

На правах рукописи

ДЮБКОВ Вячеслав Сергеевич

**Влияние несинхронных гармоник электромагнитного поля
на устойчивость движения ионных пучков
в линейных резонансных ускорителях на малую энергию**

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2011

Работа выполнена на кафедре Электрофизических установок
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Научные
руководители

доктор физико-математических наук,
профессор Масунов Эдуард Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент Полозов Сергей Маркович

Официальные
оппоненты

доктор физико-математических наук
Буданов Юрий Александрович

доктор технических наук
Плотников Сергей Валентинович

Ведущая организация:

Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Санкт-Петербургский
Государственный Университет»

Защита состоится « 29 » июня 2011 г. в 14 час. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д **212.130.01** в конференц-зале К-608
(корпус «К», 6 этаж) НИЯУ МИФИ
по адресу: Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31.
Тел. (495) 324–84–98, (495) 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 « » мая 2011 г.

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



И.С. Щедрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в ядерной физике, физике высоких энергий, а также в смежных с ними высокотехнологичных отраслях промышленности широкое применение находят малогабаритные сильноточные линейные ускорители низкоэнергетических протонов и ионов. Особенно востребованы инжекторы-группирователи на энергию порядка 1 МэВ/нуклон.

В последние 10–15 лет развитие ускорителей идёт как по пути увеличения энергии ускоренных частиц, так и по пути увеличения их интенсивности и длительности импульса ускоренного пучка, а также повышения его качества (уменьшения разброса частиц по энергии в пучке, поперечной координате и скорости). Ведутся также разработки новых методов повышения темпа ускорения частиц.

Очевидно, данные задачи могут быть решены при развитой теории линейных ускорителей и повышении технологического качества производства узлов таких систем.

Поскольку энергия, приобретаемая частицами за период ускоряющего поля, велика, то движение в линейных ускорителях характеризуется большой фазовой устойчивостью, что в свою очередь позволяет получать высокую плотность тока ускоряемых частиц. Кроме того, линейные инжекторы позволяют получать хорошо коллимированные пучки при практически полном выводе частиц. Всё это обеспечивает высокий коэффициент захвата частиц в процесс ускорения.

Одной из наиболее сложных задач при создании ускорителей ионов является разработка начальных секций, предназначенных для формирования, группировки и ускорения пучков заряженных частиц (до

энергии 100 кэВ/нуклон для тяжёлых ионов и от 0,5 до 1 МэВ для лёгких ионов с $Z/A > 1/10$). При решении обозначенной задачи возникает ряд требований, главными из которых являются получение больших величин выходного тока пучка при достижении высокого коэффициента токопрохождения (близкого к 100 %). Малые скорости сильноточных пучков заряженных частиц являются серьёзной проблемой на пути обеспечения эффективной поперечной фокусировки частиц вследствие сильного влияния расталкивающих кулоновских сил поля собственного пространственного заряда пучка.

Ввиду малых значений скоростей частиц, использование внешних фокусирующих элементов (квадруполей, соленидов) в низкоэнергетических линейных ионных ускорителях сопряжено со значительными трудностями инженерного характера, поэтому поперечная устойчивость должна обеспечиваться исключительно за счёт специального выбора конфигурации полей в системе. Кроме того, для разработки малогабаритных сильноточных систем инжекции и ускорения тяжёлых ионов отсутствует единый метод расчёта динамики заряженных частиц.

Для ускорения и фокусировки низкоэнергетических протонных и ионных пучков может быть использован один из типов высокочастотной (ВЧ) фокусировки, а именно: фазопеременная фокусировка (ФПФ) и её модификации, пространственно-однородная квадруполюсная фокусировка (ПОКФ), ондуляторная фокусировка и фокусировка полем несинхронных с пучком пространственных гармоник.

Несмотря на определённую перспективу применения линейных ускорителей с ФПФ для малогабаритных сильноточных систем инжекции и ускорения тяжело-ионных пучков, гораздо успешнее развиваются системы, в которых высокочастотная фокусировка имеет квадруполюсный характер.

Однако ставшие классическими структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой не лишены недостатков, в числе которых сложность изготовления и настройки, относительно невысокий темп ускорения. Кроме того, ограничение пропускной способности таких структур наступает уже на начальной стадии ускорения (при энергиях ионов от 1 кэВ/нуклон) и связано с отсутствием условий, которые могут обеспечить эффективную группировку и фокусировку пучка при малой скорости частиц и большой величине силы кулоновского расталкивания ионов в пучке. В свою очередь системы с ондуляторной фокусировкой эффективны лишь для пучков лёгких ионов (p , H^- , D^\pm , He^+ , He^{+2}).

