канал. Так, в проекте циклотрона $m c^2$ Окриджской национальной лаборатории (США) для вывода предполагалось использовать механизм нелинейного резонанса $Q_r = 8/4$. Эксперименты, выполненные на электронной модели, показали, что в этом случае можно получить коэффициент вывода пучка, близкий к $0,95/5/$.

Однако для осуществления эффективных резонансных методов вывода частота радиальных колебаний на конечных радиусах должна быть близкой к значениям $Q_r = 1,3/2,2$, что в случае изохронных циклотронов накладывает довольно жесткие условия на выбор предельной энергии ускоренных частиц. При проектировании ускорителей (особенно ускорителей, основанных на реконструкции существующих установок) эти условия не всегда выполнимы.

В реферлируемой диссертации, которая является обобщением работ, выполненных автором в период 1964-1967 г.г. совместно с В.П.Дмитриевским, В.В.Кольгой, Н.Л. Заплатиным, С.Б.Ворожцовым, Л.А.Саркисяном и Т.М.Прилипко, описаны исследования резонансных методов вывода, причем наиболее детально рассматриваются выводные системы для ускорителей с нерезонансным значением Q_r на конечных радиусах.

Основные результаты описанных в диссертации исследований опубликованы в работах ^{6,9,10/}. Часть результатов была доложена на Международной конференции по изохронным циклотроном в Гатлинбурге (США,1966).

Диссертация состоит из 4 глав.

1. В первой главе рассматриваются некоторые общие вопросы теории движения частиц в ускорителях с пространственной вариацией, магнитное поле которых в медианной плоскости может быть представлено в виде

$$H_z(r, \phi) = H(r) \{ 1 + \epsilon(r) \sin[\beta(r) - N\phi] \} \quad (1)$$

Получены уравнения, достаточно точно описывающие движение частиц с учётом набора энергии (динамический режим), которые могут быть использованы для расчёта на ЭВМ траекторий в области радиусов вывода.

В квазистатическом режиме исследуются бетатронные колебания частиц относительно замкнутых орбит. На основе анализа решений линеаризованных уравнений определены огибающие бетатронных колебаний, учёт которых необходим для анализа влияния различных возмущений магнитного поля, используемых в системе вывода пучка.

В ускорителях с крутоспиральной структурой поля линейные уравнения бетатронных колебаний сводятся к уравнениям Матъе. В этом случае огибающие невозмущенного движения могут быть представлены в виде ^{6/}

$$\Phi_0(\phi) = \frac{1}{\sqrt{Q_0}} \{ 1 - qM(\mu) \cos[\beta(R) - N\phi] \} \quad (2)$$

где $M(\mu) = \frac{1}{(2+\mu)^2 - a} + \frac{1}{(-2+\mu)^2 - a}$, R - радиус равновесной

орбиты, a и q - параметры уравнения Матъе, зависящие от вида магнитного поля (1), μ - характеристический показатель, связанный с частотами колебаний соотношением $\mu = \frac{2}{N} Q_0$.

Особенностью ускорителей с пространственной вариацией является существенное влияние нелинейных эффектов, для исследования которых используются асимптотические методы. Получены формулы для нелинейного сдвига частот с учётом высших производных β по радиусу и нелинейных характеристик $d = \frac{r^2}{H} \frac{\partial^2 H}{\partial r^2}$

и $\ell = \frac{r^3}{H} \frac{\partial^3 H}{\partial r^3}$ среднего поля. Нелинейные характеристики среднего поля слабо влияют на частоты бетатронных колебаний. Однако значительная спиральность вариации вызывает заметный нелинейный сдвиг частот, особенно существенный для той степени свободы, которая обладает минимальной жесткостью в линейном приближении. Частота аксиальных колебаний в реальной системе при $\beta = \frac{r}{\lambda}$ с достаточной точностью описывается выражением

$$Q_z = Q_{z0} + \frac{3}{16} \cdot \frac{1}{Q_{z0}} \left(\frac{\epsilon R}{N \lambda} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{N \lambda}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{A_z}{\lambda} \right)^2 + \frac{1}{8} \frac{1}{Q_{z0}} \left(\frac{\epsilon R}{N \lambda} \right)^2 \left(\frac{A_r}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

где Q_{z0} - частота в линейном приближении, A_r , A_z - амплитуды радиальных и аксиальных колебаний.

