

На правах рукописи

Самошин Александр Вячеславович

Фокусировка и ускорение ионного пучка
в высокочастотной системе из независимо фазируемых резонаторов

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научные руководители	доктор физико - математических наук, профессор <u>Масунов Э.С.</u> кандидат физико-математических наук, доцент Полозов С.М.
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук Розанов Н.Е. кандидат физико-математических наук Кулевой Т.В.
Ведущая организация:	Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий

Защита состоится " 23 " июня 2010 г. в 13⁰⁰ на заседании
диссертационного совета Д 212.130.01 в ауд. К-608
в НИЯУ МИФИ по адресу:
г. Москва, Каширское ш.31, тел. 324-84-98, 323-95-26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ
Просим принять участие в работе диссертационного совета или
прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью
организации.

Автореферат разослан " 20 " мая 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



И.С. Щедрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших задач современной ускорительной физики является создание универсальных линейных ускорителей ионов, в которых можно было бы ускорять как легкие, так и тяжелые частицы, от протонов и дейтронов до ядер урана [1]. При низких энергиях такой универсальный ускоритель является дополнением к уже действующим установкам и может быть использован в качестве ускорителя различных радиоактивных изотопов. Среди проектов, которые рассматриваются в настоящее время, следует отметить ускоритель редких изотопов AEBF (RIA) в Аргонской национальной лаборатории (США), сверхпроводящий линейный ускоритель радиоактивных изотопов GANIL (Франция), TRIUMF (Канада) [1–3]. В Мичиганском университете (США) в 2013 – 2017 гг. планируется создание ускорителя редких изотопов (FRIB) [4]. Предполагается также разработать новый инжектор тяжелых ионов для «Нуклотрона» в Дубне (в рамках проекта NICA) [5]. Ряд подобных проектов ускорителей разрабатывается также в Италии, Китае, Индии.

При высоких энергиях сверхпроводящий ускоритель можно рассматривать как источник ионных пучков мегаваттной мощности, которые необходимы для создания мезонных фабрик нового поколения. Такие ускорители предлагается использовать в мощных нейтронных генераторах, а также с целью получения интенсивных потоков нейтрино, образующихся в результате распада вторичных пучков. В Окриджской Национальной Лаборатории (ORNL, США) создан мощный нейтронный генератор Spallation Neutron Source (SNS) [7]. В CERN разрабатывается проект создания сверхпроводящего мегаваттного ускорителя (SPL) [8], в

ведущих Европейских странах (Франция, Германия) рассматривается проект Европейского нейтронного генератора [9].

Трудность создания универсального линейного ионного ускорителя с малой и средней энергией обусловлена жесткими требованиями к системам фокусировки и ускорения нерелятивистских и слаборелятивистских пучков. В зависимости от массы и заряда ускоряемых ионов каждый раз приходится выбирать тот или иной вариант высокочастотной структуры и способ фокусировки пучка. Для решения задачи предлагается использовать один универсальный высокочастотный ускоритель, основной участок которого состоит из идентичных независимо фазируемых коротких сверхпроводящих резонаторов, обеспечивающих высокий темп набора энергии. При этом эффективное ускорение частиц с разным отношением заряда к массе возможно с помощью специального выбора амплитуды и фазы ВЧ поля в каждом резонаторе. Более того, в таком универсальном ускорителе можно без потерь ускорять одновременно несколько изотопов с близкими величинами Z/A .

Все поставленные задачи можно успешно решить, если использовать современные технологии. Прежде всего это касается применения сверхпроводящих резонаторов с большой величиной ускоряющего потенциала и сверхпроводящих соленоидов с величиной магнитного поля до 15 Тл [1] или квадруполей с градиентом до 350 Тл/м [10] для фокусировки пучка. При большом числе резонаторов появляется много свободных параметров, с помощью которых удастся настраивать ускоритель для разного сорта частиц.

