

Ա.Ի.Ալիքսանյանի անվ. ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Մարտիրոսյան Յուրիկ Լավրենտի

ՓՆՁԵՐԻ ՈՉ-ԳԾԱՅԻՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ԷՖԵԿՏՆԵՐԸ
ԿՈՒՏԱԿԻՉ ՕՂԱԿՆԵՐՈՒՄ

Ա.04.20 – Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա

մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
դոկտորի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2004

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И.Алиханяна

Мартirosян Юрик Лаврентьевич

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ
В НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦАХ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

ЕРЕВАН – 2004

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա.Ի.Ալիխանյանի անվ. Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում:

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝
 տեխն. գիտ. դոկտոր
 Ա. Ռ. Թումանյան
 ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
 Հ. Կ. Ավետիսյան
 ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր
 Ս. Գ. Հարությունյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՌԱԱ Պ.Ն.Լեբեդևի անվ. ֆիզիկայի ինստիտուտ, Միջուկային ֆիզիկայի և աստղաֆիզիկայի բաժանմունք, Մոսկվա:

Պաշտպանությունը կայանալու է 2004 թ. դեկտեմբերի 28 -ին ժամը 14-00-ին Ա.Ի.Ալիխանյանի անվ. Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում գործող ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդում (հասցեն՝ Երևան-36, Ալիխանյան Եղբայրներ փող. 2, հեռ. 351500): Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2004 թ նոյեմբերի 26-ին:

024 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, ֆ.-մ.գ.թ. *Ա. Մարգարյան* Ա. Մարգարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте им. А.И.Алиханяна.

Официальные оппоненты
 доктор техн. наук
 А.Р.Туманян
 доктор физ.-мат. наук, профессор
 Г.К.Аветисян
 доктор физ.-мат. наук
 С.Г.Арутюнян

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Отделение ядерной физики и астрофизики, Москва.

Защита состоится 28-го декабря 2004 г. в 14-00 на заседании специализированного совета ВАК 024 при Ереванском физическом институте им А.И. Алиханяна, по адресу:

Ереван-36, ул. Братьев Алиханян 2. Тел: 351500.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 26-го ноября 2004г.

Ученый секретарь специализированного совета 024, к.ф.-м.н. *Ա. Մարգարյան* А.Маргарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие физики высоких энергий, наук о жизни и строении вещества на современном этапе требуют разработки адронных и электронных ускорителей с предельно малыми эмиттансами, позволяющими достичь высоких светимостей встречных пучков в столкновителях частиц или высокой яркости фотонных пучков в источниках синхротронного излучения. При этом особую важность приобретают вопросы исследования стабильности пучка, времени жизни пучка, деформации фазового распределения частиц и т.д. Нелинейные эффекты динамики пучка во внешнем магнитном поле являются неотъемлемой частью этих исследований, которые определяют как качество самого ускорителя, так и уровень проводимых исследований.

Целью диссертации является исследование нелинейных эффектов физики пучков заряженных частиц для получения адронных и электронных пучков с прецизионными параметрами.

Методы решения нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений были иницированы исследованиями стационарных орбит движения планет в небесной механике. Аналитические и численные методы нелинейной динамики получили свое дальнейшее развитие в теории движения пучков заряженных частиц в ускорителях в середине прошлого века. Циклические и линейные ускорители остаются в числе наиболее важных и необходимых инструментов фундаментальной и прикладной науки. Рассмотренные в диссертации проблемы и подходы продиктованы современными требованиями к пучкам заряженных частиц и находятся в русле актуальных проблем физики пучков заряженных частиц. В диссертации исследованы проблемы нелинейной физики пучков для трех типов ускорителей: рециркуляторов для охлаждения протонных и ионных пучков; накопителей электронов для генерации синхротронного излучения и циклических синхротронов.

В первой главе диссертации приводится обзор аналитических и численных методов анализа нелинейной динамики пучков в ускорителях и обсуждаются области применения этих методов с акцентом на применение симплексных интеграторов при трассировке пучков. В этой же главе обсуждается возможность применения математических

программ в ускорительной физике и приводится описание компьютерного кода для исследования нелинейных эффектов высшего порядка динамики пучков в циклических ускорителях.

Как один из способов преодоления ограничений, вытекающих из теоремы Лиувилля о сохранении плотности частиц в фазовом пространстве, в конце 60-х годов Будкером с сотрудниками в Новосибирске была предложена, а потом и экспериментально подтверждена блестящая идея электронного охлаждения – уменьшения фазового объема протонных и ионных пучков при их взаимодействии с “холодным” электронным пучком. Во второй главе диссертации рассмотрены проблемы охлаждения протонных пучков на высокие энергии с помощью электронных банчируемых пучков на средние энергии. Исследованы основные принципы и методы, лежащие в основе разработки физических параметров рециркулятора, а также исследована динамика пучка в рециркуляторе с учетом всех требований и ограничений, налагаемых на электронный пучок для повышения эффективности процесса охлаждения. Результаты проведенных исследований легли в основу разработки рециркулятора для охлаждения протонного пучка в ускорителе PETRA (DESY).

Для получения интенсивного излучения с высокой яркостью источника, электронный пучок в накопительных кольцах должен быть очень высокого качества: с малым эмиттансом, длительным временем жизни и высокой стабильностью. Все эти требования, порою противоречащие друг другу, приводят к очень жестким требованиям на магнитную систему накопительных колец. Один из важных аспектов устойчивого движения пучков в накопителях связан с влиянием нелинейностей магнитных полей, как основных магнитов, так и ондуляторов с малыми апертурами и сверхпроводящих вигглеров с большими полями.

В третьей главе диссертации исследованы нелинейные эффекты динамики пучков в накопителях электронов. Сюда входят исследование таких тонких физических эффектов, как влияние краевых полей дипольных и квадрупольных магнитов на динамику пучка, учет кинематических поправок, эффекты кривизны траектории, нелинейные синхротронные колебания и т.п. Разработаны новые подходы к исследованию этих эффектов, позволяющих максимально приблизить результаты теоретического анализа нелинейных процессов в накопителях электронов к реальной динамике частиц в действующей

машине. Третья глава включает также исследования и разработку таких важных с практической точки зрения систем для работы машины, как системы ввода, корректировки равновесной орбиты и связи поперечных колебаний. Результаты исследований применены для анализа и коррекции нелинейных эффектов в накопителе электронов источника CANDLE.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке физических основ магнитной структуры бустерного синхротрона-инжектора для современных источников синхротронного излучения, исследованию линейных и нелинейных эффектов динамики пучка в процессе ввода, ускорения и вывода частиц. Работы легли в основу разработки бустерного синхротрона, служащего инжектором для накопительного кольца CANDLE. Особенностью разработанного варианта бустера является малый эмиттанс ускоренного пучка, что позволяет существенно улучшить эффективность ввода частиц в основной накопитель и избежать пульсаций параметров ускоренного пучка от импульса к импульсу. Полученные результаты особенно актуальны в свете современных требований к источникам синхротронного излучения, как к квази-непрерывному источнику фотонов с высокой яркостью. Данная глава включает также разработку систем ввода/вывода пучка для бустера, линии транспортировки пучка от линейного ускорителя к бустеру и от бустера к накопителю.

ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью диссертационной работы является :

- Исследование и разработка системы охлаждения протонных пучков на высокие энергии с помощью банчируемых электронных пучков на средние энергии и реализация на этой основе электронного рециркулятора для охлаждения протонных пучков в ускорителе PETRA (DESY).
- Исследование нелинейных эффектов физики пучков в современных накопителях электронов с предельно малыми эмиттансами. Применение результатов исследований для оценки нелинейных эффектов в

накопителе электронов источника синхротронного излучения CANDLE.

- Предложение и разработка новых подходов к бустерным синхротронам на высокие энергии с малым эмиттансом для современных источников синхротронного излучения. Исследование нелинейных эффектов при вводе, ускорении и выводе пучков. Разработка бустерного синхротрона для проекта CANDLE.

Основные задачи диссертационной работы следующие.

I. Исследование вопросов охлаждения протонных пучков высоких энергий с помощью банчируемых электронных пучков на средней энергии. Разработка магнитной системы рециркуляторного кольца электронного пучка для проекта электронного охлаждения протонного пучка кольцевого ускорителя PETRA (DESY, Гамбург) и исследование динамики электронного пучка в рециркуляторе. В диссертации приведены основные подходы и результаты исследований, в частности:

- Предложение и разработка кольцевой дорожки рециркулятора с учетом наличия длинного соленоида в охлаждающей секции, с сохранением характеристик связанного движения круглого пучка.
- Предложение и разработка компьютерной программы для математического моделирования магнитного поля вдоль траектории частицы, а также исследования различных аспектов линейной и нелинейной динамики пучка в рециркуляторе;
- Анализ динамики пучка в рециркуляторе в режиме изохронного кольца.
- Исследование возможностей работы рециркулятора, как в бездисперсионном варианте, так и с учетом дисперсии в секции охлаждения пучка, где происходит эффективное взаимодействие электронного и протонного пучков;
- Исследование влияния пространственного заряда на динамику пучка, а также эффектов внутрипучкового рассеяния с целью определения предельного числа циркулирующих в кольце частиц.

II. Исследование нелинейной динамики электронного пучка в накопительных кольцах с учетом нелинейностей основных магнитных элементов магнитной системы, а также нелинейностей, вносимых магнитными полями ондуляторов и вигглеров, установленных в прямолинейных участках накопителя.

Для решения поставленных задач были выполнены следующие работы:

- математически промоделированы магнитные поля основных элементов (диполей и квадруполей), магнитной системы накопителя с учетом реального распределения краевых полей рассеяния;
- математическое моделирование трехмерных магнитных полей ондуляторов с малыми межполюсными зазорами и сверхпроводящих вигглеров с сильными магнитными полями, где нелинейности играют существенную роль;
- исследование возмущения сепаратрисы нелинейных синхротронных колебаний и их коррекция;
- разработка алгоритма и компьютерной программы для исследования динамических эффектов, связанных с нелинейностями магнитных полей.

III. Предложение и разработка бустерного синхротрона для накопительного кольца CANDLE в принципиально новой концепции, когда оба кольца расположены в одном туннеле, для чего была:

- разработана магнитная система бустерного синхротрона, отвечающего требованиям малого эмиттанса электронного пучка для эффективной инжекции пучка с номинальной энергией 3 ГэВ в накопительное кольцо и возможности работы в квазинепрерывном (top-up) режиме;
- исследована линейная и нелинейная динамика пучка в бустерном синхротроне в режиме ускорения;
- исследовано влияние токов Фуко, индуцированных в стенках вакуумной камеры в процессе ускорения;
- разработаны магнитные системы: линии транспортировки пучка из линейного ускорителя к бустеру, инжекции пучка в бустер и вывода пучка из бустерного синхротрона, линии транспортировки пучка из бустера к накопителю, а также инжекции пучка в накопительное кольцо.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При решении поставленных задач были использованы различные теоретические подходы: это методы классической и квантовой электродинамики, аналитического и численного решения задач нелинейной динамики, в частности применение симплексных интеграторов и алгебры Ли для Гамильтоновых систем, быстрого преобразования Фурье и метод частотных карт Ласкара, критерий Чурикова для хаотического движения, теория устойчивости Ляпунова и КАМ-теоремы для нелинейных систем.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. Предложены и разработаны принципиальные подходы для магнитной системы рециркуляционного кольца в схеме магнетизированного электронного охлаждения протонных и ионных пучков банчируемыми электронными пучками в средних областях энергий.
2. Предложен и разработан технический проект рециркулятора электронного пучка системы электронного охлаждения протонного пучка кольцевого ускорителя PETRA (DESY). Определены основные параметры магнитной системы рециркулятора, как в бездисперсионном варианте, так и при наличии дисперсии в секции охлаждения.
3. Детально изучена нелинейная динамика электронного пучка при наличии длинных соленоидов в магнитной системе рециркулятора, получены оценки величины циркулирующего тока электронов с учетом внутрипучкового рассеяния и сил пространственного заряда.
4. Предложен и разработан компьютерный код, позволяющий детально исследовать нелинейную динамику пучков в накопителях в режиме трекинга, а также комплексного решения других задач ускорительной физики.
5. Предложена и разработана методика вычисления эффектов краевых магнитных полей на динамику пучка с учетом реального распределения магнитного поля вдоль траектории частицы.
6. Разработанная методика применена для вычисления смещения частот бетатронных колебаний в накопителе

CANDLE, получена диаграмма нелинейных резонансов высших порядков, получена зависимость частот бетатронных колебаний от амплитуды осцилляций частицы и проведен анализ карты частот.