Альтернативой системам с перечисленными типами ВЧ фокусировки являются гораздо более дешёвые аксиально-симметричные каналы с фокусировкой за счёт пространственных гармоник ВЧ поля, позволяющие получать ускоренные ионные пучки высокого качества с токами до 0,2 А. Для транспортировки низкоэнергетических ионных пучков эффективно применяется периодическая система электростатических линз (электростатический ондулятор). Поэтому предлагается конструктивно совместить в одном и том же устройстве периодическую аксиально-симметричную высокочастотную (ВЧ) резонансную структуру и систему фокусировки – электростатический ондулятор (ЭСО). При этом, механизм аксиально-симметричной ВЧ фокусировки высшей пространственной гармоникой поля (АСВЧФ) и фокусировки полем ЭСО один и тот же, если рассматривать её влияние в системе координат, связанной с данной гармоникой.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, методов и алгоритмов для определения условий

продольной и поперечной устойчивости динамики пучка ионов в линейных ускорителях как с АСВЧФ, так и с периодической системой электростатических линз. В рамках решения этой задачи рассматриваются следующие вопросы:

- разработка единого метода исследования динамики ионных пучков в периодических резонаторах как с фокусировкой пространственными (несинхронными) гармониками поля, так и с ЭСО;
- изучение условий, при которых одновременно достигается продольная и поперечная устойчивость пучков;
- исследование эффектов нелинейной связи продольных и поперечных колебаний пучков;
- определение акцептансов структур линейных ускорителей;
- разработка методики выбора геометрических характеристик резонансных структур для получения оптимальной конфигурации полей;
- выбор и расчёт конкретных вариантов изучаемых структур.

Научная новизна.

1. Исследованы вопросы устойчивости движения ионных пучков с различным отношением заряда к массе в периодических резонансных линейных ускорителях с фокусировкой несинхронными гармониками ВЧ поля и с пространственно-периодической электростатической фокусировкой.

2. Сформулированы требования на выбор амплитуд фокусирующих гармоник в периодических резонансных линейных ускорителях, при которых удаётся реализовать устойчивое ускорение ионных пучков.

3. Впервые предложен и обоснован метод пространственно-периодической электростатической фокусировки ионных пучков.

4. С помощью метода усреднения по периоду быстрых осцилляций получено векторное уравнение движения в форме Гамильтона, позволяющее анализировать продольную и поперечную динамику пучков в системе с рассмотренными типами фокусировки.

5. Исследована нелинейная связь продольного и поперечного движения тяжёлых ионов с использованием эффективной потенциальной функции. Найдены продольные аксептансы ускоряющих каналов в случае фокусировки несинхронными гармониками ВЧ поля и электростатическим ондулятором. Впервые разработана модель динамики частиц, позволяющая изучать некогерентные колебания частиц внутри сгустка и осуществлять контроль за сохранением размера огибающей пучка. Показано, что учёт адиабатического затухания колебаний частиц приводит к увеличению области их устойчивого движения.

Практическая ценность. На основе полученных результатов предложены варианты ускорителей-группирователей ионов. Разработаны аналитические и численные методы исследования динамики в рассмотренных структурах. Разработан метод расчёта динамических аксептансов таких структур.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Методика анализа динамики низкоэнергетических протонных и ионных пучков в периодических резонансных структурах как в консервативном, так и неконсервативном приближениях.

2. Результаты сравнения структур с АСВЧФ и ЭСО с точки зрения эффективности продольной и поперечной устойчивости для различных диапазонов энергий.

3. Результаты анализа продольного и поперечного движений в структурах с ЭСО и АСВЧФ, условия устойчивости движения пучка.

4. Результаты исследования связи продольного и поперечного движений с учётом нелинейных процессов в сгустке. Методика выбора параметров ускорителя, обеспечивающих сохранение размера огибающей и эмиттанса пучка.

5. Результаты численного моделирования самосогласованной динамики для нескольких вариантов ускоряющих структур протонов и тяжелых ионов, подтвердившие выводы аналитического исследования.

6. Методика выбора геометрических параметров каналов структур с АСВЧФ и ЭСО, обеспечивающих необходимую конфигурацию поля в них.

