

Холмогоров Василий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ
МОДУЛИРОВАННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ ИНДУКЦИОННЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ
УСКОРИТЕЛЕЙ.**

Специальность 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2002

Работа выполнена в научно-исследовательском институте интроскопии при Томском политехническом университете

Научный руководитель:

Чахлов Владимир Лукьянович
д.т.н., профессор,
директор НИИ ИН при ТПУ, г. Томск

Официальные оппоненты:

Щанин Петр Максимович
д.ф-м.н., профессор, ИСЭ АН РФ, г. Томск

Офицеров Владимир Викторович
к.ф-м.н., доцент кафедры
"Прикладной математики" ТПУ, г. Томск

Ведущая организация:

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера,
г. Новосибирск

Защита диссертации состоится "___" _____ 2002 г. в ____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212. 269. 05 при Томском
политехническом университете (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета.

Автореферат разослан "___" _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ В.К. Кононов

11. Influence of the controlling field parameters of the betatron spread of accelerated particles/ Zvoncov A.A., Holmogorov V.N.// Application of the conversion research results for international cooperation SIBCONVERS'99. The third international symposium proceedings, may 18-20, 1999, Tomsk, Russia. - P. 510-511.
12. Особенности фокусировки частиц в двухорбитном бетатроне./ А.А. Звонцов, В.Н. Холмогоров.// Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001г. - М.: ЦНИИ атоминформ, 2001. - С.277-280.
13. Азимутально-симметричные модулированные в радиальном направлении управляющие магнитные поля малогабаритных индукционных циклических ускорителей./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н.// Ред. ж. Изв. вуз. Физика. - (№2530-B01 от 05.12.01)
14. Оценка фокусирующих свойств модулированных в радиальном направлении магнитных полей индукционных циклических ускорителей методом математического моделирования./ В.Н. Холмогоров.// конференция молодых ученых по математике, математическому моделированию и информатике, программа и тезисы докладов, 4 - 6 декабря 2001 г. - Новосибирск, академгородок, 2001. - С.42 - 43.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Бетатроны, разработанные в Томском политехническом университете (ТПУ), находят применение в дефектоскопии различных материалов, промышленных изделий и конструкций в нестационарных условиях, а так же в медицине для лучевой терапии. Большое распространение получили малогабаритные импульсные бетатроны (МИБ) на энергии 2 – 10 МэВ. В зависимости от типа бетатрона, за пределы излучателя выводится либо тормозное излучение, либо пучок ускоренных электронов. Малогабаритные бетатроны выгодно отличаются от других типов ускорителей электронов простотой, малой массой, удобством в эксплуатации и малыми затратами на изготовление, что позволяет создавать транспортабельные установки.

Производительность работ, выполняемых малогабаритным бетатроном, в значительной степени определяется мощностью экспозиционной дозы тормозного излучения или током выведенного пучка ускоренных электронов. Они, в свою очередь, зависят от числа циклов ускорения в единицу времени и числа частиц, ускоряемых за один цикл.

Исследования по увеличению числа частиц, ускоряемых за цикл, проводятся по нескольким направлениям. Одно из направлений - поиск и создание новых управляющих магнитных полей, обладающих повышенными фокусирующими свойствами и максимально возможной областью устойчивого движения ускоряемых частиц в ускорительной камере. Исследование управляющих магнитных полей сопровождается моделированием. Физическое моделирование требует больших затрат времени и средств. Математическое моделирование с применением вычислительной техники позволяет с меньшими затратами проводить исследование магнитных полей, но для этого необходимо знать аналитическое описание данного поля. По аналитическому описанию достаточно просто определить параметры магнитного поля, необходимые при проектировании электромагнита.

Данная работа является продолжением научно-исследовательских работ, проводимых в НИИ интроскопии ТПУ, по изучению и реализации управляющих магнитных полей с повышенной областью действия фокусирующих сил и повышенными фокусирующими свойствами.

Состояние вопроса.

Взяв за основу одноэлектронную теорию бетатрона Черри и Райхмана, Родимов Б.Н. получил аналитическое описание азимутально-симметричного магнитного поля. Полученное решение требует

наименьшего числа начальных условий: необходимо только задать радиус равновесной орбиты r_0 и показатель спадания на данном радиусе n_0 . Такое управляющее магнитное поле получило название "типового". Заметим, что в "типовом" магнитном поле показатель спадания монотонно возрастает по радиусу.

В управляющих магнитных полях действующих бетатронов монотонность изменения показателя спадания нарушается, а характер его изменения может быть разнообразным. В работах Звонцова А.А. и Романовой В.А. для аналитического описания более сложных магнитных полей было предложено увеличить число краевых условий в решении уравнения векторного потенциала, представив данное решение уравнения в виде ряда. В этих работах показано, что выбирая несколько первых составляющих ряда можно проектировать управляющие поля с заданными фокусирующими свойствами, а также исследовать новые возможности индукционного режима ускорения заряженных частиц. Но задача получения аналитического описания азимутально-симметричных магнитных полей, реализуемых в межполюсном пространстве существующих бетатронов, так и не была решена

Цель настоящей работы

- аналитически описать азимутально-симметричные магнитные поля действующих и проектируемых моделей бетатронов;
- оценить фокусирующие свойства магнитных полей с различной функциональной зависимостью показателя спадания управляющего поля;
- определить возможное поперечное сечение равновесного пучка ускоряемых электронов;
- исследовать фокусирующие свойства магнитных полей многоорбитных индукционных циклических ускорителей цилиндрического типа.