7. Найдена возмущенная сепаратриса синхротронных колебаний в накопительных кольцах из-за нелинейностей продольных колебаний. Разработан метод коррекции этих нелинейных осцилляций.
8. Разработана новая концепция для проектирования бустерного синхротрона-инжектора в современных накопительных комплексах третьего поколения.
9. Разработан технический проект бустерного синхротрона-инжектора для накопительного кольца CANDLE, а также линии транспортировки пучка от линейного ускорителя к бустеру и от бустера к накопителю.
10. Исследованы изменения основных параметров (эмитанс, разброс по энергии, оптические функции и т.д.) электронного пучка в режиме ускорения в бустерном синхротроне, влияние токов Фуко на динамику пучка.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Разработан компьютерный код для исследования нелинейной динамики пучков в накопительных комплексах (Глава 1).
2. Результаты работы, представленные в главе 2, легли в основу магнитной системы рециркулятора электронного пучка для электронного охлаждения протонного пучка ускорительного комплекса PETRA (DESY).
3. Разработанная методика расчета эффектов краевых магнитных полей была применена для численной оценки смещения частот бетатронных колебаний накопителя CANDLE, что позволяет осуществить тонкую настройку рабочей точки машины и, тем самым, добиться стабильности движения и увеличения жизни пучка в накопителе (Глава 3).
4. Результаты работы, представленные в Главе 4, позволили разработать магнитную систему бустерного синхротрона-инжектора накопительного комплекса CANDLE, включая системы ввода/вывода и транспортировки пучка. Эти результаты послужили основой для создания технической документации, как отдельных элементов бустера, так и бустера в целом.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

1. Основные концепции реализации магнитной структуры рециркуляторного кольца в схеме магнетизированного электронного охлаждения банчируемыми электронными пучками.
2. Впервые найдено решение для согласованного движения в поворотных участках рециркулятора, где происходит переход частицы из области продольного магнитного поля (солениды) в область поперечного поля поворотных магнитов с индексом $n=1/2$.
3. Новый аналитический подход для моделирования краевых магнитных полей.
4. Методика расчета влияния нелинейных магнитных полей как от элементов магнитной дорожки накопителя, так и вставных магнитов (ондуляторов и вигглеров), на динамику пучка в кольцевых ускорителях.
5. Полученное уравнение нелинейных синхротронных осцилляций в накопительных кольцах и способ коррекции искажения сепаратрисы фазовых колебаний.
6. Новая концепция для проектирования бустерного синхротрона-инжектора в современных источниках синхротронного излучения третьего поколения для получения электронных пучков с малыми эмитансами.
7. Полученные результаты были реализованы: при проектировании и разработке магнитной системы рециркулятора электронного пучка в проекте электронного охлаждения протонного пучка PETRA (DESY); при проектировании и разработке магнитной системы бустерного синхротрона – инжектора накопителя CANDLE; при проектировании накопительного кольца в комплексе CANDLE.
7. Разработаны системы ввода/вывода и транспортировки пучка для накопительного комплекса CANDLE.
8. Разработанный компьютерный код для исследования нелинейной динамики пучков в накопительных кольцах.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: IV Европейской конференции по ускорителям (Лондон,

1994г.), VII Европейской конференции по ускорителям (Вена, 2000г.), Международном совещании по электрон-фотонному взаимодействию в плотных средах (Нор-Амберт, 2001), Международном симпозиуме по источникам света средних энергий (Шанхай, 2001), VIII Европейской конференции по ускорителям (Париж, 2002), IV Международной конференции по микроэлектронике полупроводников (Цахкадзор, 2003), Международном совещании по накопителям (Даресбери, 2003), IX Европейской конференции по ускорителям (Люцерн, 2004), Международном совещании по источникам фотонов и их применения (Нор-Амберт, 2004), а также на семинарах ЕрФИ, CANDLE, ФИАН и DESY.

ПУБЛИКАЦИИ

Результаты диссертационной работы отражены в 32 научных публикациях, 31 из которых печатные, в том числе одно изобретение.

7 работ опубликованы без соавторов.

28 работы опубликованы после защиты кандидатской диссертации.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Текст содержит 193 страниц. Количество фигур – 85, таблиц – 39.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены научная новизна, основные научные результаты, выносимые на защиту и практическая значимость работы.

Глава 1 §§1,2 посвящены краткому изложению аналитических методов теории возмущений для нелинейных систем, а также численных методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений с акцентом на применение в исследованиях нелинейной динамики пучков в электромагнитных полях.

Аналитические методы (метод усреднения Боголюбова-Крылова, метод канонических преобразований переменных, практическая реализация которых опирается на использование рядов и преобразований Ли, или метод

нормальных форм, и др) применимы для систем с малым параметром, т.е. при слабых нелинейностях. Численные методы являются сравнительно более точными и позволяют вычислить траектории частиц в системах, как со слабой, так и с сильной нелинейностью. В частности, метод анализа карты частот Ласкара позволяет определить нелинейные резонансы высших порядков и их ширину. Вместе с интерполяцией быстрого преобразования Фурье, этот метод дает возможность определения частот бета-колебаний с высокой степенью точности путем интегрирования уравнений траектории частицы только для десятков оборотов в кольцевых ускорителях.

В §4 обсуждается важность условия симплектичности применяемых методов для разработки численных алгоритмов. Это условие играет большую роль при трассировке частиц в течение многих оборотов в кольце. Оно является математическим проявлением теоремы Лиувилля о сохранении плотности траекторий в фазовом объеме (обобщением условия равенства единицы детерминанта матрицы перехода для линейных систем), и позволяет избежать появления искусственных эффектов расширения или сжатия фазовых траекторий в фазовом пространстве при трассировке частиц в течение большого числа оборотов.

В §5 первой главы приводится детальное описание разработанного компьютерного кода. Идея состоит в использовании алгоритмов решения обыкновенных дифференциальных уравнений для численного интегрирования точных уравнений траектории частицы в магнитной системе накопителей.

Для вычисления динамической апертуры в разработанном подходе используется критерий экспоненты Ляпунова, а для построения графиков зависимости потерь частиц от числа оборотов используется дискретный анализ результатов трассировки частиц. Частота нелинейных бета-колебаний вычисляются по методике интерполяционного быстрого преобразования Фурье.

Методы используемые при исследовании динамики частиц являются симплектическими, и допускают аналитическое представление Якобиана задачи для повышения надежности полученных результатов и уменьшения компьютерного времени для проведения вычислений. К примеру, для накопительных колец время затухания амплитуд бета-колебаний и синхротронных колебаний составляет несколько миллисекунд,

так что иногда достаточно произвести трекинг частиц до сотни оборотов, чтобы сделать заключение о характере стабильности движения.

Глава 2 посвящена описанию схемы и разработке магнитной системы рециркулятора для электронного пучка в проекте электронного охлаждения протонного пучка PETRA (DESY) и исследованию динамики электронного пучка в нем. В Табл.1 приведены основные параметры электронного и протонного пучков, а в Табл.2 приведены основные параметры рециркулятора.

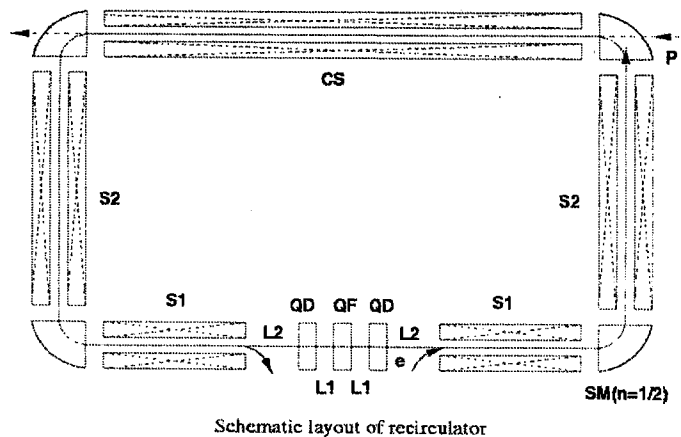
Таблица 1.