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 отражены в четырёх опубликованных печатных работах в следующих реферируемых журналах: «International Journal of Modern Physics A», «Вопросы атомной науки и техники», «Вестник Санкт-Петербургского университета», а также были представлены на российских и международных конференциях и семинарах, в частности:

- Первой Международной конференции по ускорителям частиц IPAC'10 (Киото, Япония, 2010);
- Международных конференциях «Beam dynamics and optimization» 2008 и 2010 (Санкт-Петербург, Калифорния, США, 2008; Санкт-Петербург,

- Российская Федерация, 2010);
- 46 семинаре ICFA по современной динамике адронных пучков высокой интенсивности и высокой яркости HB 2010 (Моршак, Швейцария, 2010);
 - XI Европейской конференции по ускорителям частиц EPAC'08 (Генуя, Италия, 2008);
 - XX и XXI Международных семинарах по ускорителям заряженных частиц IWCPA (Алушта, Украина, 2007, 2009);
 - IV Международной конференции по физике и контролю PhysCon (Катания, Италия, 2009);
 - Ежегодных научных сессиях МИФИ (Москва, Российская Федерация, 2006, 2007, 2008, 2011);
 - X и XI научных конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ (Дубна, Российская Федерация, 2006, 2007).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников, включающего 91 наименование. Общий объём диссертации составляет 179 страниц, включая 102 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность выбора темы и состояние исследуемой проблемы к настоящему времени, формулируются основные цели и задачи диссертации. Излагается новизна результатов, практическая ценность работы и приводятся положения, выносимые на защиту.

Первый раздел содержит описание аналитического метода исследования движения заряженных частиц в быстро изменяющемся поле

применительно к электродинамической задаче. Привлечённый для анализа метод является разновидностью метода Крылова–Боголюбова–Митропольского (КБМ-метод). Выбор данного метода продиктован возможностью с его помощью устранить в любом порядке по возмущению быстро осциллирующие члены, что, в свою очередь, допускает построение эффективных гамильтонианов (лиувиллианов).

Вначале получено уравнение, описывающее движение пучка в одночастичном приближении без учёта влияния поля собственного объёмного заряда в структурах с фокусировкой пространственными гармониками ВЧ поля и с пространственно-периодической электростатической фокусировкой, работающих на виде колебаний π . Очевидно, при изучении движения высокоинтенсивных пучков частиц необходимо отыскивать самосогласованное решение. Однако в данной ситуации анализ движения пучка в одночастичном приближении в заданном внешнем поле может быть использован в качестве первого приближения решения самосогласованной модели.

С помощью КБМ-метода уравнение движения в системе координат, связанной с равновесной частицей, в гладком приближении (усреднённое по периоду быстрых осцилляций радиус-вектора) можно записать в форме Гамильтона, а первый интеграл системы «пучок-волна» в виде:

$$\mathcal{H}(\mathbf{Q}, \mathbf{P}) = \frac{\mathbf{P}^2}{2} + U_{\text{ef}}(\mathbf{Q}). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{Q} = (\zeta, \eta)$, ζ и η – безразмерные продольная и поперечная компоненты радиус-вектора, \mathbf{P} – импульс, канонически сопряжённый обобщенной координате \mathbf{Q} , а U_{ef} суть «эффективная» (действующая) потенциальная функция (ЭПФ) полигармонического поля в структуре. Эта

функция зависит только от медленно меняющихся переменных. ЭПФ даёт полное описание многомерной динамики пучка в гладком одночастичном приближении в полигармоническом поле резонансных структур, позволяет исследовать связь между продольным и поперечным движением.

Далее в данном разделе с использованием полученной ЭПФ проведён анализ фазовых портретов системы «пучок-волна» в зависимости от степени влияния несинхронных гармоник на динамику частиц. По результатам анализа построена диаграмма «устойчивости» в пространстве параметров (ϕ_s, η) , приведённая на рисунке 1. Здесь $\eta = -2e_s(2s+1)^{-2} \times \left[\sum_{\substack{n \neq s \\ n+p=2s}} e_n e_p / 4(n-s)^2 + 2 \sum_{\substack{n \neq s \\ n-p=2s+1}} e_n e_p / 4(n-s)^2 \right]^{-1}$, e_i – i -ая приведённая амплитуда гармоники ВЧ поля, $n, s, p \in \mathbb{N}_0$, s – номер синхронной с пучком гармоники поля, а ϕ_s есть фаза равновесной частицы.