Основные задачи исследования:

1. Оценить влияние отдельных составляющих ряда в решении уравнения векторного потенциала азимутально-симметричного магнитного поля на конфигурацию и размеры областей устойчивого движения частиц.
2. Найти аналитическое описание более сложных, чем "типовое", азимутально-симметричных магнитных полей, реализуемых в проектируемых и действующих установках
3. Методом математического моделирования определить конфигурацию и объем областей устойчивого движения и равновесного пучка с учетом возможного энергетического разброса ускоряемых частиц и геометрических размеров ускорительной камеры.
4. Оценить возможное число ускоряемых за цикл частиц для

- С.134-135.

2. Азимутально-симметричные управляющие магнитные поля малогабаритных индукционных циклических ускорителей./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н.// Томск: Изд-во ТПУ, 2000. - 111 с. ил. Библ. 30 назв., Рус. (№1468 от 23.05.00)
3. Аналитическое описание магнитного поля индукционных циклических ускорителей./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н., Чахлов В.Л.// Ред. ж. Изв. вуз. Физика. - Томск, 1999. - №11 (№1483-B99 от 12.05.99)
4. Фокусирующие свойства модулированных азимутально-симметричных управляющих магнитных полей бетатрона./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н., Чахлов В.Л.// Ред. ж. Изв. вуз. Физика. - Томск, 2000. - №4. - С. 166-170.
5. Фокусирующие свойства управляющих магнитных полей цилиндрических бетатронов./ А.А. Звонцов, В.Н. Холмогоров, В.Л. Чахлов.// Сборник докладов XVII Совещание по ускорителям заряд. частиц, ГНЦ РФ ИФВЭ, Протвино, 17-20 октябрь 2000г. - Протвино, 2000. - Т.2. - С.34-37.
6. Определение методом численного моделирования областей устойчивого движения частиц с фиксированным энергетическим разбросом и параметров равновесного пучка, ускоряемого в малогабаритных бетатронах./ А.А. Звонцов, В.Н. Холмогоров.// Труды конференции молодых ученых, посвященной 10-летию ИВТ СО РАН, Новосибирск, 25-26 декабря 2000г. - Т.П: Математическое моделирование. - Новосибирск: Изд-во ОИИ СО РАН, 2001. - С. 72-74.
7. Фокусирующие свойства азимутально-симметричных магнитных полей индукционных ускорителей./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н.// Труды VI областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. статей. - Томск: Изд-во ТПУ, 2000. - С. 174-176.
8. Focusing properties of an azimuthally-symmetrical magnetic field of induction accelerators./ Zvoncov A.A., Kholmogorov V.N.// The sixth international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist "Modern techniques and technology" (MTT'2000), February 28 - march 3 2000, Tomsk, Russia. - P.70-72.
9. Определение основных показателей качества управляющего магнитного поля индукционных циклических ускорителей./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н.// Ред. ж. Изв. вуз. Физика. - Томск, 2000. - №2 (№3186-B99 от 27.10.99)
10. Некоторые свойства управляющего магнитного поля индукционных циклических ускорителей на малые и средние энергии./ Звонцов А.А., Холмогоров В.Н.// Ред. ж. Изв. вуз. Физика. - Томск, 1999. - №8 (№3716-B98 от 16.12.98)

свойства

- определить значение энергетического разброса ускоряемых частиц посредством согласования сечения областей устойчивого движения данных частиц с сечением ускорительной камеры.

4. Так как каждая частица с фиксированным значением энергетического разброса ускоряется по собственной орбите, то $\partial C / \partial r$

определяет плотность расположения орбит с различным энергетическим разбросом (мгновенных орбит). Скорость изменения этой плотности примерно соответствует скорости изменения показателя спада, взятой с обратным знаком.

5. Площадь поперечного сечения равновесного пучка "нулевых" электронов, в котором силы кулоновского расталкивания уравниваются фокусирующими силами магнитного поля, меньше площади поперечного сечения соответствующей области устойчивого движения, ограниченной потенциальным барьером, примерно в 6-8 раз.

6. В бетатронах типа МИБ-4 и МИБ-6-200 число ускоряемых частиц за цикл близко к предельному при заданном напряжении инжекции.

7. В бетатронах цилиндрического типа отклонения H_Z - компоненты однородного управляющего магнитного поля от его нулевого значения можно рассматривать как малые отклонения показателя спада Δn . Эти отклонения приводят к появлению вертикально-фокусирующих сил, вследствие чего, наблюдается флуктуация плотности ускоряемого пучка, либо пучок может распадаться на отдельные кольцевые сгустки.

8. Методом математического моделирования показано, что ускорение в многоорбитных цилиндрических бетатронах может проходить в режиме чередования значений радиусов равновесных орбит в зависимости от Z координаты плоскости, в которых располагаются данные орбиты. Параметры магнитного поля, обеспечивающего чередование равновесных орбит, можно выбрать так, что энергии частиц на ближайших равновесных орбитах могут отличаться друг от друга на несколько процентов, без нарушения условия одновременной фокусировки на данных орбитах. При этом, значение показателя спада магнитного поля на равновесных орбитах можно увеличить до 0,6 при соответствующем увеличении вертикально-фокусирующих сил.

Основные положения отражены в следующих работах

1. Исследование, разработка и производство малогабаритных бетатронов в Томском политехническом университете./ Чахлов В.Л., В.Г. Волков, ... В.Н. Холмогоров и др.// Изв. вуз. Физика. - 2000. - № 4.

проектируемых и действующих бетатронов.

5. Оценить влияние малых отклонений показателя спада от нулевого значения на фокусирующие свойства магнитного поля бетатронов цилиндрического типа.

6. Исследовать фокусирующие свойства многоорбитных бетатронов цилиндрического типа.

Научная новизна.