Параметры	Электроны	Протоны
Магн. поле в СО, В [Гс]	630	630
Норм. эмиттанс ϵ_N [М]	3.3×10^{-6}	4×10^{-6}
Бета функция, $\beta_{x, y}$ [М]	16	200
Размеры сгустка, $\sigma_{x, y}$ [ММ]	6	6
$\Delta R/P$	10^{-4}	4×10^{-4}
Длина сгустка σ_z [ММ]	500	500
Приведенная энергия γ	19.2	19.2
Число сгустков	3	

Таблица 2.

Параметр	Значение
Периметр (м)	97,89
Длина СО (м)	47,46
Радиус кривизны(м)	0,25
Поле в поворотных магнитах(Т)	0,139
Индекс магнитного поля	0,5
Магнитное поле в соленоидах(Т)	0,063
Градиент QD (m^{-2})	1,69
Градиент QF (m^{-2})	1,32
Длина квадр. (м)	0,25
Длина L1 (м)	1.2
Длина L2 (м)	2.155

На Фиг.1 показано схематическое изображение магнитной структуры рециркулятора с указанием отдельных ее элементов (масштаб не сохранен). Наличие соленоидов в магнитной системе рециркулятора продиктовано необходимостью повышения темпа охлаждения путем применения, так называемого, магнитизированного способа электронного охлаждения.



Фиг.1. Схематическое изображение рециркулятора. CS – секция охлаждения, S1, S2-соленоиды, QD-QF-QD-триплет квадрупольей, L2-прямолинейные участки для ввода и вывода пучка, SM- поворотные магниты с индексом $n=0.5$.

Основные требования к магнитной системе рециркулятора можно сформулировать следующим образом:

- электронные и протонные пучки в секции охлаждения (CO) должны иметь одинаковые размеры,
- отсутствие дисперсии в CO, чтобы избежать влияния внутрипучкового рассеяния частиц на поперечный эмиттанс электронного пучка (классический вариант),
- почти изохронную магнитную дорожку, чтобы избежать дебанчировки пучка.

Существующий туннель накопителя PETRA позволяет иметь CO длиной приблизительно 50м с поворотными участками приблизительно 1,5м. Триплет квадрупольей в прямолинейном

участке позволяет иметь свободные участки длиной больше 2м для размещения систем ввода и вывода пучка. Градиенты квадрупольей подобраны таким образом, чтобы согласовать оптику круглого пучка у входов и выходов соленоидов, внутри которых движение пучка определяется теоремой Буша. Из теоремы Буша найдено решение для показателя спадания поля в поворотных магнитах, который оказывается равным $n=0.5$. Приведенная на Рис.1 схема рециркулятора допускает среднюю дисперсию в секции охлаждения $\langle D \rangle = 3m$.

Этот вариант рециркулятора представляет особый интерес в свете появившихся в последнее время теоретических и экспериментальных работ по дисперсионному электронному охлаждению.

Для классического бездисперсионного варианта рециркулятора соленоиды в поворотных участках рециркулятора были заменены триплетами квадрупольных магнитов. Оптические функции для этих участков приведены на Рис.4.

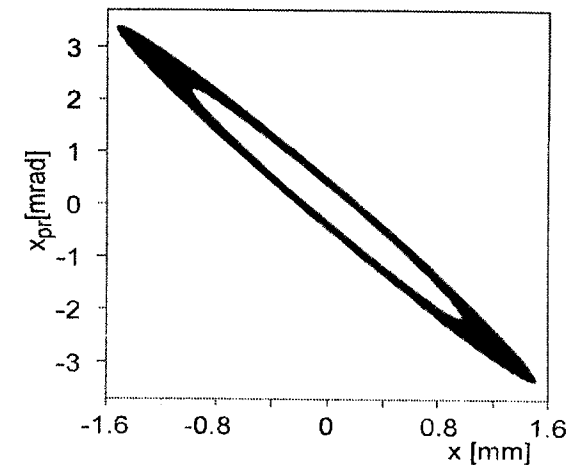


Рис.2. Проекция фазового объема на плоскость (x, x') . Точка наблюдения находится в центре фокусирующего квадруполья.

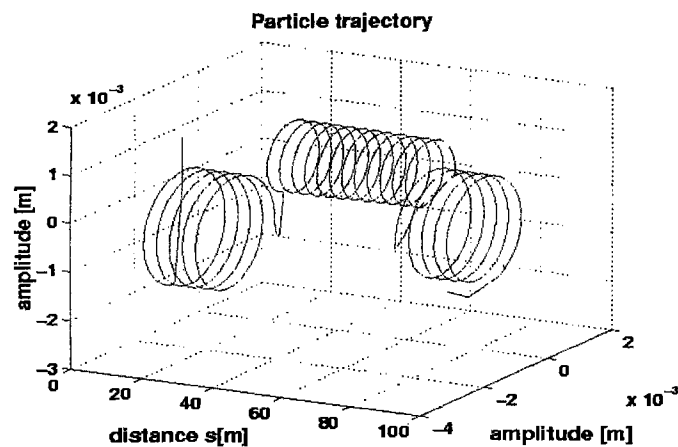


Рис.3. Спиральная траектория частицы в рециркуляторе после одного оборота вокруг кольца.

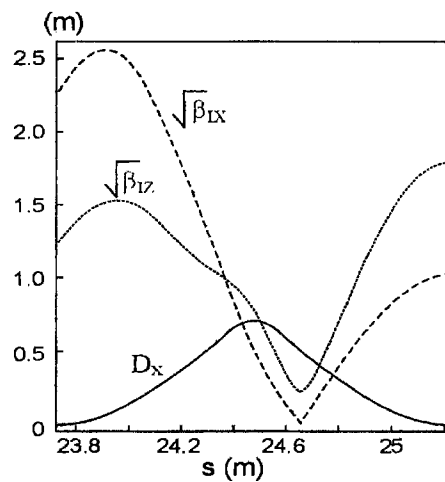


Рис.4. Оптические функции в поворотных участках для бездисперсионного варианта рециркулятора.

Выбор магнитной системы с соленоидами, обеспечивающей оптику круглого в поперечном сечении пучка, позволяет успешно бороться с эффектами пространственного заряда и внутрипучкового рассеяния и добиться накопления максимального электронного тока. При помощи квази-самосогласованного подхода, когда учитывается перераспределение частиц внутри электронного пучка после прохождения каждого элемента магнитной системы, было вычислено максимальное число частиц в одной сгустке электронного пучка, которое составляет $N = 2.8 \cdot 10^{10}$. Показано, что при этих значениях числа частиц в одной сгустке, смещение бетатронных частот из-за сил пространственного заряда составляет $\Delta Q_x = -0.097$, $\Delta Q_y = 0.017$ для горизонтальной и вертикальной мод, соответственно.