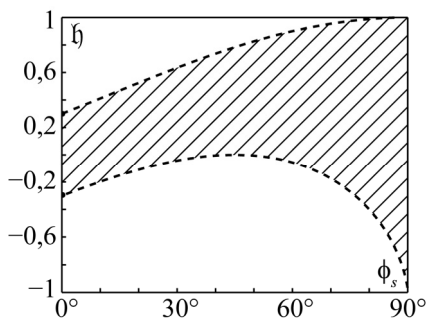


Рисунок 1 – Диаграмма устойчивости

На приведённой диаграмме заштрихованная область соответствует таким значениям параметров структур, при которых ЭПФ имеет два локальных минимума на одном периоде высокочастотного поля. На границах этой области второй локальный минимум вырождается в точку

индифферентного равновесия, а для значений параметров вне границ ЭПФ, на периоде ВЧ поля, имеет единственный минимум.

На основании результата задачи Кеплера об эксцентричной аномалии получено выражение для фазовых размеров сепаратрис, соответствующих движению частиц строго по оси структур, в виде рядов Каптейна.

Для построения замкнутой полуаналитической модели движения частиц в рассматриваемых структурах, т. е. для учёта влияния поля собственного пространственного заряда пучка на собственную динамику, использовано наиболее часто применяемое представление пучка среди ограниченных фазовых распределений – аппроксимация равномерно заряженным эллипсоидом, поскольку компоненты собственного поля пучка могут быть представлены как взвешенные интегралы по плотности распределения. Соответствующая поправка учтена в ЭПФ. Представление пучка равномерно заряженным эллипсоидом может не вполне отвечать реальной ситуации, поэтому следует рассматривать данную модель как простейшее средство для выбора направления оптимизации параметров структур, с последующим их уточнением посредством численного моделирования самосогласованного движения.

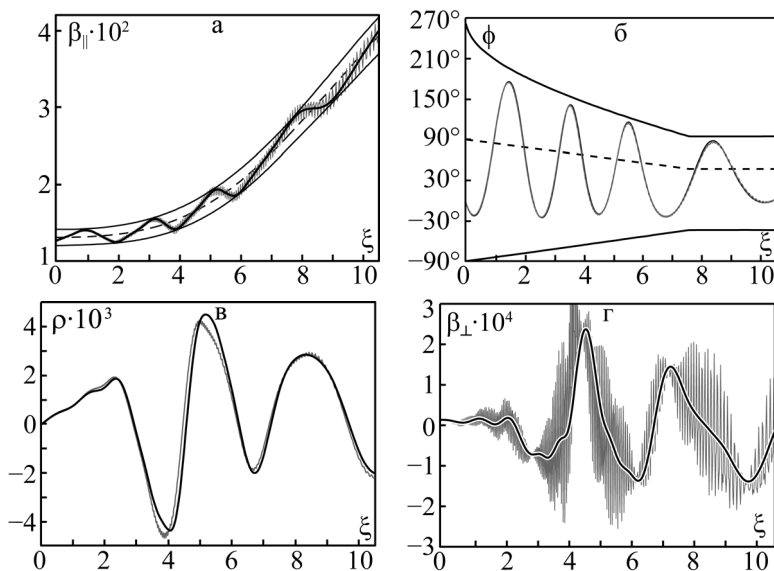
Значительная часть первого раздела посвящена исследованию связанных нелинейных колебаний системы «пучок-волна». Пользуясь разложением ЭПФ в окрестности точки начала отсчёта, которое имеет вид обобщённого потенциала Хенона–Хейлеса, и, привлекая метод Линтстедта–Пуанкаре–Цейпеля, получены общие решения для системы с гамильтонианом (1) вплоть до членов третьего порядка малости. Найдены амплитудно-частотные характеристики для малых связанных нелинейных колебаний. С помощью полученных результатов установлено условие, при котором взаимодействие между различными степенями свободы системы

«пучок-волна» приобретает резонансный характер. Показано, что сведение параметрического воздействия продольных колебаний на поперечное движение лишь к росту амплитуды колебаний последних приводит к неверным результатам.