Рассмотрено изменение конфигураций и размеров областей устойчивого движения ускоряемых частиц, существующих в магнитных полях бетатрона при наложении на однородное магнитное поле дополнительного. Показано, что

- азимутально-симметричное дополнительное магнитное поле при определенных краевых условиях осуществляет модуляцию однородного в радиальном или вертикальном направлениях;

- конфигурация области устойчивого движения меняется в широких пределах в зависимости от относительного значения амплитуды дополнительного магнитного поля на равновесной орбите;

- при определенных значениях амплитуды модулирующего магнитного поля кроме основной области устойчивого движения в суммарном поле появляются дополнительные области, расположенные, в большинстве случаев, за пределами ускорительной камеры, вследствие чего, частицы, попавшие в зону действия потенциальных сил этих областей, будут в процессе ускорения потеряны на стенках ускорительной камеры.

Получено аналитическое описание магнитных полей бетатронов практически при любой функциональной зависимости показателя спада, заданного в плоскости $z=0$, что позволяет определить область устойчивого движения ускоряемых частиц и другие показатели качества для полей, реализуемых в действующих и проектируемых установках.

Установлена взаимосвязь между параметром C , который определяет энергетический разброс частиц, ускоряемых в магнитных полях, с характеристиками этих полей и определена плотность расположения орбит с различным энергетическим разбросом ($\partial C / \partial r$).

Показано, что площадь поперечного сечения элементарного пучка примерно в 6-8 раз меньше площади поперечного сечения соответствующей области устойчивого движения, а число ускоряемых за цикл частиц при заданном напряжении инжекции близко к предельному.

Исследованы фокусирующие свойства магнитного поля бетатрона цилиндрического типа с малым отклонением показателя спада от нулевого значения на равновесной орбите. Показано, что эти отклонения вызывают модуляцию плотности заряда пучка в вертикальном

направлении, либо ускоряемый пучок частиц может распасться на отдельные кольцевые сгустки.

Подробно исследованы фокусирующие свойства многоорбитного бетатрона цилиндрического типа. Показано, что в зависимости от характера изменения магнитного поля в вертикальном направлении область устойчивого движения может быть общей, в пределах которой располагаются локальные области, либо распасться на несколько отдельных областей.

Показано, что в многоорбитных бетатронах цилиндрического типа, в зависимости от характера изменения показателя спадания магнитного поля в плоскостях с различными z координатами, между основными областями устойчивого движения могут появляться дополнительные области с "собственными" равновесными орбитами. Значения радиусов дополнительных равновесных орбит может быть меньше или больше значения радиусов основных равновесных орбит. В таких магнитных полях

- значения показателя спадания монотонно уменьшаются от положительных к отрицательным в плоскостях, параллельных плоскости $z=0$ и содержащих равновесные орбиты с меньшим значением радиуса, и монотонно увеличиваются от отрицательных к положительным - с большим значением радиуса;

- равновесная цилиндрическая поверхность становится волнообразной, если значение показателя спадания поля на равновесной орбите стремиться к нулю.

Показано, что в многоорбитных бетатронах цилиндрического типа значение показателя спадания магнитного поля на равновесных орбитах можно увеличить примерно до 0,6 с сохранением общей области устойчивого движения для всех орбит

Практическая ценность результатов работы.

Разработаны программы определения:

- ♦ основных показателей качества магнитного поля практически при любом характере изменения показателя спадания, либо по данным магнитных измерений (распределение векторного потенциала, показателя спадания поля, возможный энергетический разброс, компоненты магнитного поля, области устойчивого движения ускоряемых частиц с различным значением энергетического разброса, эквипотенциальные и силовые линии).

- ♦ конфигурации и размеров:

- элементарного пучка заряженных частиц с различным значением энергетического разброса;
- суммарного равновесного пучка с учетом геометрических размеров ускорительной камеры и возможного энергетического разброса

Частицы, находящиеся в пределах общей области устойчивого движения, будут дрейфовать по направлению тех орбит, где получаемая ими энергия меньше. Общая область устойчивого движения частиц является кольцевым цилиндром с криволинейными образующими поверхностями.

Для аналитического описания аксиально-периодического магнитного поля с заранее заданными координатами равновесных орбит в r и z направлении необходимо увеличить общее количество краевых условий, следовательно, и число составляющих ряда (1). Векторный потенциал такого магнитного поля можно представить в виде:

$$A(r, z) = G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} + \sum_{i=1}^2 [c_i \cdot I_1(w_i \cdot r) + d_i \cdot K_1(w_i \cdot r)] \cdot \cos(w_i \cdot z) \quad (16)$$

а краевые условия можно представить в виде условий (2), но выполняться они должны как в плоскостях $z = N \cdot z_0$, так и в $z = (N + \frac{1}{2}) \cdot z_0$.

Расчеты показывают, что абсолютные значения показателя спадания на равновесных радиусах можно увеличить примерно до 0,6.

Таким образом, бетатроны цилиндрического типа могут быть собственно цилиндрическими с показателем спадания поля $n(r_0) = 0$ и многоорбитно-цилиндрическими.

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

1. Если решение уравнения векторного потенциала представить в виде ряда, то одна составляющая ряда описывает основное магнитное поле, а дополнительные - при определенных начальных условиях - поле, модулирующее основное в радиальном или вертикальном направлениях.

2. Модуляция основного магнитного поля вызывает:

- значительное изменение его параметров;
- деформацию объема области устойчивого движения;
- появление дополнительных областей устойчивого движения.

Центры дополнительных областей, чаще всего, находятся вне пространства, ограниченного ускорительной камерой.

3. Соответствующий выбор числа составляющих ряда векторного потенциала позволяет:

- получить аналитическое описание магнитных полей индукционных ускорителей с часто встречаемыми на практике видами функции $n = f(r, z = 0)$ и более точно оценить их фокусирующие

Используемые краевые условия (15) позволяют задать расстояние между равновесными орбитами в z направлении, но необходимый радиальный размер области устойчивого движения частиц можно получить только после расчета нескольких вариантов, меняя n_0 и A_0^g .