Таблица 3.

Параметры	Значения
Энергия E (ГэВ)	3
Периметр (м)	216
Ток I (мА)	350
ВЧ частота (МГц)	499.654
Гармоническое число	360
Число периодов	16
Прямолинейный участок (м)	4.8
Тип магнитной дорожки	DBA
Радиус кривизны ρ (м)	7.385
Горизонт. частота Q_x	13.22
Верт. частота Q_y	4.26
Диссп. прям. участок η (м)	0.18
Горизонт. Эмиттанс (нм)	8.4
Верт. эмиттанс (нм)	0.084
Разброс по энергиям (%)	0.104
Кэфф. уплотнения орбит α	0.002
Горизонт. хроматичность ξ_x	-18.91
Верт. хроматичность ξ_y	-14.86

Глава 3 §1 посвящен изложению методов исследования нелинейной динамики пучков в накопительных кольцах. Как источники нелинейностей, рассматриваются мультиполю магнитных полей основных элементов магнитной системы (диполи, квадруполь и секстиполи), а также магнитные поля сильных вигглеров и ондуляторов с малыми межполюсными зазорами. Методика, разработанная в диссертации, была применена для получения численных результатов для накопительного комплекса CANDLE, основные параметры которого приведены в Табл.3.

Карта частот бетатронных колебаний частицы в накопителе CANDLE для 2000 начальных значений внутри прямоугольника $x = (-7; 7)$ мм, $y = (-3; 3)$ мм, представлена на Рис. 5, где средний островок частот вокруг рабочей точки соответствует амплитудам внутри прямоугольника $x = (-3; 3)$ мм, $y = (-1; 1)$ мм.

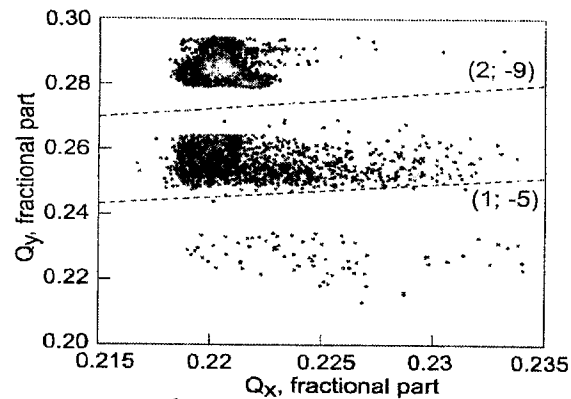


Рис.5. Карта частот бетатронных колебаний (дробная часть) частиц в накопителе CANDLE для 2000 начальных значений внутри прямоугольника $x = (-7; 7)$ мм, $y = (-3; 3)$ мм.

На рисунке четко видны резонансные линии (1;-5) и (2;-9), идентифицированных также на резонансной диаграмме Рис. 8.

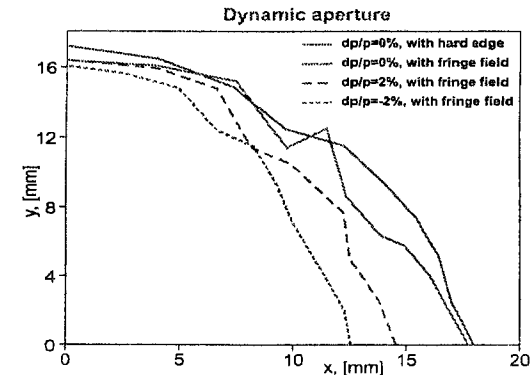


Рис.6. Уменьшение динамической апертуры пучка в накопителе CANDLE из-за краевых полей, при различных значениях разброса по энергиям.

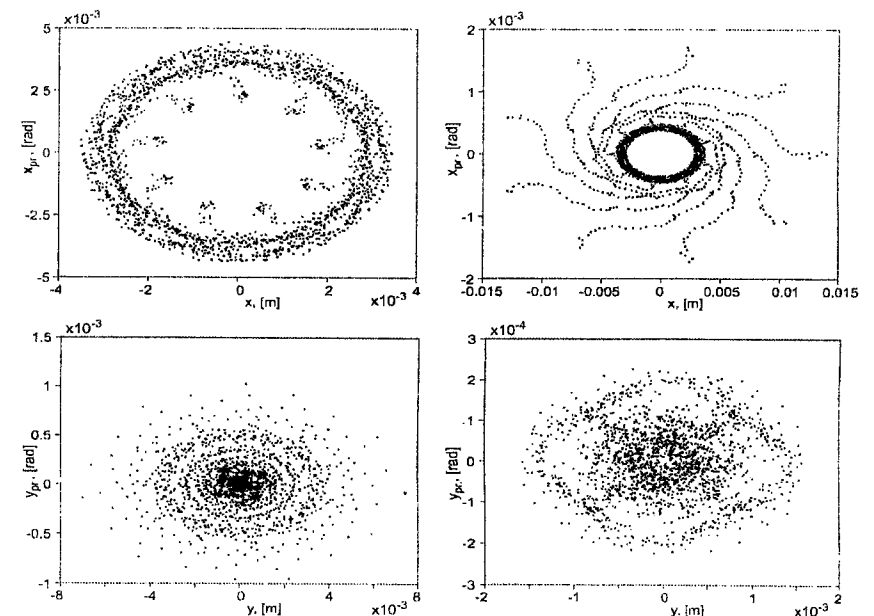


Рис.7. Фазовые портреты горизонтальных (верхний ряд) и вертикальных (нижний ряд) колебаний в накопителе CANDLE при амплитудах 10σ (левая колонна) и 70σ (правая колонна) после 2048 оборотов в кольце.

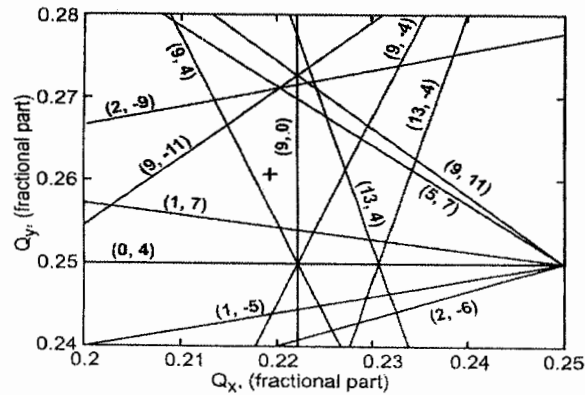


Рис.8. Диаграмма нелинейных резонансов высших порядков для накопителя CANDLE.