В случае малой скорости ионных пучков в качестве ускоряющих структур обычно применяются четверть- и полуволновые резонаторы. С экономической точки зрения выгодно, чтобы эти резонаторы имели

одинаковую геометрию, в противном случае резко возрастает стоимость ускорителя. Это означает, что фазовая скорость волны будет постоянной в каждом резонаторе. Очевидно, что в такой ускоряющей системе всегда будет нарушаться принцип синхронизма, когда в любой момент времени скорость синхронной частицы равна фазовой скорости ускоряющей волны, то есть будет возникать скольжение частиц относительно ускоряющей волны. Величина скольжения не должна превышать некоторый допустимый предел, так как в случае большого скольжения резко снижается темп ускорения и ухудшается продольная и поперечная устойчивость пучка, падает коэффициент прохождения. При большом числе резонаторов целесообразно разделить их на несколько групп, каждая из которых состоит из идентичных резонаторов. Число одинаковых резонаторов в группе должно быть ограничено, а число групп, объединяющих резонаторы с идентичной геометрией, должно быть минимально. Более того, для каждого типа ионов должны быть выбраны свои оптимальные рабочие параметры системы, которые обычно находятся методами численного моделирования. Заметим, что при рассмотрении фазового движения в такой системе возникает проблема, связанная с отсутствием понятия синхронной частицы.

Во всех проектах по созданию сверхпроводящих ускорителей предполагается, что фокусировку пучка можно реализовать, разместив фокусирующие линзы (соленоиды или квадруполь) в свободные промежутки между резонаторами. Однако, как показал более детальный анализ для низкоэнергетической части ускорителя RIA, когда скорость ионов изменяется в диапазоне $0,01 < \beta < 0,06$, для фокусировки требуются очень большие фокусирующие поля (15 Тл и выше в случае сверхпроводящих соленоидов [1]). Величину фокусирующих полей можно уменьшить, если использовать дополнительную высокочастотную (ВЧ)

фокусировку пучка. Одним из возможных методов ВЧ фокусировки является фазопеременная фокусировка, когда фазы влета частиц в ВЧ поле соседних резонаторов выбраны разного знака. При использовании такой комбинированной фокусировки удастся снизить величину фокусирующего магнитного поля. Однако возникает серьезная проблема, связанная с уменьшением продольного акцептанса ускоряющего канала. Поэтому актуальной становится задача выбора оптимальных фаз инжекции пучка в соседние резонаторы для сохранения продольной и поперечной устойчивости пучка.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование условий продольной и поперечной устойчивости динамики пучка ионов в линейных ускорителях, которые состоят из периодической последовательности сверхпроводящих резонаторов и внешних фокусирующих элементов. В рамках решения этой задачи рассматриваются следующие вопросы:

- разработка методов исследования динамики пучка ионов в периодической последовательности сверхпроводящих резонаторов;
- изучение условий, при которых можно достигнуть одновременно продольной и поперечной устойчивости пучка;
- определение акцептанса канала универсального линейного ускорителя со стандартной и комбинированной фокусировкой;
- выбор конкретного варианта ускорителя тяжелых ионов на примере параметров ускорителя RIA при $0,01 < \beta < 0,06$, в котором обеспечивается оптимальный режим ускорения.

Научная новизна.

1. Исследованы вопросы устойчивости движения пучка ионов от водорода до урана в сверхпроводящих линейных ускорителях, основанных на системе из независимо фазуемых резонаторов и фокусирующих соленоидов или квадруполей.

2. Сформулированы требования на выбор величины фокусирующего поля сверхпроводящих соленоидов и квадрупольных линз в универсальном ускорителе, при которых можно обеспечить устойчивое ускорение тяжелых ионов.

3. Предложен и обоснован метод комбинированной фокусировки пучка с использованием внешней фокусировки и ВЧ поля резонаторов.

4. С использованием метода усреднения по быстрым осцилляциям получено уравнение трехмерного движения в виде уравнения Гамильтона, позволяющее анализировать продольную и поперечную динамику пучка в системе из независимо фазуемых резонаторов методами, которые применяются в обычных ускорителях.

5. Исследована связь продольного и поперечного движения тяжелых ионов с использованием эффективной потенциальной функции. Найден продольный аксептанс ускоряющего канала в случае стандартной и комбинированной фокусировки. Показано, что в собственной системе координат квазиравновесной частицы учет затухания колебаний приводит к увеличению области устойчивого движения частиц.