Для параметров РЦ нелинейный сдвиг Q_z приводит к ограничению максимальных амплитуд, величина которых на конечных радиусах может быть принята равной $A_z \approx 1$ см, $A_r \approx (2+3)$ см.

Поведение амплитуд в зонах нелинейных резонансов рассматривается с помощью инварианта, полученного в работе [7]. Для вывода пучка практический интерес представляет только резонанс 4 порядка. Резонансы 5 и более высоких порядков из-за увеличения размера сепаратриссы не могут быть использованы в качестве механизма заброса частиц в отклоняющее устройство.

Для исследования предельных орбит и выводных траекторий в плоскости $z=0$ используется метод квазипотенциала, пер-

вым приближением для которого является квазипотенциал среднего магнитного поля. Применение этого метода позволяет исследовать особенности движения частиц в рассеянном магнитном поле и сформулировать требования к основным элементам выводного тракта.

2. Во второй главе исследуется влияние локальных неоднородностей магнитного поля на движение частиц в ускорителях с пространственной вариацией и рассматриваются возможности использования таких возмущений для осуществления резонансных методов вывода пучка.

В общем случае конфигурация магнитного поля неоднородностей должна быть такой, чтобы до входа частиц в область максимального градиента частота радиальных колебаний изменилась до соответствующего резонансного значения $Q_r = 1, 3/2, 2$. В этот момент исчезает прецессия, обусловленная нерезонансным значением частоты невозмущенного движения Q_{r0} , и начинается резонансный режим воздействия неоднородности на каждом обороте (либо через оборот при $Q_r = 3/2$), в результате которого радиальные отклонения частиц от орбиты и соответственно разделение орбит возрастают по экспоненциальному закону. В переходной области магнитного поля неоднородностей, а также для нескольких оборотов в области рабочего градиента, в течение которых набирается необходимое разделение орбит, аксиальное движение должно оставаться устойчивым и формфактор аксиальных колебаний не должен превышать допустимых значений.

Так как переходная область проходится частицами, в основном, за счёт набора энергии, то для ускорителей типа РЦ возникает еще одно требование, чтобы поле неоднородностей существенно не нарушало режима изохронности и не приводило к заметным фазовым потерям пучка в переходной области.

Необходимые для этих целей величины возмущений магнитного поля нельзя считать малыми, в связи с чем не всегда можно использовать для анализа их влияния асимптотические методы. Поэтому в работе используются матричный метод и метод построения аналитических решений обобщенного уравнения Хилла.

Для исследования влияния локальных неоднородностей используются уравнения в натуральной системе координат и развивается метод матричного описания движения для случая, когда квазиупругие силы вдоль орбиты не могут быть аппроксимированы кусочно-постоянными функциями.

Частоты и огибающие колебаний при наличии одной неоднородности определяются выражением/6/

$$\cos 2\pi Q = \cos 2\pi Q_0 - \frac{T_1}{2} \Phi_0^2(\phi_1) \sin 2\pi Q_0,$$

(4)

$$\Phi^2(\phi) \sin 2\pi Q = \Phi_0^2(\phi) \left\{ \sin 2\pi Q_0 - \frac{T_1}{2} \Phi_0^2(\phi_1) [\cos 2Q_0(\pi - \phi + \phi_1) - \cos 2\pi Q_0] \right\},$$

где $T_1 = \pm \Delta n_1 a$ (верхний знак относится к радиальному, нижний - к аксиальному движению), a - азимутальная протяженность области, ϕ_1 - азимут ее расположения, Δn_1 - изменение показателя поля в области возмущения, а Q_0, Φ_0 - частоты и огибающие колебаний невозмущенного движения.