Для получения необходимого радиального размера в плоскости $z = 0$ необходимо вместо условия $\frac{\partial A}{\partial r}(r_0, z = \frac{z_0}{2}, \dots) = 0$ записать условие (5). Такое изменение краевых условий, при определенных соотношениях между ними, приводит к появлению между основными областями устойчивого движения промежуточных областей (см. рис.5). Центры промежуточных областей находятся в плоскостях $\frac{z_0}{2}, \frac{3 \cdot z_0}{2}, \dots$. Значение и расположение минимума векторного потенциала промежуточных областей устойчивого движения $A(r_{0n})$ зависит краевых условий. Смещение $A(r_{0n})$ может быть как за равновесный радиус, так и к началу координат. Разность между энергиями ускоряемых частиц на равновесных орбитах r_0 и r_{0n} пропорциональна модулю $|A(r_0) - A(r_{0n})|$.

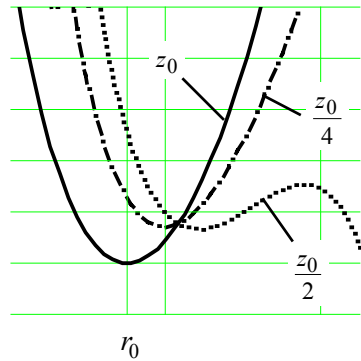
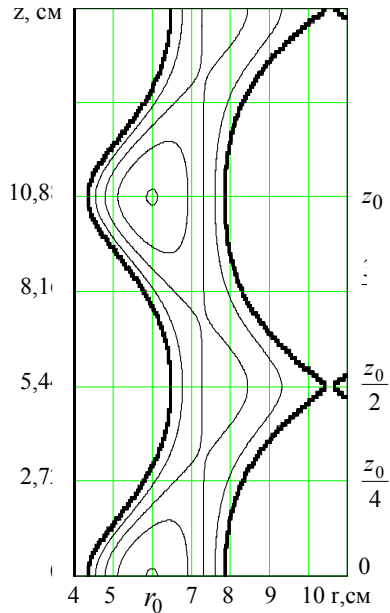


Рис.5. Изменение векторного потенциала $A(r, z)$ для различных z плоскостей, а так же конфигурации и расположение областей устойчивого движения частиц, ограниченных величиной потенциального барьера в радиальной плоскости.

ускоряемых частиц при различной функциональной зависимости показателя спадания поля.

♦ предельного числа частиц ускоряемых за цикл в указанных магнитных полях с учетом: напряжения инжекции, объема суммарного равновесного пучка, распределения плотности заряда по сечению данного пучка.

Все программы выполнены в среде MathCAD-7, объединены в комплекс и могут быть использованы на этапах проектирования и наладки бетатрона. Данный комплекс программ позволяет сократить объем физического моделирования, упростить процесс подбора профилированной поверхности полюсов и, тем самым, уменьшить время на настройку бетатрона.

Разработана методика исследования фокусирующих свойств магнитного поля бетатрона цилиндрического типа с дополнительными областями устойчивого движения. При этом учитываются:

- значения радиусов орбит основной и дополнительной областей устойчивого движения;
- показатель спадания на данных орбитах;
- энергия ускоряемых частиц на данных орбитах.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены на конференциях различного уровня, симпозиумах и семинарах.

- Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" - г. Томск, 1999 г.
- Третий международный симпозиум "Конверсия науки - международному сотрудничеству. СИБКОНВЕРС-99" - г. Томск, 1999 г.
- Шестая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" - г. Томск, 2000 г.
- Семнадцатое совещание по ускорителям заряженных частиц - г. Протвино, 2000 г.
- Конференция молодых ученых, посвященная 10-летию ИВТ СО РАН - г. Новосибирск, 2000 г.
- Десятое международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине - г. Санкт-Петербург, 2001 г.
- Конференция молодых ученых СО РАН, посвященной М.А.Лаврентьеву - г. Новосибирск, 2001 г.

Тезисы, выносимые на защиту.

Решение уравнения векторного потенциала магнитного поля,

представленное в виде конечного числа составляющих ряда, позволяет аналитически описать магнитное поле проектируемых и действующих индукционных ускорителей практически при любых функциональных зависимостях показателя спадания, которые достаточно задать для плоскости $z = 0$.

Модуляция однородного магнитного поля в радиальном или вертикальном направлениях приводит к изменению конфигурации и размеров области устойчивого движения в широких пределах, а при определенных краевых условиях - к появлению дополнительных областей устойчивого движения ускоряемых частиц, расположенных, в большинстве случаев, за пределами ускорительной камеры.

Размеры поперечного сечения равновесного пучка ускоряемых частиц в азимутально-симметричных магнитных полях бетатронов ограничиваются меньшим из экстремальных значений радиально- или вертикально-фокусирующей сил. Координаты ограничивающего экстремального значения этой силы располагаются в пределах области устойчивого движения частиц, вследствие чего, объем равновесного пучка оказывается в несколько раз меньше объема данной области.

В бетатронах с азимутально-симметричным магнитным полем при заданном напряжении инжекции число частиц, ускоряемых за цикл, близко к предельно возможному, которое способно удержать данное поле.

Малые отклонения показателя спадания от нулевого значения на равновесной орбите в бетатронах цилиндрического типа приводит к модуляции плотности заряда пучка частиц в вертикальном направлении, либо ускоряемый пучок может распасться на отдельные кольцевые сгустки.

С ростом значения показателя спадания на равновесном радиусе в магнитном поле бетатрона цилиндрического типа, область устойчивого движения может иметь вид гофрированной цилиндрической трубы, либо распасться на отдельные области, расположенные в параллельных плоскостях.