Практическая ценность. На основе полученных результатов предложен конкретный вариант универсального ускорителя ионов. Разработаны аналитические и численные методы исследования динамики в сверхпроводящих ускорителях.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Теория квазисинхронного движения частиц в системе, состоящей из независимо фазируемых резонаторов.
2. Результаты исследования особенностей продольной и поперечной динамики пучка в системе из независимо фазируемых резонаторов.
3. Результаты исследования устойчивости продольного и поперечного движения и связи между ними, проведенного с использованием метода усреднения по быстрым осцилляциям, а также уравнения движения в форме уравнения Гамильтона.
4. Результаты численного моделирования динамики пучка тяжелых ионов в сверхпроводящем ускорителе, подтвердившие результаты аналитического исследования. Моделирование проводилось с использованием специально разработанной программы BEAMDULAC-SCL.
5. Конкретный вариант универсального ускорителя ионов с оптимальными характеристиками и минимальной стоимостью создания.

Достоверность научных результатов обоснована всесторонними исследованиями с использованием теоретических методов и численного моделирования. Результаты численного моделирования полностью подтвердили выводы, сделанные при аналитическом исследовании.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях и семинарах, в частности:

- 22 Конференции по ускорителям частиц PAC (Альбукерке, Нью-Мексико, США, 2007);
- XX и XXI Международных совещаниях по ускорителям заряженных

частиц IWCRA (Алушта 2007, 2009);

- XX и XXI всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC (Новосибирск 2006, Звенигород 2008);

- Научной сессии МИФИ (Москва, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009).

- 8-й Московской международной телекоммуникационной конференции молодых и студентов ученых «Молодежь и наука» (Москва, 2005).

По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 4 статьи в журналах по списку ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 150 страниц, включая 105 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В начале работы обоснована необходимость создания универсальных сверхпроводящих ускорителей ионов. Обсуждается актуальность выбора темы, и состояние исследуемого вопроса на текущий момент времени, сформулированы цели и задачи диссертации. Изложена новизна результатов, практическая ценность работы и приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе с помощью матричного метода исследуется простейшая система с базовым вариантом ускоряющего периода, который состоит из последовательности резонаторов и соленоидов или квадрупольей, размещенных между резонаторами. При исследовании динамики модулированного пучка, состоящего из коротких, хорошо сгруппированных сгустков, преимущество матричного метода расчета очевидно, так как

продольные и поперечные силы, действующие на ионы сгустка, можно с хорошей точностью считать линейными относительно равновесной частицы. При использовании магнитной периодической фокусировки (МПФ) в ускоряющей системе важно учитывать влияние ВЧ поля на поперечное движение пучка. Из матриц периода для продольного и поперечного движений найдены параметры Флоке μ_z и μ_r и условия устойчивости продольных и поперечных колебаний частиц, а также минимальная величина магнитного поля B_{min} в зависимости от скорости ионов β , необходимая для фокусировки пучка с $Z/A = 1/66$ (рис. 1 а). В случае, когда максимальная величина огибающей равна $X_m = 3$ мм, B_{min} всегда больше 10 Тл и с ростом скорости уменьшается от 19,5 Тл при $\beta = 0,01$ до 11 Тл при $\beta = 0,06$. Если $X_m = 4$ мм, то $B \leq 9$ Тл только при скорости $\beta > 0,05$. Для сравнения на рисунке 1 (б) показано распределение поля в фокусирующем канале из соленоидов при отсутствии ускорения. Видно, что когда огибающая пучка равна $X_m = 3$ мм, величина магнитного поля не превышает 9 Тл, а для огибающей $X_m = 4$ мм фокусирующее поле равно 5 Тл. Таким образом, дефокусировка пучка ускоряющим ВЧ полем приводит к необходимости повышения поля в соленоидах почти в 2 раза, что неизбежно приводит к необходимости разработки новых сверхпроводящих соленоидов.

Далее рассматривается возможность применения магнитных и электрических квадруполь для фокусировки пучка тяжелых ионов в универсальном линейном ускорителе. Анализ показал, что для удержания величины огибающей 3 мм достаточно использовать магнитные квадруполь с градиентом поля порядка 160 Тл/м, однако при этом движение будет устойчиво только в диапазоне скоростей частиц $0,02 < \beta < 0,06$. В случае электрических квадруполь показано, что для удержания пучка с величиной

огibaющей 10 мм необходимо иметь потенциал до 1 МВ, что трудно реализовать. Поэтому электрические квадруполь для фокусировки пучка тяжелых ионов целесообразно использовать только при очень малых скоростях ($\beta \leq 10^{-4}$).