Во втором разделе проведён анализ особенностей продольной и поперечной динамики пучка в гладком приближении, предполагая, что ток пучка пренебрежимо мал. Анализ выполнен как для структур с АСВЧФ, так и для структур с ЭСО. В частности рассмотрены случаи, когда в структуре с АСВЧФ, наряду с основной, присутствует лишь одна высшая гармоника поля, а при пространственно-периодической электростатической фокусировке – основная гармоника поля ондулятора. Сформулированы границы применимости метода, использованного при исследовании динамики частиц. Получены необходимые условия, обеспечивающие устойчивость движения системы «пучок-волна». На основании полученных аналитических результатов осуществлена численная проверка применимости гладкого приближения в приложении к поставленным задачам.

Вначале произведён расчёт динамики протонного пучка в структуре с АСВЧФ. Пользуясь полученными теоретическими результатами, выбраны параметры структуры, которые обеспечивают устойчивое движение пучка. Так закон, по которому происходит изменение амплитуды основной (ускоряющей) гармоники поля, выбран прямо пропорциональным квадрату синуса. В свою очередь, изменение равновесной фазы описывается кусочно-гладкой функцией. Расчёт производился при следующих основных параметрах: частота ВЧ поля $f = 200$ МГц, длина структуры $L = 2,5$ м, длина участка группировки $L_{gr} = 1,8$ м, длина участка изменения амплитуд гармоник $L_f = 2,3$ м, начальное значение фазы равновесной частицы

составляло 90° (постоянное во всех расчётах), а конечное $\phi_s(L) - 46^\circ$, максимальное значение амплитуды нулевой гармоники поля на оси E_0 составляло $18,4 \text{ кВ/см}$, величина отношения амплитуды высшей (фокусирующей) гармоники к амплитуде основной χ была выбрана равной 10, энергия инжекции W_{in} составляла 80 кэВ . На рисунке 2 представлены результаты расчёта динамики протонного пучка, полученные как при расчёте в гладком приближении, так и для не усреднённого движения. Конечная энергия пучка W_{out} составила $0,73 \text{ МэВ}$.



Изменение вдоль приведённой длины структуры: а) продольной составляющей скорости пучка вдоль структуры; б) фазы; в), г) приведённых поперечных составляющих радиус-вектора и скорости пучка соответственно

Рисунок 2 – Динамика протонного пучка в структуре с АСВЧФ

На рисунке 3 представлено изменение квадратов собственных частот

малых линейных продольных (сплошная кривая) и поперечных колебаний (пунктирная кривая) пучка вдоль длины структуры. Как видно из указанного рисунка, хотя на небольшом начальном участке группировки ЭПФ не имеет абсолютного минимума на оси структуры, удаётся произвести группировку и ускорение пучка, поскольку с ростом скорости равновесной частицы происходит деформирование ЭПФ, вследствие чего на оси образуется абсолютный минимум. На рисунке 4 представлены сечения гиперповерхности $\mathcal{H}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \mathcal{H}_s$ (\mathcal{H}_s – гамильтониан, соответствующий сепаратрисе) трансверсальной плоскостью $\eta = 0$ (отображение Пуанкаре). Видно, что при выбранных параметрах динамика вблизи сепаратрисы нерегулярна, происходит образование стохастического слоя (в системе наступает детерминированный хаос), наличествует чувствительная зависимость от начальных условий, что обуславливается свойством нелинейной системы «пучок-волна» экспоненциально быстро разводить первоначально близкие траектории в ограниченной области фазового пространства.