В многоорбитных бетатронах цилиндрического типа в зависимости от характера изменения магнитного поля в вертикальном направлении между основными областями устойчивого движения ускоряемых частиц могут появляться дополнительные области с "собственными" равновесными орбитами. В таких магнитных полях значения показателя спадания монотонно уменьшаются от положительных к отрицательным в плоскостях, параллельных плоскости $z=0$ и содержащих равновесные орбиты с меньшим значением радиуса, и монотонно увеличиваются от отрицательных к положительным - с большим значением радиуса.

В многоорбитных бетатронах цилиндрического типа значение показателя спадания магнитного поля на равновесных орбитах можно увеличить примерно до 0,6 с сохранением общей области устойчивого

Для малогабаритных бетатронов цилиндрического типа расчетные значения могут находиться в пределах $A_0^g = 1,001 \div 1,003$, а $\Delta n_0 = 0,005 \div 0,025$.

Расчету показали, что Δn_0 вызывает незначительную модуляцию магнитного поля в аксиальном направлении, что приводит к появлению вертикально-фокусирующей силы. В таком магнитном поле ускоряемый пучок частиц может распасться на отдельные кольцевые сгустки (см. рис.4). Каждый сгусток будет ускоряться по собственной равновесной орбите.

Повысить вертикально-фокусирующие силы можно посредством увеличения значения Δn_0 . В этом случае конфигурация и размеры области устойчивого движения будут зависеть и от значения потенциального барьера $A(r=r_0, z=0) = A_0^p$. Предварительно определить значение и расположение A_0^p практически невозможно. В зависимости от соотношения A_0^g и A_0^p область устойчивого движения:

- может состоять из нескольких отдельных областей, расположенных в параллельных областях;
- быть общей, в пределах которой располагается несколько локальных областей.

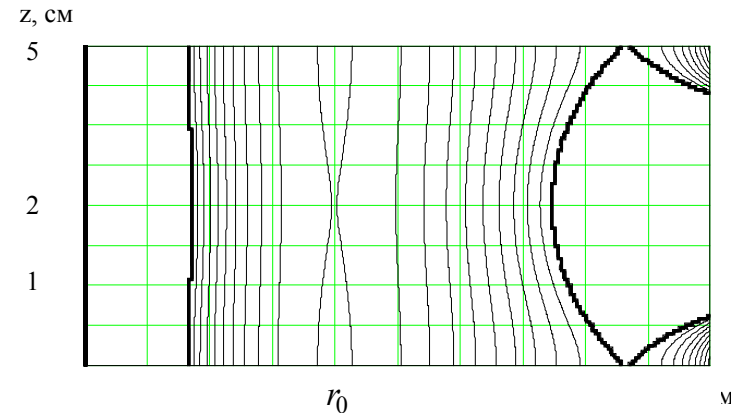


Рис.4. Конфигурации области устойчивого движения частиц, ограниченная потенциальным барьером в радиальной плоскости, при $n(r_0) = 0,025$,

$$A_0^g = 1,001.$$

где $k_1 = \frac{m_0 \cdot c^2 \cdot \varepsilon_0}{4 \cdot \pi \cdot e^2}$; $k_u = \left[\left(\frac{E_i}{E_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{E_i}{E_0}$; $E_i = E_0 + e \cdot U_i$;

E_0 - энергия покоя.

Тогда, общее число частиц, удерживаемых магнитным полем в данном пучке, определяется простым выражением:

$$N = 2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot k_u \cdot \frac{S}{r_0} \approx 1,41 \cdot 10^{13} \cdot k_u \cdot \frac{S}{r_0}, \quad (14)$$

где S - площадь поперечного сечения пучка частиц (м^2).

Так в малогабаритном бетатроне типа МИБ-4 число ускоряемых за цикл частиц при напряжении инжекции $40 \div 45$ кВ примерно равно $5 \times 10^9 \div 1 \times 10^{10}$. Предельное число частиц полученное по рассмотренной методике составило от $1,3 \times 10^{10}$ до 3×10^{10} .

В третьей главе исследованы особенности фокусировки частиц, ускоряемых в магнитных полях индукционных ускорителей цилиндрического типа.

Создать в цилиндрическом бетатроне идеальное однородное магнитное поле в определенном объеме достаточно сложно - значение $n(r_0, z)$ в межполюсном зазоре может отличаться от нулевого значения на малую величину (Δn_0). Оценить влияние Δn_0 можно, представив векторный потенциал магнитного поля выражением (6). Для определения неизвестных коэффициентов следует учесть краевые условия:

$$\begin{aligned} A(r_0, z = 0, z_0, \dots, N \cdot z_0) &= 1 ; \quad \frac{\partial A}{\partial r}(r_0, z = 0, z_0, \dots, N \cdot z_0) = 0 ; \\ n(r_0, z = 0, z_0, \dots, N \cdot z_0) &= n_0 ; \quad \frac{\partial A}{\partial z}(r_0, z = 0, z_0, \dots, N \cdot z_0) = 0 ; \\ A\left(r_0, z = \frac{z_0}{2}, \frac{3 \cdot z_0}{2}, \dots, \left(N - \frac{1}{2}\right) \cdot z_0\right) &= A_0^e ; \quad (15) \\ \frac{\partial A}{\partial r}\left(r_0, z = \frac{z_0}{2}, \frac{3 \cdot z_0}{2}, \dots, \left(N - \frac{1}{2}\right) \cdot z_0\right) &= 0 ; \quad z_0 = \frac{2 \cdot \pi}{w}, \end{aligned}$$

где A_0^e - характеризует величину потенциального барьера силового поля, действующего на ускоряемые частицы в вертикальном направлении;

N , z_0 - число плоскостей, в которых располагаются равновесные орбиты радиусом r_0 , и расстояние между ними.