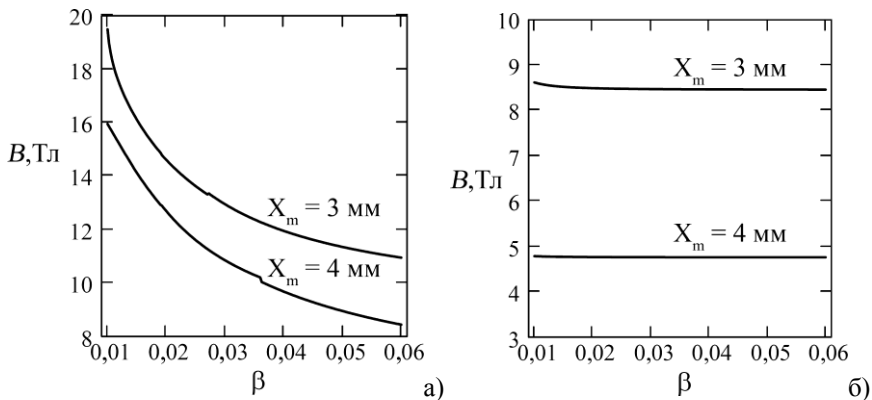


Рис. 1. Распределение фокусирующего магнитного поля в зависимости от скорости пучка при постоянной величине огibaющей.

Из результатов анализа для квадруполь видно, что поставленная задача не может быть решена полностью, так как существуют ограничения, связанные либо со сложностью изготовления фокусирующих элементов с необходимыми параметрами, либо с неполным перекрытием интересующего нас диапазона скоростей при сохранении малой огibaющей пучка.

Разработка соленоидов с магнитным полем, превышающим 15 Тл [1], является довольно серьезной научно-технической задачей и требует больших финансовых вложений. Поэтому возникает идея уменьшить величину магнитного поля или даже попытаться отказаться от него, если использовать другие способы фокусировки, например, фокусировку ВЧ

полем. **Во второй главе** рассмотрена возможность использования фазопеременной фокусировки (ФПФ), а также совместного использования ФПФ и внешнего поля соленоидов.

Анализ показал, что при использовании только фазопеременной фокусировки для ионов с $Z/A = 1/66$ величины μ_z и μ_r малы при $\beta \geq 0,02$ и находятся вблизи границы области устойчивости. При этом реальный размер огибающей будет составлять величину порядка $X_m = 1$ см. Это означает, что ФПФ в чистом виде, без использования фокусирующих элементов, не позволяет реализовать условия устойчивости пучка.

Очевидно, что дополнительным способом обеспечения поперечной устойчивости движения пучка в рассматриваемой системе является использование фокусирующих соленоидов. В этом случае период ускоряюще-фокусирующей структуры состоит из двух резонаторов, фазы в которых противоположны по знаку, и одного соленоида, размещенного между ними. Наличие соленоида не влияет на продольную динамику пучка, в то время как поперечное движение должно претерпеть изменение. При этом появляется возможность выбора фаз влета квазиравновесной частицы несимметричным образом. Это позволяет значительно улучшить продольную и поперечную динамику пучка. На рисунке 2 показано распределение магнитного поля в ускорителе при $\varphi_1 = -33^\circ$ и $\varphi_2 = 20^\circ$ для удержания огибающих пучка в пределах величины $X_m = 3$ мм и $X_m = 4$.

Наличие второго соленоида в периоде ускоряюще-фокусирующей системы не позволяет значительно уменьшить величину фокусирующего магнитного поля, однако при этом значительно увеличивается число сверхпроводящих соленоидов, а, следовательно, и конечная стоимость ускорителя.