Особенностью влияния неоднородности на движение частиц в периодических магнитных полях является то, что эффективность ее воздействия существенно зависит от азимутального положения. При расположении возмущения на азимутах $\phi_1 = \frac{\beta}{N} + \frac{2\pi}{N}k$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) эффективность воздействия на радиальное движение усиливается на множитель $[1 + qM(\mu_r)]^2$ по сравнению с воздействием аналогичного возмущения в аксиально-симметричном магнитном поле. Существенно, что при таком расположении влияние возмущения на аксиальное движение ослабляется, так как огибающая аксиальных колебаний в этих точках имеет минимальное значение.

Проведенный общий анализ показывает, что одна локальная неоднородность может быть использована для осуществления системы вывода только при таких значениях частоты Q_r на конечных радиусах, которые отличаются от резонансных значений на величину $\Delta Q_r = \pm 0,1$. При этом для увеличения значения Q_r используется неоднородность с $\Delta n_1 > 0$ (регенератор), а для уменьшения - неоднородность с $\Delta n_1 < 0$ (возбудитель).

В РЦ требуемая система возбуждения радиальных колебаний может быть осуществлена при использовании двух возмущений. В этом случае частота колебаний определяется выражением

$$\cos 2\pi Q = \cos 2\pi Q_0 - \frac{1}{2} [T_1 \Phi_0^2(\phi_1) + T_2 \Phi_0^2(\phi_2)] \cdot \sin 2\pi Q_0 +$$

(5)

$$+ \frac{1}{2} T_1 T_2 \Phi_0^2(\phi_1) \Phi_0^2(\phi_2) \sin Q_0 \gamma \cdot \sin Q_0 (2\pi - \gamma),$$

где $\gamma = \phi_2 - \phi_1, \phi_1 \phi_2$ - азимуты расположения неоднородностей.

Использование двух неоднородностей позволяет обеспечить более высокий показатель радиальной неустойчивости, так как область значений Δn , в которой аксиальное движение остается устойчивым, может быть существенно расширена.

Понять некоторые особенности механизма воздействия системы неоднородностей на движение частиц позволяет гармонический подход к рассматриваемой задаче. При разложении поля неоднородностей в ряд Фурье уравнения бетатронных колебаний имеют вид обобщенного уравнения Хилла. На основе анализа решений таких уравнений показано, что определяющее влияние на изменение частоты Q_0 имеют гармоники возмущений, номер которых m наиболее близок к значению $2Q_0$ (резонанс-

ные гармоники). При этом гармоники с номером $m > 2Q_0$ вызывают увеличение, а гармоники с $m < 2Q_0$ - уменьшение частоты колебаний.

В общем случае оптимальными параметрами системы являются такие параметры, которые обеспечивают минимальное значение резонансных гармоник для аксиального движения при максимальных значениях гармоник, наиболее эффективно воздействующих на радиальные колебания.

Если частоты радиальных и аксиальных колебаний существенно различны, то введение одной резонансной гармоники по радиальным колебаниям слабо влияет на аксиальное движение. Так, в релятивистском циклотроне ($Q_{r0} = 1,8$, $Q_{z0} = 0,3$) введение в структуру магнитного поля 4 гармоники позволяет увеличить частоту радиальных колебаний до $Q_r = 2$, незначительно изменяя при этом частоту аксиальных колебаний^{/8/}.

Рассмотрены также особенности движения частиц в зоне параметрического резонанса и основные нелинейные эффекты, которые необходимо учитывать при выборе параметров выводной системы.

3. В третьей главе описаны результаты исследований, проведенных в связи с разработкой системы вывода пучка из релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв.

Для РЦ разрабатывались две автономных системы вывода, использующие модифицированный резонансный метод^{/9/} и метод возбуждения радиальных колебаний локальными неоднородностями магнитного поля^{/10/}.