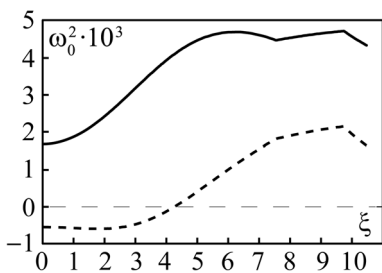


Рисунок 3 – Изменение квадратов частот вдоль длины структуры

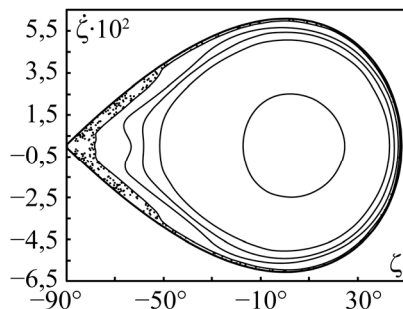
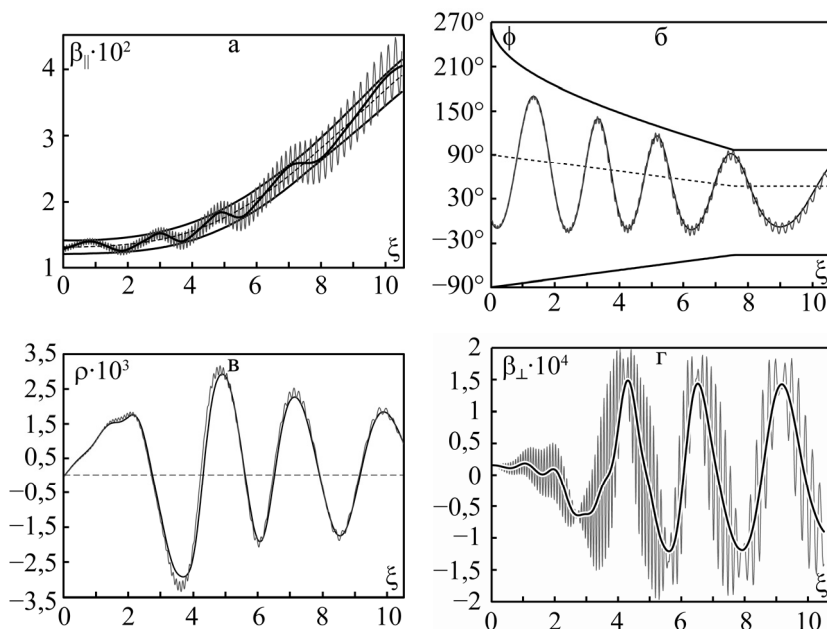


Рисунок 4 – Отображение Пуанкаре

Поскольку механизмы ВЧ фокусировки первой несинхронной гармоникой и фокусировки полем ЭСО аналогичны, то для сравнения эффективности обеих систем выполнен расчёт динамики протонного пучка при упомянутых ранее параметрах, причём отношение χ_u амплитуды основной гармоники поля ондулятора к основной гармонике ВЧ поля было равным 10. На рисунке 5 представлены результаты расчёта динамики пучка полученные как при расчёте в гладком приближении, так и для не усреднённого движения. Как и следовало ожидать, основная гармоника поля ЭСО вызывает осцилляции скорости бóльшие, чем высшая гармоника ВЧ поля резонансной структуры. Конечная энергия пучка составила 0,71 МэВ.



Обозначения см. рисунок 2

Рисунок 5 – Динамика протонного пучка в структуре с ЭСО

Сравнивая рисунок 5 и рисунок 3 видно, что использованный КБМ-метод даёт адекватное описание движения пучка как для структуры с АСВЧФ, так и для структуры с ЭСО. Изменение квадратов собственных частот малых линейных колебаний в структуре с ЭСО показано на рисунке 6. На рисунке 7 представлено отображение Пуанкаре при $\mathcal{H} = \mathcal{H}_s$. Видно, что при выбранных параметрах динамика системы «пучок-волна» регулярна.

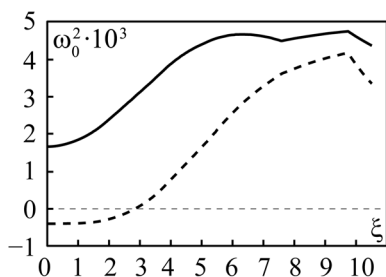


Рисунок 6 – Изменение квадратов частот вдоль длины структуры

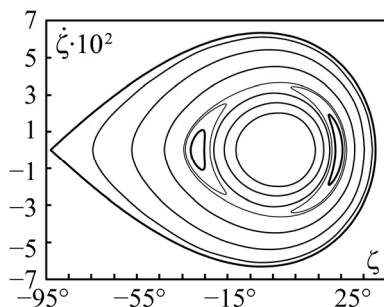


Рисунок 7 – Отображение Пуанкаре

Поскольку выбранный закон изменения амплитуды синхронной гармоники поля не является оптимальным с точки зрения максимизации конечной энергии пучка и коэффициента токопрохождения, для анализа движения ионов Pb^{25+} в рассматриваемых структурах был использован метод оптимизации распределения поля. Метод основан на предположении, что величина предельного «продольного» тока пучка пропорциональна акцептансу канала. При найденном, путём оптимизации, распределении полей в структурах с АСВЧФ и ЭСО проведён расчёт динамики ионного пучка при параметрах, представленных в таблице 1. Различие в рабочих

частотах рассматриваемых структур обусловлено следующим. При заданной начальной энергии частиц пучка геометрический период структуры с АСВЧФ при $f = 101,28$ МГц является малым, что не позволяет разметить необходимое количество электродов на его длине, поэтому выбрана частота 33,67 МГц. В свою очередь, структура с ЭСО при работе на частоте 101,28 МГц может быть конструктивно реализована, поперечные габариты будут меньшими, однако темп ускорения при этом более чем в два раза ниже в сравнении с первой структурой.