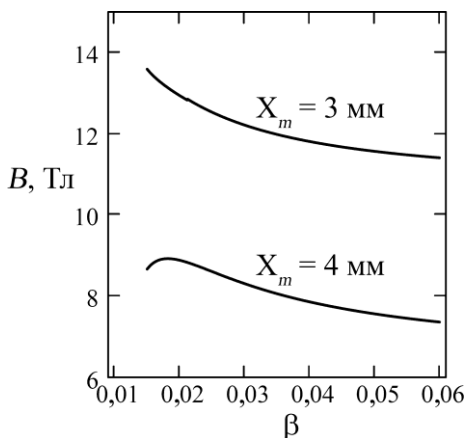


Рис. 2. Зависимость магнитного поля соленоидов для заданных огибающих пучка в ускоряющей системе с периодом, состоящим из соленоида и двух резонаторов при $\varphi_1 = -33^\circ$ и $\varphi_2 = 20^\circ$.

Результаты анализа представлены в таблице 1, в которой приведены параметры ускорителя со стандартной и комбинированной фокусировкой.

В основе матричного анализа лежит предположение об одноволновом характере взаимодействия частиц с высокочастотным полем. Кроме того, существенным допущением здесь является предположение о малости амплитуд фазовых и поперечных колебаний частиц, т.е. предположение о линейном характере колебаний частиц. Перечисленные упрощения не всегда являются оправданными. Это связано, прежде всего, с необходимостью рассмотрения возможности увеличения акцептанса ускоряющего канала в сверхпроводящем ускорителе, где потери частиц должны быть минимизированы. Поэтому возникает необходимость рассмотрения нелинейных эффектов при расчете динамики пучка, учет которых является обязательным при выборе окончательного варианта ускорителя.

Таблица 1.

Параметры	Стандартная фокусировка		Комбинированная фокусировка	
Отношение заряда к массе Z/A	1/66			
Энергия инжекции	50 кэВ/нук			
Энергия на выходе	600 кэВ/нук			
Частота ВЧ поля в резонаторе, МГц	57,5			
Средняя фаза	$\varphi_c = -20^\circ$		$\varphi_1 = -33^\circ$	$\varphi_2 = 20^\circ$
Число резонаторов, шт.	67		74	
Число соленоидов, шт.	67		37	
Общая длина, м	54		46	
Средний темп ускорения, МэВ/м	1,1		1,3	
Величина магнитного поля соленоида, Тл	$X_m = 3$ мм	$X_m = 4$ мм	$X_m = 3$ мм	$X_m = 4$ мм
	от 19,5 до 11,5	от 16 до 8,5	от 14,5 до 12	от 10 до 8

В третьей главе с помощью метода усреднения по быстрым осцилляциям было получено трехмерное уравнение движения в форме уравнения Гамильтона. В это уравнение входит эффективная потенциальная функция U_{eff} , зависящая только от медленно меняющихся поперечных координат и фазы синхронной частицы. Анализ эффективной потенциальной функции позволяет получить условия поперечной фокусировки и выявить связь между продольным и поперечным движением, рассчитать аксептанс канала ускорителя. Используемый метод позволяет получить уравнение движения для квазиравновесной частицы. Назовем квазиравновесной частицей ту, которая движется по оси ускорителя и у которой отсутствуют быстрые фазовые и поперечные

колебания. Вначале проводился анализ медленных колебаний в системе координат, движущейся со скоростью, равной усредненной скорости квазиравновесной частицы. Быстрые и медленные колебания произвольных частиц отсчитывались от квазиравновесной частицы. Введение квазиравновесной частицы позволяет проводить анализ динамики пучка в системе, состоящей из периодической последовательности резонаторов и соленоидов, аналогично стандартному подходу, используемому в линейных ускорителях с синхронной гармоникой ВЧ поля.

Далее проводилось усреднение в собственной системе квазиравновесной частицы. Для этого рассматривалось мгновенное значение разности скорости и координаты квазиравновесной частицы, движущейся по оси ускоряющей системы. С помощью полученной эффективной потенциальной функции изучался частный случай малых продольных и поперечных колебаний. Для этого эффективная потенциальная функция U_{eff} раскладывалась вблизи минимума ($\psi = 0$, $\rho = 0$) и сравнивалась с параметрами Флоке μ_z и μ_r . Здесь ψ — отклонение по фазе от квазиравновесной частицы, $\rho = 2\pi r/\beta_G \lambda$ — приведенный радиус пучка. Из рисунка 3 видно, что безразмерные частоты продольных и поперечных колебаний практически совпадают с параметрами Флоке μ_z и μ_r , т.е. со сдвигом фазы продольных и поперечных колебаний на одном периоде структуры.