На Рис. 6 показано уменьшение динамической апертуры частиц в накопителе CANDLE из-за нелинейностей магнитных полей квадруполей, включая мультиполи четвертого порядка при значениях разброса по энергиям $\delta = 0; \pm 2\%$. Как видно из рисунка, наибольшее сужение (около 5 мм) динамической апертуры происходит в горизонтальной плоскости для частиц с $\delta = 2\%$.

На Рис. 7 изображены фазовые портреты для частиц с большими начальными амплитудами 10σ и 70σ в центре прямолинейных участков для горизонтальных и вертикальных колебаний после 2048 оборотов. Как видно из рисунков, частицы попадают в область хаотического движения в первую очередь в вертикальной плоскости.

Исследование эффектов краевых полей (§2), которые проявляются уже в линейном приближении, показало, что для восстановления расчетной рабочей точки (13.22; 4.26) необходимо произвести тонкую настройку частот бетатронных колебаний при помощи изменения фокусирующих сил квадруполей: 0.39 % для QFC, 0.67% для QF и 1.48% для QD.

В §3 Главы 3 приведены результаты исследований нелинейных эффектов, вносимых магнитными полями вставных устройств (ВУ) - ондуляторов и вигглеров. Исследования проводились при помощи разработанной программы с учетом реального трехмерного распределения магнитного поля в ВУ. В

основу брались параметры типичных ВУ, приведенных в Табл.4, где показаны также численные результаты влияния радиационных и силовых эффектов на динамику пучка.

Как видно из Рис.9, биения бетатронных колебаний происходят в основном, в вертикальном направлении, где благодаря малому межполюсному зазору существенную роль играют нелинейные поля. Однако, это изменение амплитуд вертикальных колебаний происходит в допустимых пределах и для восстановления основных оптических функций дополнительных пары квадрупольных линз не требуются.

На Рис.10 показано уменьшение динамической апертуры частицы из-за действия ондулятора. Как видно из рисунка, незначительное изменение происходит в основном в периферийной части динамической апертуры.

Таблица 4

Insertion Device	Wiggler I	Undulator I	Undulator II
N	23	72	79
$\lambda_0 (cm)$	0.17	0.022	0.05
$L_{ID} (m)$	3.91	1.58	3.95
$B_0 (T)$	1.98	0.7	0.3
K	31.4	1.43	1.4
ΔQ_y	0.027	0.032	$1.4 \cdot 10^{-5}$
$\Delta\beta_y / \beta_y (\%)$	3.9	1.99	0.01
$\frac{U - U_0}{U_0} (\%)$	9	0.46	0.2
$\frac{\sigma_E - \sigma_E^0}{\sigma_E^0} (\%)$	1.05	-0.17	-0.08
$\Delta\epsilon_x / \epsilon_x (\%)$	0.56	-0.21	-0.13

На Рис.11 приведены графики зависимостей времени жизни пучка по Тушеку в случае "голой" системы (сплошная линия) и

при работе в магнитной системе накопителя ондулятора (пунктирная линия), для половины магнитной дорожки, где наблюдается уменьшение времени жизни пучка по Тушеку в среднем от 38 часов до 35 часов.

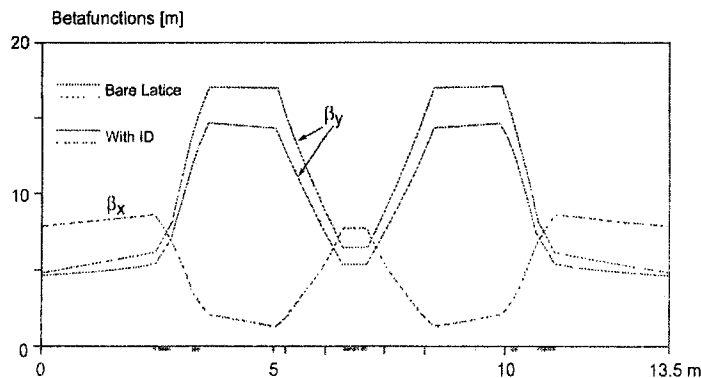


Рис.9. Изменение оптических функций, вызванных установкой виглера в магнитную систему накопителя CANDLE.

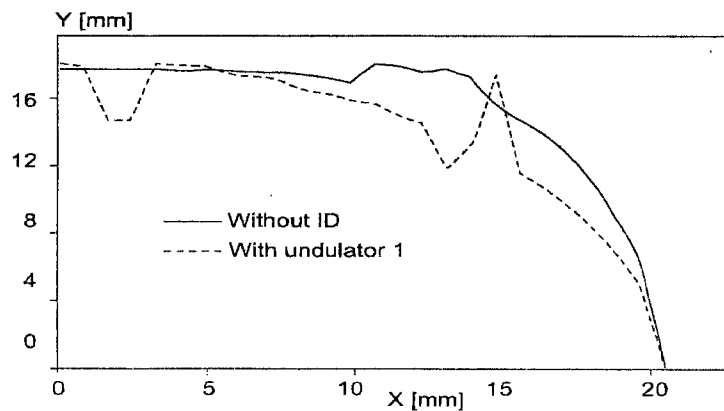


Рис.10. Изменение динамической апертуры, вызванное установкой виглера в магнитную систему накопителя CANDLE.

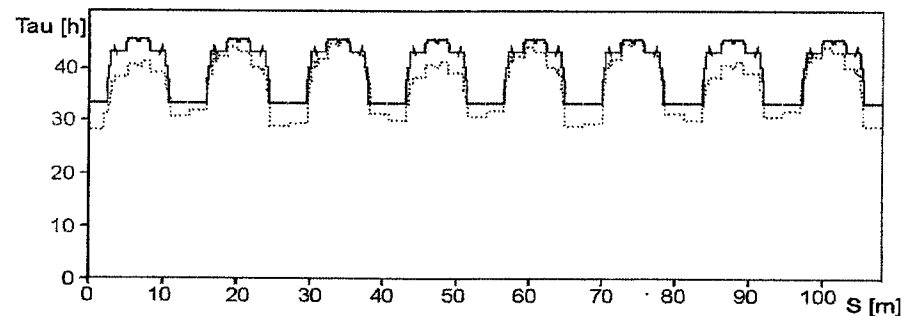


Рис.11. Изменение времени жизни пучка по Тушеку в накопителе CANDLE, вызванное установкой виглера в магнитную систему накопителя CANDLE.

Из проведенных исследований можно сделать заключение, что изменение оптики пучка в магнитной системе накопителя остается в допустимых пределах при зазорах ондуляторов до 8мм. При меньших зазорах приходится использовать дополнительные фокусирующие элементы для восстановления расчетной оптики пучка.