В результате расчетов и экспериментов на модели магнитной системы РЦ^{/11/} найдена конфигурация дополнительных шимм, формирующих 4 гармонику магнитного поля. Установка такой системы шимм в циклотроне позволит довести частоту радиальных колебаний на конечных радиусах до резонансного значения $Q_r = 2$ при сохранении устойчивости аксиального движения и изохронности магнитного поля. Для создания эффективной системы вывода в этом случае может быть использован механизм нелинейного резонанса $Q_r = 8/4$.

Рассмотрены также возможные конфигурации токовых обмоток для коррекции 4 и 8 гармоник поля в зоне радиусов вывода.

Таким образом была предложена и осуществлена на модели структура магнитного поля, в которой устраняется жесткая связь частоты радиальных колебаний с величиной энергий на заданном радиусе, существующая в изохронных ускорителях.

При разработке второго метода были определены необходимые параметры системы локальных неоднородностей. На основе расчетов и экспериментов найдена конфигурация ферромагнитных элементов, обеспечивающая требуемое значение градиента ≈ 1500 э/см при протяженности переходной области поля $\approx 0,6$ см.

Описаны эксперименты на модели магнитной системы по коррекции характеристик основного магнитного поля в области радиусов вывода. На основе численных расчетов траекторий движения частиц в сформированных магнитных полях исследовано влияние нелинейных характеристик поля и определены параметры неоднородностей, обеспечивающие радиальное разделение орбит ≈ 2 см.

Проведенные расчеты показывают, что использование таких систем для вывода пучка из ускорителей с пространственной вариацией является перспективным. При хорошем качестве внутреннего пучка и тщательной оптимизации параметров выводной системы можно получить высокий коэффициент вывода, сравнимый со значениями, полученными при использовании механизма нелинейного резонанса $Q_r = 8/4$.

В результате проведенных исследований показана возможность осуществления эффективных резонансных методов вывода пучка и определены основные параметры выводных устройств релятивистского циклотрона.

4. Четвертая глава посвящена исследованию возможных схем вывода пучка из сильноточного фазотрона с вариацией магнитного поля (установка "Ф"). Основные параметры фазотрона приведены в следующей таблице^{/3/}.

Таблица

1. Энергия ускоренных протонов	700 Мэв
2. Ток внутреннего пучка	50 мка
3. Радиус конечной орбиты	$r_k = 270$ см
4. Число спиралей	$N = 4$
5. Параметр спирали	$\lambda = 15$ см
6. Число дуантов	1
7. Амплитуда ускоряющего напряжения	50 кв
8. Диапазон изменения частоты	18,2 + 14,4 МГц
9. Частоты бетатронных колебаний на конечном радиусе	$Q_z = 0,2, \quad Q_r = 1,2$

В сильноточном фазотроне для образования мезонных пучков предполагается использование как внутренних, так и внешних мишеней. Поэтому к выводной системе предъявляется жесткое требование обеспечения коэффициента вывода не ниже (40+50)%. Создание такой системы вывода, как в варианте использования модифицированного резонансного метода (введение 2 гармоники магнитного поля), так и с помощью локальных неоднородностей, представляет в условиях фазотрона сложную задачу.

Условия для создания необходимых возмущений магнитного поля могут быть значительно облегчены при понижении частоты радиальных колебаний на конечных радиусах ускорителя. Выбранная для установки "Ф" зависимость среднего поля от радиуса

$$H(r) = H_0 \exp \left\{ 0,359 \left(\frac{r}{r_k} \right)^2 + 0,83 \left(\frac{r}{r_k} \right)^6 - 1,611 \left(\frac{r}{r_k} \right)^8 + 0,755 \left(\frac{r}{r_k} \right)^{10} \right\} \quad (6)$$

обеспечивает отсутствие фазовых потерь частиц в процессе ускорения и позволяет снизить частоту радиальных колебаний на конечном радиусе до $Q_r \approx 1,09$.