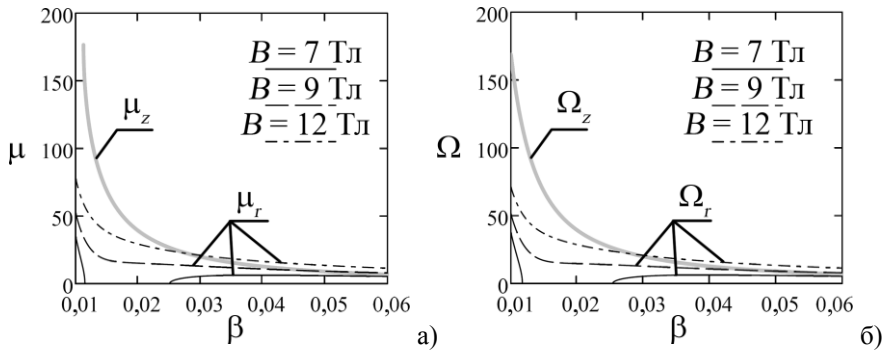


Рис. 3. Сравнение частот продольных и поперечных колебаний:

- а) – найденных с помощью матричного метода и
- б) – метода усреднения по быстрым осцилляциям.

На рисунке 4 изображено изменение площади сепаратрисы (на фазовой плоскости $(\Delta\gamma, \psi)$), т.е. акцептанс канала, в зависимости от скорости частиц для базового варианта ускорителя (рис. 4 а) и для комбинированной фокусировки (рис. 4 б) для различных скоростей.

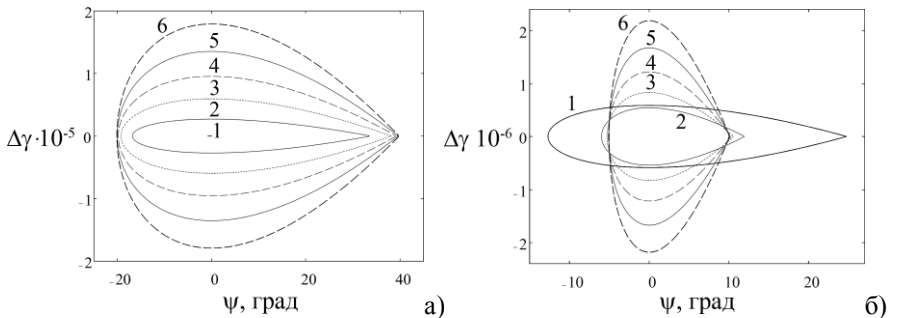


Рис. 4. Акцептанс канала ускорителя в зависимости от скорости:

- 1 — $\beta = 0,01$; 2 — $\beta = 0,02$; ...; 6 — $\beta = 0,06$,
- а — базовый вариант ускорителя, б — комбинированная фокусировка.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования динамики пучка в гладком приближении и в полном поле, которые хорошо совпадают с результатами теоретического анализа, проведенного ранее.