движения ускоряемых частиц для всех орбит.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 149 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 4 таблицы. Список литературы включает 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследования, выделены основные положения, отражающие новизну проводимых исследований.

В первой главе показано, что решение уравнения векторного потенциала азимутально-симметричных управляющих магнитных полей бетатрона можно представить в виде ряда, каждая составляющая которого является его частным решением:

$$\begin{aligned} A(r, z) &= G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cdot J_1(k_i \cdot r) + b_i \cdot Y_1(k_i \cdot r)] \cdot \text{ch}(k_i \cdot z) + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} [c_m \cdot I_1(w_m \cdot r) + d_m \cdot K_1(w_m \cdot r)] \cdot \cos(w_m \cdot z), \quad (1) \end{aligned}$$

где $J_1(k_i \cdot r)$, $Y_1(k_i \cdot r)$, $I_1(w_m \cdot r)$, $K_1(w_m \cdot r)$ - функции Бесселя действительного и мнимого аргументов;

k_i , w_m - параметры разделения уравнения;

G_1 , G_2 , a_i , b_i , c_m , d_m - неизвестные коэффициенты.

Неизвестные коэффициенты можно найти из условия существования устойчивой равновесной орбиты радиусом r_0 в плоскости $z = 0$:

$$A(r = r_0) = 1, \quad \frac{\partial A}{\partial r}(r = r_0) = 0, \quad \frac{\partial A}{\partial z}(r = r_0) = 0, \quad n(r = r_0) = n_0 \quad (2)$$

и добавляя, по мере надобности, значения показателя спадания поля в некоторых точках межполюсного пространства.

Ряд (1) содержит составляющие, имеющие периодическую зависимость по r и z координатам. Если считать, что одна из составляющих ряда описывает основное магнитное поле, то дополнительные составляющие определяют поле, модулирующее

основное в r и z направлениях. В простейшем случае за основное управляющее магнитное поле принимаем однородное по r поле, векторный потенциал которого имеет вид:

$$A(k=0, r, z) = G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} \quad (3)$$

Зададим векторный потенциал модулирующего поля функциями Бесселя действительного аргумента:

$$\begin{aligned} A(r, z) &= A_1(r) + A_2(r, z) = \\ &= G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} + [a \cdot J_1(k \cdot r) + b \cdot Y_1(k \cdot r)] \cdot \text{ch}(k \cdot z) \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения неизвестных коэффициентов необходимо обозначить $A_2(r=r_0, z=0) = A_{20}$, а к краевым условиям (2) добавить значение показателя спада поля на радиусе инжекции:

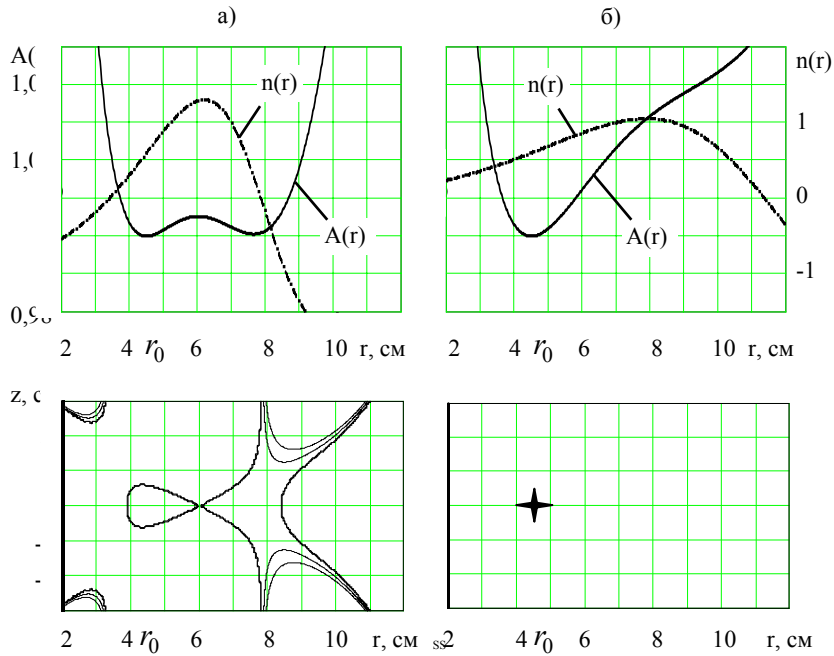


Рис.1. Изменение векторного потенциала $A(r)$, заданного выражением (4), и показателя спада поля $n(r)$ в плоскости $z=0$, а также конфигурация области устойчивого движения ускоряемых частиц при $n_0=4,5$ см, $n_0=0,6$ и значении дополнительной компоненты: а - $A_{20}=0,057$; б - $A_{20}=0,35$.

Зная изменение плотности заряда, можно определить ее среднее значение. Отношение среднего значения плотности заряда пучка к плотности заряда на равновесной орбите, выполненное в относительных единицах, можно использовать для более точного расчета максимального заряда пучка.