Для магнитного поля (6) исследована система параметрического возбуждения радиальных колебаний, использующая одну локальную неоднородность - возбудитель. В этом случае для обеспечения необходимого разделения орбит ≈ 3 см радиальная протяженность рабочего градиента в возбудителе должна составлять не менее 8 см, что приведет к заметному понижению энергии выведенного пучка.

Для обеспечения более быстрой раскочки радиальных колебаний достаточно эффективным методом явилось бы введение второй гармоники магнитного поля, которая обеспечивает требуемое значение градиента за счёт изменения фазы с радиусом. Однако модифицированный резонансный метод в условиях фазотрона не может быть использован из-за ограниченных возможностей создания требуемой конфигурации 2 гармоники магнитного поля.

Поэтому для установки "Ф" в качестве основного варианта вывода принято использование двух локальных неоднородностей - возбудителя и регенератора.

Определены параметры локальных неоднородностей, которые обеспечивают разделение орбит (3 + 4) см при незначительном увеличении огибающих аксиальных колебаний.

Для определения параметров магнитного канала проведены расчёты выводных траекторий, в которых использовалось распределение рассеянного магнитного поля, существующее в синхротроне. Для вывода пучка с энергией 680 Мэв в заданном направлении необходимо использовать канал с азимутальной протяженностью $\approx 36^\circ$ и снижением магнитного поля ≈ 6000 э.

Для уменьшения радиальной расходимости выведенного пучка используется фокусирующее устройство, которое устанавливается вдоль центральной выводной траектории вблизи выхода из магнитного канала.

Рассмотрены возможные режимы движения частиц, в которых магнитное поле возбудителя в области радиусов вывода выбирается с учётом магнитного поля пластин канала. В этом

случае можно увеличить высоту пластин и исключить потери частиц, вызываемые несоответствием аксиального эмитанса пучка и аксептанса канала. При определенных нелинейных характеристиках поля канала и системы возбудитель-регенератор можно обеспечить условия, при которых поле канала существенно влияет на движение частиц только на последнем обороте, обеспечивая условие фокусировки траекторий на вход магнитного канала.

В результате исследований, описанных в последней главе диссертации, предложена эффективная система вывода пучка из сильноточного фазотрона и определены основные параметры элементов выводного тракта.

Уточнение параметров предложенной системы и определение коэффициента вывода будет производиться на основе расчетов траекторий по точным уравнениям движения. Для этого на модели магнитной системы установки "Ф" необходимо уточнить характеристики основного магнитного поля в области радиуса вывода, а также провести моделирование магнитного поля канала, возбудителя и регенератора.

Л и т е р а т у р а

1. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. УФН, 85, 4, 1965 г.
2. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. Труды международной конференции по ускорителям. М., Атомиздат, стр. 547, 1964 г.
3. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3211, Дубна 1967.
4. В.П.Дмитриевский, В.И.Данилов и др. ПТЭ, № 1, 11, 1957 г.
5. R.S.Livingston, J.A.Martin. Труды международной конференции по ускорителям, М., Атомиздат, стр. 561, 1964.
6. В.П.Дмитриевский, В.С.Рыбалко, Т.М.Прилипко. Препринт ОИЯИ, Р9-3434-1, Дубна 1967.

7. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. Труды международной конференции по ускорителям. М., Атомиздат, стр. 833, 1964 г.
8. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. Препринт ОИЯИ, Р-1981, Дубна 1965.
9. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, В.С.Рыбалко и др. Препринт ОИЯИ, Р-2848-1, Дубна 1966.
International Conference on Isochronous Cyclotrons (Gatlinburg) IEEE Transactions, NS-13, p.84, 1966.
10. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, В.С.Рыбалко и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3628-1, Дубна 1967.
11. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко и др. Препринт ОИЯИ, Р-1432, Дубна 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 апреля 1968 года.