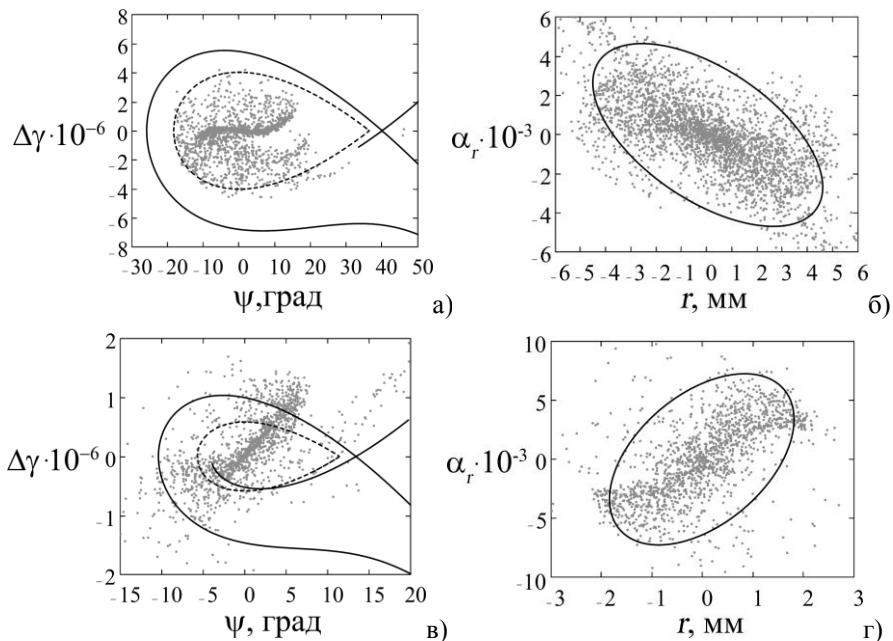


Рис. 5. Результаты моделирования динамики пучка.

На рисунке 5 изображены результаты численного моделирования динамики пучка в полигармоническом поле в конце участка ускорения для стандартного варианта фокусировки после 20 периодов (рис. а) и б)) и для комбинированной фокусировки после 10 периодов (рис. 5 в) и г)). Видно, что пучок находится в пределах границы области устойчивости (сплошная линия). На этих рисунках пунктиром изображена сепаратриса, рассчитанная при анализе в системе координат, движущейся со скоростью, равной

усредненной скорости квазиравновесной частицы. На рисунках 5 б) и г) изображен эмиттанс пучка, который содержит 95% частиц, что в случае стандартной фокусировки соответствует радиусу огибающей $X_m = 4$ мм при величине фокусирующего магнитного поля 12 Тл, и $X_m = 2$ мм при 7 Тл в случае комбинированной фокусировки.

Основные результаты работы.

1. С использованием матричного метода проанализирована устойчивость динамики пучка для различных вариантов ускоряюще-фокусирующих периодов сверхпроводящего ускорителя ионов.
2. Для обеспечения поперечной фокусировки пучка предложено использовать фазопеременную фокусировку совместно с полем соленоидов, что позволяет существенно снизить величину магнитного поля соленоида. Выбраны фазы влета квазиравновесной частицы в резонаторы и величина магнитного поля соленоидов, необходимая для удержания заданной огибающей пучка.
3. Разработана общая методика анализа динамики ионного пучка в системе, состоящей из периодической последовательности резонаторов и соленоидов. Анализ проводился с использованием гладкого приближения и трехмерной эффективной потенциальной функции.
4. С помощью разработанных теоретических методов проанализировано фазовое и поперечное движение ионного пучка в сверхпроводящем ускорителе. Показано, что при комбинированной фазопрерменной фокусировке с внешним магнитным полем соленоидов удастся снизить величину магнитного поля до 12 Тл, в отличие от 20 Тл при магнитной периодической фокусировке.

5. Проведено численное моделирование динамики пучка ионов в гладком приближении и в полигармоническом поле. Результаты численного моделирования подтвердили выводы, сделанные при теоретическом исследовании динамики пучка.
6. Предложен конкретный вариант сверхпроводящего ускорителя, в котором удалось уменьшить число сверхпроводящих соленоидов, а также требуемую величину магнитного поля для удержания огибающей пучка в пределах 3 мм.

Список литературы, использованной в автореферате

1. Ostroumov P.N., Shepard K., Kolomiets A.A., e.a. Design of a post accelerator for the rare isotope accelerator facility. – In: Proc. of PAC 2001. Chicago, IL, pp. 4080 – 4082.
2. Junquera T. Super conducting driver linac for the new Spiral 2 radioactive ion beam facility GANIL. – In: Proc. of EPAC 2006. Edinburgh, Scotland, pp. 1559 – 1561.
3. Schmor P. Status and plans for the TRIUMF ISAC facility. – In: Proc. of APAC 2007. Indore, India, pp. 325 – 329.
4. York R.C., Bollen G., Compton C., e.a. FRIB: A new accelerator facility for the production of rare isotope beams. – In: Proc. SRF2009. Berlin, Germany, pp. 888 – 894.
5. Trubnikov G.V., Agapov N.N., Butenko A.V., e.a. Project of the Nuclotron-based ion collider facility (NICA) at JINR. – In: Proc. of RuPAC 2008, Zvenigorod. Russia, pp. 82 – 84.
6. Henderson S., Anderson D., Holtkamp N., e.a. Status of the SNS Beam Power Upgrade Project – In: Proc. EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, pp. 345 – 347.