Обычно при оценке фокусирующих свойств магнитного поля рассчитывают не плотность заряда электронов, а их число в единице объема:

$$N_e = \frac{\rho_0}{e} = \frac{m_0 \cdot c^2 \cdot \varepsilon_0}{4 \cdot \pi \cdot e^2 \cdot r_0^2} \cdot \left[\left(\frac{E_i}{E_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{E_i}{E_0} = k_1 \cdot k_u \cdot \frac{1}{r_0^2}, \quad (13)$$

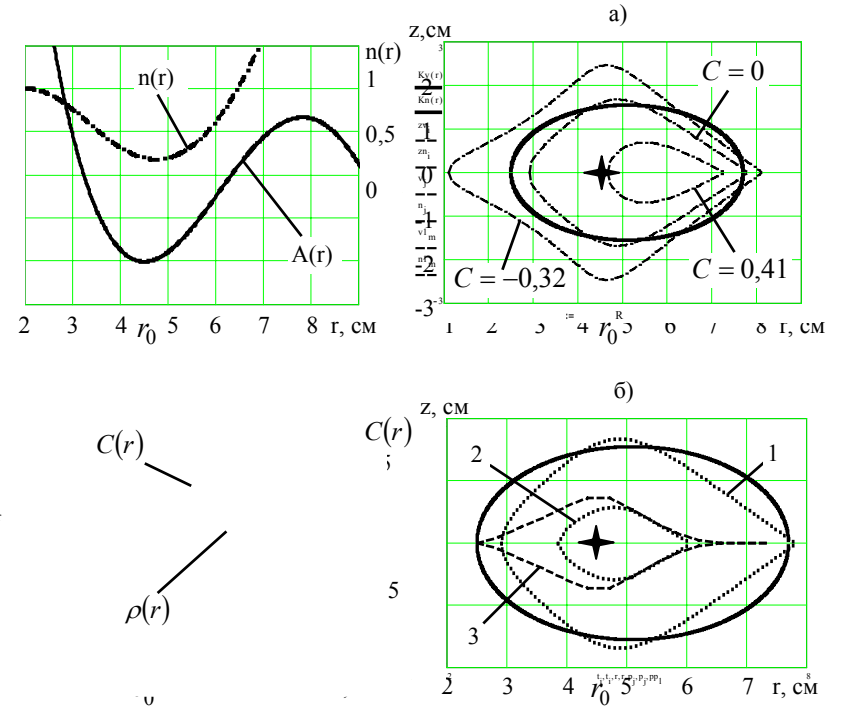


Рис.3. Векторный потенциал $A(r)$, показатель спада $n(r)$ магнитного поля малогабаритного бетатрона МИБ-4 и соответствующие этому полю постоянная $C(r)$ и плотности заряда $\rho(r)$ по сечению суммарного пучка.

а - конфигурации и расположение областей устойчивого движения частиц с различным энергетическим разбросом.

б - поперечные сечения области устойчивого движения "нулевых" электронов (1), соответствующего ему равновесного пучка (2), а также сечение суммарного равновесного пучка (3).

Поэтому, значение $C_{\min}$ можно определить только посредством согласования сечения областей устойчивого движения с сечением ускорительной камеры. Из всех частиц, имеющих возможность осуществлять ускорение по мгновенным орбитам, останутся только частицы с таким энергетическим разбросом и такими амплитудами, которые не погибнут на стенках ускорительной камеры.

Приведена взаимосвязь между параметром C с характеристиками магнитного поля $(H_z(r), n(r))$. Показано, что $\partial C / \partial r$ можно рассматривать как плотность расположения орбит с различным энергетическим разбросом (мгновенных орбит) в конкретном магнитном поле. Скорость изменения этой плотности примерно соответствует скорости изменения показателя спада, взятой с обратным знаком.

Поперечное сечение равновесного пучка ускоряемых частиц можно найти как огибающую элементарных пучков. Элементарным пучком обычно считают такой пучок, для которого силы кулоновского расталкивания F_k уравниваются фокусирующими силами управляющего магнитного поля F_r и F_z . Фокусирующие силы определяются выражением:

$$F_{rc} = -\frac{\partial V_{mc}(r, z, C)}{\partial r}; F_{zc} = -\frac{\partial V_{mc}(r, z, C)}{\partial z} \quad (11)$$

Следовательно, сечение элементарного пучка может увеличиваться до тех пор, пока растут фокусирующие силы. Одновременно с ростом этих сил увеличивается плотность заряда пучка. Расчеты показывают, что в магнитных полях бетатронов размеры элементарных пучков ограничиваются, в основном, радиально-фокусирующими силами.

Поэтому, контур элементарного равновесного пучка находится из условия равенства фокусирующих сил в точках этого контура максимальному значению радиально-фокусирующей силы $F_{rc \max}$.

Данные исследования показывают, что площадь сечения элементарного равновесного пучка в несколько раз (6-8) меньше площади поперечного сечения соответствующей области устойчивого движения (см. рис.3-6). С ростом C сечения элементарных пучков быстро убывают, а на радиусе, где $n(r) = 1$, элементарный пучок не существует, так как область, которую могли бы занять такие частицы, вырождается в точку.

Распределение плотности заряда по сечению суммарного равновесного пучка в плоскости $z = 0$ можно определить, решая уравнение:

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot \rho}{\epsilon_0} = \frac{\partial^2 V_{mc}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_{mc}}{\partial r} \quad (12)$$

$$n(r = r_i) = 1 \quad (5)$$

В зависимости от значения A_{20} наблюдается значительное изменение конфигурации и размеров поперечного сечения области устойчивого движения ускоряемых частиц. Особенно сильно изменяется радиальный размер указанной области. При малых значениях A_{20} образуется второй минимум векторного потенциала в радиальной плоскости. В данной области наблюдается вертикальная дефокусировка. Частицы попавшие в данную область будут потеряны, но при определенных условиях магнитное поле может обеспечить одновременное ускорение частиц по двум орбитам, концентрически расположенных в плоскости $z = 0$ (см. рис.1-а.). С увеличением значения A_{20} , на радиусах больших r_0 ,

появляется участок, на котором векторный потенциал практически не меняется с ростом радиуса, что приводит к резкому увеличению радиального размера области устойчивого движения (см. рис. 1-б.).