§§4,5 Главы 3 посвящены исследованию нелинейных синхротронных колебаний и связи синхро-бетатронных колебаний на основе Гамильтониана

$$H(\varphi, \delta) = \frac{eV_{rf}}{T_0 \cdot E_0} [\cos \varphi - \cos \varphi_s + (\varphi - \varphi_s) \sin \varphi_s] - \omega_{rf} \left[\frac{1}{2} \eta_c \delta^2 - \frac{1}{3} \alpha_1 \delta^3 - \xi \cdot \delta \right]$$

В случае, когда $\alpha_1 \neq 0$ и $\xi \neq 0$, мы получаем две стационарные точки стабильных колебаний и две стационарные точки нестабильных колебаний, которые соответствуют появлению второй зоны стабильного движения на фазовой плоскости продольных колебаний (см. Рис.12) в дополнение к точкам стабильности линейных ВЧ колебаний.

Для магнитной оптики CANDLE мы имеем $\alpha_1 = 0.0109$, $\langle \beta_x \rangle = 5.1 \text{ м}$, $\langle \beta_y \rangle = 10.42 \text{ м}$, $\langle \gamma_x \rangle = 1.49 \text{ м}^{-1}$, $\langle \gamma_y \rangle = 1.34 \text{ м}^{-1}$ и $\xi_x = 0.33 \cdot 10^{-8}$. Для стационарных точек второй зоны получается $\delta_2 = \eta_c / \alpha_1 = -0.187$ (см. Рис.12).

На Рис. 12 изображено несимметричное распределение фазовых траекторий с положительными и отрицательными относительными отклонениями энергии $\delta^+ = 0.022$ и $\delta^- = -0.025$.

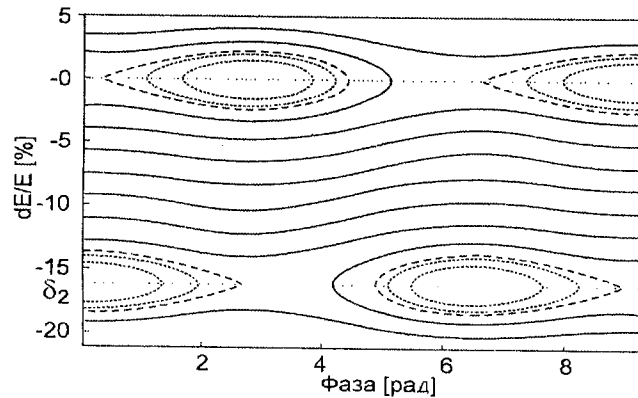


Рис.12. Фазовая диаграмма продольных колебаний

Для того, чтобы нелинейные возмущения не привели к уменьшению энергетического акцептанса, достаточно выполнение условия $\Delta L / L_0 < 9.1 \cdot 10^{-4}$, что соответствует пределу стабильности ВЧ частоты $|\Delta f_{rf}| < 40.5 \text{ kHz}$.

В §6 приведены результаты исследований связи бетатронных колебаний для реальной машины, показывающие, что значение коэффициента связи $k = 1.6\%$ находится в допустимой области.

Разработана система ввода пучка в накопитель (§7), которая не зависит от рабочей точки машины и обеспечивает эффективную инжекцию пучка.

§§8,9 посвящены исследованию динамики пучка в реальной машине с учетом неточностей магнитов и ошибок их установки. Про моделированы около ста разных вариантов со случайным распределением ошибок и неточностей. На базе SVD анализа разработана эффективная система распределения магнитных корректоров, которая позволяет получить значения для средних остаточных смещений равновесной орбиты: 50мкм в горизонтальной и 7мкм в вертикальной плоскостях. При этом максимальное значение отклоняющей силы корректора равно 0.2 мрад.

Глава 4 посвящена изложению физических принципов, лежащих в основе проекта бустерного синхротрона накопительного комплекса CANDLE, а также исследованиям по динамике пучка в бустере с учетом ускорения. В основу проекта бустера были положены следующие требования (§1):

- синхротрон на номинальную энергию 3 ГэВ;
- минимальное время инжекции с возможно большим током;
- минимальный эмитанс для эффективной инжекции;
- длинные бездисперсионные прямые участки для систем ввода/вывода и ускоряющих ВЧ резонаторов;
- умеренные, дипольные поля (малые потери на излучение) и низкие частоты повторения циклов инжекции (2Гц).

В случае необходимости магнитные системы бустера и линии транспортировки пучка от бустера к накопителю позволяют вывод и транспортировку пучка в экспериментальный зал.

Основные параметры бустерного синхротрона и электронного пучка приведены в Табл.5 и схематическое изображение проекта бустера показано на Рис. 13. Минимальное расстояние между двумя кольцами в туннеле обеспечивает нормальную работу машины без вредных взаимодействий двух ускорителей. Магнитная система бустерного синхротрона основана на концепции, так называемую, "недостающего" диполя (см. Рис.13).

В §2 приведены результаты исследования динамики пучка в бустере как при энергии инжекции 100МэВ, так и при номинальной энергии вывода 3 ГэВ.

Изменение характеристик основных динамических параметров пучка, таких как эмитанс, разброс по энергиям, длина пучка и т.п. исследованы в §4 на основе дифференциального уравнения баланса излучения и ускорения частицы.

$$\frac{dA}{dt} = -A \cdot \left(\frac{\dot{E}}{E} + J \cdot \frac{P_\gamma}{E} \right) + \frac{55}{32\sqrt{3}} \cdot \frac{\hbar \cdot c \cdot \gamma^3 \cdot P_\gamma}{\rho \cdot E^2}$$

где ускорение происходит по закону

$$E(t) = E_0 \cdot (\alpha - \cos(\omega_0 \cdot t))$$

с частотой повторения 2 Гц.

Таблица 5

Периметр (м)	192
Энергия инжекции (МэВ)	100
Энергия вывода (ГэВ)	3
Длина прям. участка (м)	2.6
Частота повторения (Гц)	2
Тип магнитной дорожки	FODO
Гориз.эмиттанс (нм рад)	74.9
Разброс по энергиям	$6.9 \cdot 10^{-4}$
Максим. β_x, β_y, D_x (м)	8.5; 12.2; 0.48
Число периодов	4
Дипольное поле (Т)	0.7272
Радиус кривизны (м)	13.751
Гармоническое число	320
ВЧ частота (МГц)	499.564
Бетапр. частоты (г./в.)	9.19/6.24
Хроматичность (гор./верт)	-11.19/-8.63
Коэфф. Уплот. орбит	$1.55 \cdot 10^{-2}$

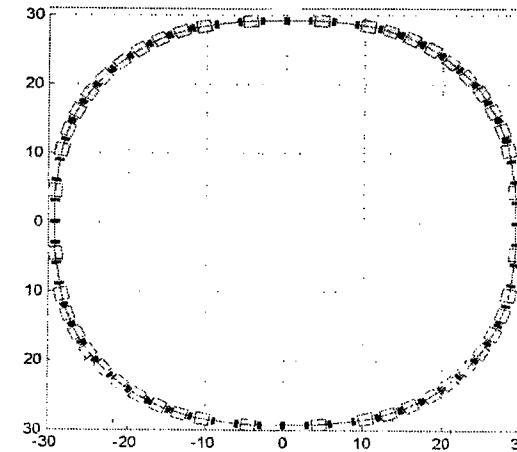


Рис. 13. Схематическое изображение бустерного синхротрона.