7. Vretenar M., Carli C., Garoby R., e.a. Status of the LINAC4 Project at CERN – In: Proc. of LINAC08, Victoria, BC, Canada, pp. 64 – 66.
8. Meusel O., Chau L.P., Mueller I., e.a. Development of an Intense Neutron Souecw “FRANZ” in Frankfurt. – In: Proc. of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, pp. 159 – 161.
9. M. Lindroos, C. Oyon, S. Peggs, The ESS Superconducting Linear Accelerator, – In: Proc. of Hadron Beam 2008, Nashville, Tennessee, USA, pp. 385 – 387.
10. J.W. Kim, K.W. Shepard, J.A. Nolen, A High Gradient Superconducting Quadrupole for a Low Charge State Ion Linac, – In: 1996 IEEE, pp. 1408 – 1410.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Э.С. Масунов, А.В. Самошин. Фокусировка пучка в линейном ионном ускорителе, состоящем из периодической последовательности независимо фазуемых сверхпроводящих резонаторов, Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 7, с. 115–121.
2. Масунов Э.С., Самошин А.В. Исследование динамики пучка в линейном сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов, Атомная энергия 2010г, т. 108, вып. 2, с. 109–118.
3. E.S. Masunov, A.S. Plastun, A.V. Samoshin, Ion Beam Dynamics in Superconducting Drift Tube Linac, Problems of Atomic Science and Technology, 2010, Series “Nuclear Physics Investigations”, №2 (53), pp. 114-117.
4. E.S. Masunov, A.V. Samoshin, Ion beam acceleration in system from periodic sequence of independently phased cavities, Problems of Atomic Science and Technology, Series “Nuclear Physics Investigations”, issue 49, pp. 158-162, 2008.

5. Д.А. Ефимов, Э.С. Масунов, А.В. Самошин. Применение ВЧ-фокусировки в постускорителе для RIA. Сборник трудов научной сессии МИФИ-2004, Том 7, с. 214-215.
6. Ефимов Д.А., Самошин А.В., Масунов Э.С. Использование магнитного поля соленоидов для фокусировки тяжелых ионов в линейном сверхпроводящем ускорителе. 8 московская международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и специалистов “Молодежь и наука” (Москва, 2005)
7. Д.А. Ефимов, Э.С. Масунов, А.В. Самошин. Использование фазопеременной фокусировки в сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов. Сборник трудов научной сессии МИФИ-2005. Том 7, с. 191-192.
8. А.В. Бяковский, А.В. Самошин, Э.С. Масунов, Выбор магнитного поля квадруполь для фокусировки ионов в сверхпроводящем линейном ускорителе, Научная сессия МИФИ – 2006, том 16, с. 138 – 139.
9. Э.С. Масунов, А.В. Самошин, Выбор фокусировки пучка тяжелых ионов в сверхпроводящем линейном ускорителе, Научная сессия МИФИ – 2006, том 7, с. 180 – 181.
10. E.S. Masunov, A.V. Samoshin, Ion Beam Focusing Methods in Superconducting Low Energy Linac, Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, 2006, pp. 162-164.
11. Э.С. Масунов, А.В. Самошин, Использование квадрупольных линз в качестве фокусирующих элементов в сверхпроводящем линейном ускорителе, Научная сессия МИФИ – 2007, том 7, с. 192 – 194.
12. E.S. Masunov, A.V. Samoshin, Using Smooth Approximation for Beam Dynamics Investigation in Superconducting Linac, Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA 2007, pp. 1568-1570.

13. Э.С. Масунов, А.В. Самошин, Использование гладкого приближения для анализа динамики пучка в сверхпроводящем линейном ускорителе, Научная сессия МИФИ – 2008, том 5, с. 64 – 65.
14. Э.С. Масунов, А.В. Самошин, Методы расчета динамики ионных пучков в сверхпроводящем линейном ускорителе, Научная сессия МИФИ – 2008, том 5, с. 66 – 67.
15. E.S. Masunov, A.V. Samoshin, Ion Beam Acceleration in Independently Phased Cavities, Proceedings of RuPAC 2008, Novosibirsk, Russia, pp. 162 – 164.