Векторный потенциал модулированного поля можно задать функциями Бесселя мнимого аргумента:

$$A(r, z) = A_1(r) + A_3(r, z) = G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} + [c \cdot I_1(w \cdot r) + d \cdot K_1(w \cdot r)] \cdot \cos(w \cdot z) \quad (6)$$

Для определения неизвестных коэффициентов необходимо обозначить $A_3(r = r_0, z = 0) = -A_{30}$ и воспользоваться краевыми условиями (2) и (5).

В зависимости от значения A_{30} область устойчивого движения ускоряемых частиц может быть «гофрированной» в вертикальном направлении (см. рис.2.) или же она может распадаться на отдельные области. Между отдельными областями устойчивого движения периодически появляются области в которых отсутствуют фокусирующие силы, действующие на ускоряемые частицы. При определенных значениях A_{30} и начальных условиях могут появляться дополнительные области устойчивого движения частиц. В вертикальной плоскости они появляются между основными областями устойчивого движения частиц, а в радиальной – между основной областью устойчивого движения и осью OZ . Таким образом, модуляцию управляющего магнитного поля в вертикальном направлении можно использовать для одновременного ускорения частиц по нескольким орбитам в плоскостях, параллельных плоскости $z = 0$.

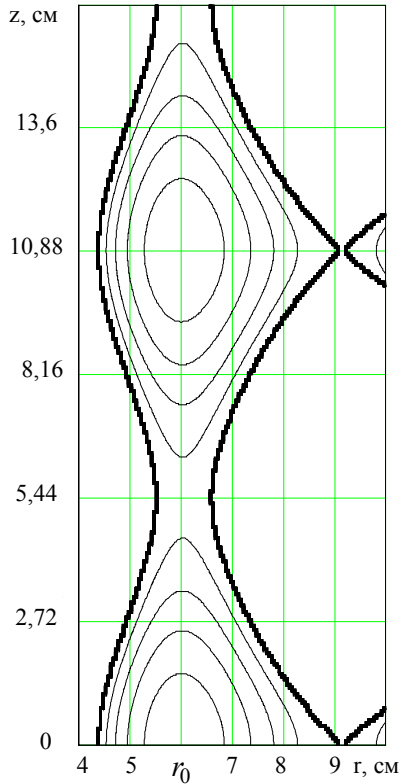


Рис.2.
Изменение векторного потенциала $A(r)$, заданного выражением (6), и показателя спада поля $n(r)$ в плоскости $z = 0$, а также конфигурация области устойчивого движения ускоряемых частиц при $r_0 = 6$ см, $n_0 = 0,3$ и значении дополнительной компоненты $A_{30} = 0,015$.

Для определения характеристик управляющего магнитного поля действующих и проектируемых бетатронов предложено векторный потенциал представить в виде:

$$A(r, z) = G_1 \cdot r + \frac{G_2}{r} + \sum_{i=1}^3 [a_i \cdot J_1(k_i \cdot r) + b_i \cdot Y_1(k_i \cdot r)] \cdot \text{ch}(k_i \cdot z) \quad (7)$$

Тогда для определения неизвестных коэффициентов к краевым условиям (2) и (5) можно добавить значения показателя спада поля на четырех различных радиусах в плоскости $z = 0$:

$$n(r_1) = n_1, \quad n(r_2) = n_2, \quad n(r_3) = n_3, \quad n(r_4) = n_4 \quad (8)$$

Такой выбор начальных условий позволяет исследовать поведение объема области действия фокусирующих сил и других показателей качества при разнообразном изменении $n = f(r, z = 0)$. Возможна и обратная задача: имея заданный закон $n = f(r, z = 0)$, полученный по данным магнитных измерений, можно определить основные показатели

качества управляющего магнитного поля.

Предложена методика аппроксимации зависимости $n = f(r, z = 0)$, рассчитанной по данным магнитных измерений.

Показано, что представление векторного потенциала в виде нескольких составляющих ряда (1) позволяет уменьшить количество магнитных измерений и сократить время обработки данных.

Кроме того, рассмотренное аналитическое описание магнитного поля бетатрона позволяет упростить подбор профилированной поверхности полюсов, обеспечивающих максимальный ускоряемый заряд, и, тем самым, снизить объем физического моделирования.

Во второй главе исследовано изменение конфигурации и размеров поперечного сечения области устойчивого движения частиц с учетом их энергетического разброса, положение орбит этих частиц, сечение равновесного пучка и предельное число электронов, которое может удержать магнитное поле. Для этих целей удобно воспользоваться потенциальной функцией силового поля, действующего на ускоряемые частицы, которая в относительных единицах имеет вид:

$$V_{mc}(r, z, C) = \left[A(r, z) + \frac{C}{r} \right]^2, \quad (9)$$

где C - постоянная, характеризующая начальные условия движущегося в магнитном поле электрона, в том числе, и энергетический разброс

$$C(r) = r^2 \cdot \frac{\partial A}{\partial r}(r, z = 0) \quad (10)$$

Электроны, энергия которых соответствует равновесной ($C = 0$), называют "нулевыми". Минимум потенциальной функции силового поля с фиксированным значением C , находится на мгновенной орбите радиусом r_C . Мгновенные орбиты в процессе цикла ускорения "медленно" приближаются к равновесной.

Исследования показали, что объемы областей устойчивого движения ускоряемых частиц, энергия которых больше номинальной ($C > 0$), с ростом радиуса мгновенной орбиты уменьшаются и вкладываются в область устойчивого движения "нулевых" электронов. На радиусе, где $C = C_{\max}$, область устойчивого движения данных частиц вырождается. Если же энергия ускоряемых частиц меньше номинальной ($C < 0$), то объемы областей устойчивого движения значительно возрастают за счет пространства между осью OZ и равновесным радиусом. Одновременно возрастают и вертикальный размер указанных областей (см. рис.3-а).