



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ГОУ
ВНИИЭА «Санкт-Петербургский
Государственный университет»,
профессор Скворцов Н.Г.

Н.Г.

«09» 06 2011 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Дюбкова Вячеслава Сергеевича «Влияние несинхронных гармоник электромагнитного поля на устойчивость движения ионных пучков в линейных резонансных ускорителях на малую энергию» представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Диссертация посвящена актуальным вопросам создания сильноточных низкоэнергетических ионных ускорителей. На протяжении многих лет в ядерной физике, физике высоких энергий, а также в высокотехнологичных отраслях промышленности широкое применение находят малогабаритные сильноточные линейные ускорители низкоэнергетических протонов и ионов. Одной из наиболее сложных задач при создании ускорителей ионов является разработка

начальных секций, предназначенных для формирования, группировки и ускорения пучков заряженных частиц. При создании таких ускорителей возникает ряд требований, главными из которых являются получение больших величин выходного тока пучка при достижении высокого коэффициента токопрохождения. Применение внешних фокусирующих устройств вызывает большие трудности, поэтому поперечная устойчивость должна достигаться за счёт особой топологии поля в таких ускорителях. Кроме того, для разработки малогабаритных сильноточных систем инъекции и ускорения тяжёлых ионов отсутствует единый метод расчёта динамики заряженных частиц. Существует ряд известных, апробированных и продемонстрировавших свою пригодность методов высокочастотной фокусировки. Однако практически все они имеют недостатки при низких значениях энергии протонных и ионных пучков. Поэтому разработка и исследование новых методов фокусировки таких пучков является необходимой. Целью настоящей работы является разработка математических моделей, методов и алгоритмов для определения условий продольной и поперечной устойчивости динамики пучков протонов и ионов в линейных ускорителях с пространственно-периодической электростатической фокусировкой и в системах с фокусировкой пространственными гармониками высокочастотного поля, обладающих аксиальной симметрией. Разрабатывается единый метод исследования динамики ионных пучков в периодических резонаторах как с фокусировкой пространственными (несинхронными) гармониками поля, так и с пространственно-периодической электростатической фокусировкой. Формулируются требования, выполнение которых обеспечивает динамическую устойчивость протонных и ионных пучков в таких системах. Разрабатывается метод выбора геометрических характеристик каналов структур.

Во введении приведен обзор работ, связанных с известными типами высокочастотной фокусировки пучков заряженных частиц. Обсуждается необходимость разработки новых методов фокусировки низкоэнергетических протонных и ионных пучков.

Первый раздел посвящён разработке аналитического метода исследования движения заряженных частиц в быстро изменяющемся поле, основанного на методе усреднения по периоду быстрых осцилляций. Вначале получено уравнение, описывающее движение пучка в одночастичном приближении без учёта влияния поля собственного объёмного заряда в структурах с фокусировкой пространственными гармониками высокочастотного поля и с пространственно-периодической электростатической фокусировкой, работающих на виде колебаний π . Выполнено исследование влияния высших пространственных гармоник полигармонического поля таких структур на динамику пучка, в результате чего построена соответствующая диаграмма. Опираясь на хорошо известный результат задачи Кеплера об эксцентричной аномалии, в работе получено выражение для фазовых размеров сепаратрис, соответствующих движению частиц строго по оси структур, в виде рядов Каптейна. Далее предложена полуаналитическая модель движения частиц в рассматриваемых структурах, учитывающая влияние поля собственного пространственного заряда пучка на собственную динамику. Для этого использована простейшая аппроксимация пучка равномерно заряженным эллипсоидом. Большая часть первого раздела уделена исследованию связанных нелинейных колебаний системы «пучок-волна». Для этого автором использован метод Линтстедта–Пуанкаре–Цейпеля, получены общие решения вплоть до членов третьего порядка малости. Найдены амплитудо-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 высокочастотной фокусировкой несинхронными (пространственной) гармониками поля (АСВЧФ), так и для структур с пространственно-периодической электростатической фокусировкой (электростатическим ондулятором). 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 показано, что системы с АСВЧФ могут быть наиболее эффективными для сгруппированных ступков. Осуществлена численная проверка применимости гладкого приближения. Сначала выполнен расчёт нелинейной динамики протонного пучка в рассматриваемых структурах при простых законах изменений амплитуд гармоник и равновесной фазы. Показана необходимость численной оптимизации выбранных законов изменения амплитуд гармоник и равновесной фазы вдоль длины таких систем, которая проведена при моделировании динамики ионов свинца с отношением заряд-масса 0,12.

В третьем разделе представлены результаты численного моделирования самосогласованной динамики протонов и ионов в рассматриваемых автором структурах. Для численного моделирования динамики пучков в структуре с электростатическим ондулятором разработана программа BEAMDULAC-DC. Из представленных результатов видно, что путём численной оптимизации удаётся увеличить коэффициент токопрохождения от 66 % до 92 % (для структур с АСВЧФ) при высоком темпе ускорения (до 1 МэВ/Z·нуклон). Показано хорошее соответствие аналитического исследования численным результатам моделирования динамики. Для случая ультранизких энергий пучков предлагается использовать систему с электростатическим ондулятором. Разработана методика расчёта динамических акцептансов ускоряющих структур.

В четвёртом разделе предложена модель динамики протонных и ионных пучков, позволяющая производить выбор основных параметров ускорителя, при которых гарантируется сохранение эмиттанса пучка и размера огибающей. Модель рассмотрена на примере движения пучков ионов Pb^{+25} с энергией инъекции 2,5 кэВ/нуклон в структуре с АСВЧФ. На основании последующего численного моделирования установлена адекватность предложенной модели поставленной задаче.

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

Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании новых и оптимизации работы действующих аксиально-симметричных каналов систем группировки, ускорения и фокусировки низкоэнергетических протонных и ионных пучков. Такие системы необходимы, в частности, для целей ядерной медицины и могут быть

использованы в качестве инжекторов для коллайдерного комплекса ОИЯИ NICA (Дубна, Россия). Научные результаты диссертации могут применяться в Санкт-Петербургском государственном университете, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ИФВЭ, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ.

В ходе выполнения работы получен большой объём новых аналитических и численных результатов, проведено их обобщение и анализ. Впервые рассмотрено применение электростатического ондулятора как элемента ускоряюще-фокусирующей периодической резонансной структуры. Работа является целостной и выполнена на высоком научном уровне.

К недостаткам диссертации можно отнести следующее:

1. Не проведен расчет предельных токов для рассмотренных в работе вариантов аксиально-симметричных структур с пространственно-периодической электростатической фокусировкой и фокусировкой высшими пространственными гармониками высокочастотного поля.
2. При моделировании динамики протонных и ионных пучков не учитывается влияние геометрических характеристик рассмотренных структур.
3. Термин аксептанс используется не совсем корректно.
4. В работе имеются незначительные неточности и опечатки.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность работы в целом. Диссертация Дюбкова Вячеслава Сергеевича является законченным научным исследованием и полностью соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат правильно и полно отражает содержание работы. Основные положения диссертации и полученные результаты достаточно полно представлены в опубликованных работах. Тема диссертации и её содержание соответствует специальности.

Полученные диссертантом результаты имеют значительную научную и практическую ценность, а Дюбков Вячеслав Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв подготовил заведующий кафедрой Теории систем управления электрофизической аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор Д.А. Овсянников.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры Теории систем управления электрофизической аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета (протокол № 6 от 09 июня 2011 г.).

Заведующий кафедрой,
д.ф.-м.н., профессор



Овсянников Д.А.