Таблица 1

Параметр	АСВЧФ	ЭСО
Частота, МГц	33,67	101,28
Длина структуры, м	2,44	2,5
Длина группирующей части, м	1,75	0,95
Значение равновесной фазы в конце группирующей части	22,5°	36°
Максимальное значение амплитуды ускоряющей гармоники ВЧ поля на оси, кВ/см	43	12
Отношение амплитуд гармоник поля	4	9,5
Энергия инжекции, кэВ/нуклон	2,5	
Энергия экстракции, кэВ/нуклон	260	103

В третьем разделе представлены результаты численного моделирования самосогласованной динамики протонных и ионных пучков в изучаемых структурах при параметрах, выбранных во втором разделе. Полученные результаты хорошо совпадают с результатами теоретического

анализа, проведенного ранее. Разработана методика расчёта динамических аксептансов ускоряющих структур.

Пуём численного моделирования динамики пучков определены коэффициенты токопрохождения, которые при токе протонов 100 мА составили 62 % и 66 % для структур с АСВЧФ и ЭСО соответственно. Низкие коэффициенты токопрохождения подтвердили необходимость оптимизации конфигурации полей в таких системах. Отметим, что для указанных структур не происходит значительно роста огибающей пучка, что обеспечивается достаточной жесткостью фокусировки. При моделировании динамики ионного пучка с током 5 мкА коэффициент токопрохождения составил 85 % для обеих структур, что достигнуто благодаря оптимизации распределения полей в них. Однако для структуры с АСВЧФ обнаружен существенный (от 1 до 5 мм) рост огибающей пучка, который отсутствует в случае использования ЭСО.

В четвертом разделе приведена модель для исследования динамики пучка с учётом адиабатического затухания колебаний. Кроме того, разработанная модель позволяет исследовать некогерентные колебания частиц внутри сгустка, что играет важную роль в задачах по контролю за эмиттансом (огибающей) пучка. С помощью КБМ-метода получено уравнение движения пучка, содержащее эффективную функцию, найденную с учётом затухания его колебаний. Аналогично тому, как это сделано в первом разделе, изучены особенности фазового и радиального движений. Определены условия существования двух областей захвата частиц на одном периоде ВЧ поля, образование которых является следствием влияния высшей пространственной гармоники ВЧ поля. Предложен аналитический метода расчёта энергетического спектра частиц в системе «пучок-волна» с демпфированием. С помощью полученной

эффективной функции изучен частный случай малых демпфированных продольных и поперечных колебаний. Выбранные во втором разделе параметры структуры с АСВЧФ для ионов Pb^{25+} приводят к тому, что частота малых поперечных колебаний, полученная в рамках рассматриваемой в данном разделе модели, принимает комплексное значение вдоль все длины канала. Поэтому было произведено уточнение ранее выбранных параметров (см. таблицу 1). Так, конечное значение равновесной фазы увеличено до 30° , максимальное значение амплитуды синхронной гармоник на оси снижено до 16 кВ/см, а отношение амплитуд гармоник χ увеличено с 4 до 9. Остальные параметры не изменялись. В результате проведённого численного моделирования при данных параметрах коэффициент токопрохождения составил 85 %, роста огибающей не обнаружено, конечная энергия составила 106 кэВ/нуклон, что совпадает с величиной, полученной для структуры с ЭСО в третьем разделе. Разработанная методика позволяет осуществлять контроль над размером огибающей пучка вдоль структуры. Отметим, что при ультрарелятивистских скоростях частиц, в виду технической невозможности реализации структур с АСВЧФ, структура с ЭСО оказывается безальтернативной. В свою очередь структура с АСВЧФ может успешно использоваться для ускорения сгруппированных ионных пучков.

В пятом разделе представлена методика расчёта геометрических параметров изученных структур, при которых удастся реализовать требуемые конфигурации полей в них. Произведён расчёт изменения длин периодов структур по заданному движению пучка.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана общая методика анализа динамики ионных пучков в структурах с АСВЧФ и ЭСО.
2. С использованием метода усреднения по периоду быстрых осцилляций проведён анализ динамики протонных и ионных пучков в структурах с АСВЧФ и ЭСО. Изучено влияние высших пространственных гармоник ВЧ поля на движение частиц.
3. Исследованы связанные нелинейные колебания системы «пучок-волна». Определены условия возникновения резонансного взаимодействия между степенями свободы такой системы.
4. Проведено сравнение структур с АСВЧФ и ЭСО с точки зрения эффективности продольной и поперечной устойчивости для различных диапазонов энергий.
5. Результаты аналитического исследования динамики проверены численным моделированием для нескольких вариантов ускоряющих структур протонов и тяжёлых ионов.
6. Разработана модель динамики пучка с учётом адиабатического затухания его колебаний. На основании результатов, полученных с помощью данной модели, показана одинаковая эффективность структур с АСВЧФ и ЭСО для рассмотренных диапазонов энергий пучков. Сформулированные условия, при которых достигается сохранение размера огибающей пучка.
7. Предложена методика выбора геометрических параметров каналов структур с АСВЧФ и ЭСО.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Дюбков В.С., Полозов С.М. Управление эмиттансом пучка в линейном ускорителе с трубками дрейфа на малую энергию // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2011. — Вып. 1. — С. 135—142. — ISSN 1811-9905.
2. Dyubkov V.S., Masunov E.S. Effective acceptance evaluation of linear resonance accelerator // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. — 2010. — Vol. 54, N 3. — P. 94—97. — ISSN 1562-6016.
3. Dyubkov V.S., Masunov E.S. Investigation and optimization of low-energy heavy-ion beam dynamics in periodic axisymmetrical structures with dc focusing // International Journal of Modern Physics A. — 2009. — Vol. 24, N 5. — P. 843—856. — ISSN 0217-751X.
4. Masunov E.S., Dyubkov V.S. Comparison of two focusing methods in low-energy ion linac with electric undulator fields // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. — 2008. — Vol. 49, N 3. — P. 166—170. — ISSN 1562-6016.
5. Dyubkov V.S., Polozov S.M. Self-consistent beam dynamics in rf linacs with non-synchronous harmonics focusing // Proceedings for the fifth workshop on High Brightness, High Intensity Hadron Beams HB'10. — Morschach, 2010. — P. 139—141.
6. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Samoshin A.V. Beam envelope control in heavy ion superconducting drift tube linac // Proceedings for the first International Particle Accelerator Conference IPAC'10. — Kyoto, 2010. — P. 4689—4691. — ISBN 978-92-9083-352-9.

7. Choice of accelerating system for undulator linear accelerator / V.S. Dyubkov [et al.] // Proceedings for the 11th biennial European Particle Accelerator Conference EPAC'08. — Genoa, 2008. — P. 3455—3457. — ISBN 978-92-9083-315-4.
8. Дюбков В.С., Масунов Э.С. Применение периодической электростатической фокусировки в ионных ускорителях на малую энергию // «Труды десятой научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ». — Дубна, 2006. — С. 110—113. — ISBN 5-9751-0024-0.
9. Дюбков В.С., Масунов Э.С. Выбор параметров линейного ускорителя ионов с электростатическим ондулятором // «Труды одиннадцатой научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ». — Дубна, 2007. — С. 96—99. — ISBN 5-9751-0038-0.
10. Дюбков В.С. Фокусировка низкоэнергетичных ионов в линейном ускорителе с помощью электростатического ондулятора // «Научная сессия МИФИ – 2006» : сб. науч. тр.. — Москва, 2006. — Т. 16. — С. 132—133. — ISBN 5-7262-0633-9.
11. Дюбков В.С., Масунов Э.С. Фокусировка ионных пучков низких энергий в линейном ускорителе с помощью электростатического ондулятора // «Научная сессия МИФИ – 2007» : сб. науч. тр.. — Москва, 2007. — Т. 7. — С. 195—196. — ISBN 5-7262-0710-6.
12. Дюбков В.С., Масунов Э.С. Численное моделирование динамики ионного пучка в полях ондуляторов // «Научная сессия МИФИ – 2008» : сб. науч. тр.. — Москва, 2008. — Т. 5. — С. 68—69. — ISBN 978-5-7262-0883-1.
13. Дюбков В.С., Масунов Э.С. Выбор геометрии структуры ионного ускорителя с ВЧ-фокусировкой // «Научная сессия МИФИ – 2008» : сб. науч. тр.. — Москва, 2008. — Т. 5. — С. 70—71. — ISBN 978-5-7262-0883-1.