На Рис.15 приведены графики зависимостей эмиттанса пучка и длины сгустка от энергии в процессе ускорения. Видно, что равновесие наступает при энергии порядка 1.5 ГэВ.

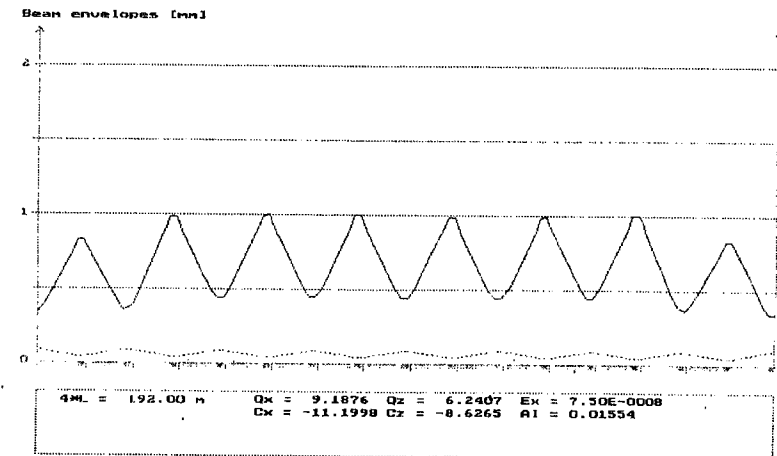


Рис.14. Огибающие бетатронных колебаний в бустерном синхротроне при номинальной энергии 3 ГэВ.

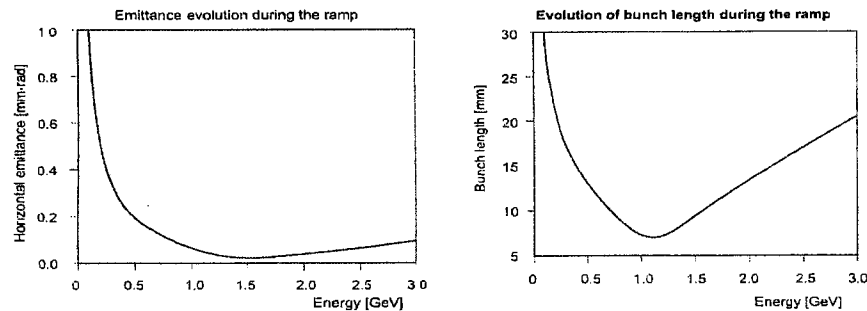


Рис.15. Изменение эмиттанса и длины сгустка в процессе ускорения в бустерном синхротроне.

При дальнейшем росте энергии эмиттанс растет и при номинальной энергии на выходе эмиттанс ускоренного пучка составляет 75 нм, что позволяет произвести эффективную инжекцию пучка без потерь.

В §5 приведены результаты исследований влияния токов Фуко, индуцированных в стенках вакуумной камеры в процессе изменения магнитного поля, на динамику пучка в бустере. В Табл. 6 приведены основные характеристики вакуумной камеры бустерного синхротрона.

Табл. 6

Материал	Нерж. сталь	
	Толщина стены (мм)	0.7
Размеры камеры (мм)	30x20	30x20
Зазор магнита (мм)	30	30
Число повторения, f_0 (Гц)	2	3
Кэфф. роста поля, $F_0(t)$	2.65	2.73
Макс. секстун. сила (m^{-3})	0.07	0.11

Изменение магнитного поля эквивалентно появлению секступольной компоненты, величина которой для параметров CANDLE при частоте повторения 2Гц составляет $0.07 m^{-3}$, что не приводит к необходимости установления компенсирующих секступолей. Токи Фуко приводят также к изменению градиентов квадруполей, что, в свою очередь, является источником изменения частот бетатронных

колебаний. Для параметров CANDLE это смещение частот составляет около -0.12% .

В §6 приведены результаты исследований возможности работы накопителя в квазипостоянном режиме (top-up) и связанные с ним различные моды инжекции пучка.

Были также разработаны системы ввода/вывода (§7) пучка для бустера, системы транспортировки пучка из линейного ускорителя к бустерному синхротрону и из бустера к накопителю (§8), а также системы корректировки равновесной орбиты для бустера.

В конце каждой главы приведены основные выводы и заключения для данной главы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В настоящей диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Разработаны основные концепции магнитной системы рециркуляторного кольца в схеме магнетизированного электронного охлаждения в средней области энергий.
2. Разработан технический проект и предложена магнитная система для рециркулятора электронного пучка для электронного охлаждения протонного пучка PETRA, как в бездисперсионном варианте, так и при наличии заданной дисперсии в секции охлаждения.
3. Найдено решение для плавного перехода пучка в поворотных участках рециркулятора из области аксиально-симметричного поля соленоида в поперечное поле синхротронного магнита с показателем спадания 0.5.
4. Исследовано влияние краевых полей, а также нелинейных мультиполей магнитов на динамику пучков в накопительных кольцах. Разработанная методика была предложена для точного определения частот бетатронных колебаний, уточнения динамической апертуры, нахождения нелинейных резонансов высших порядков и других нелинейных эффектов в накопителях.
5. Предложен алгоритм и разработан компьютерный код для исследования нелинейной динамики пучков в накопительных комплексах.

6. Исследовано искажение сепаратрисы продольных колебаний в зависимости от нелинейных возмущений и предложен метод корректировки этих искажений.
7. Предложены и разработаны основные принципы дизайна бустерного синхротрона- инжектора и его магнитной системы для современных источников синхротронного излучения третьего поколения, которые были реализованы при проектировании бустерного синхротрона накопительного комплекса CANDLE.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ю. Мартirosян, М. Петросян и М. Акопов. Магнитная система кольцевого ускорителя с постоянным во времени магнитным полем. Авт, св. 768378, бюлл. 41, 5 стр., 1982.
2. Я. Дербенев, Ю. Мартirosян и М. Петросян, Динамика заряженных частиц в знакопеременном тороидальном магнитном поле, Журн. Тех. Физики, т. 59, 8, с.85-89, 1989.
3. Ю. Мартirosян, Влияние пространственного заряда на динамику электронного пучка в знакопеременном тороидальном магнитном поле, Журнал Тех. Физики, т. 60, в. 8, стр. 147-151, 1990.
4. Yu.Martirosyan and M.Petrosyan, Nonlinear electron beam dynamics in ATMF, 1991 IEEE Particle Accel. Conf., May 6-9, 1991, San-Francisco, vol.1, p.257-259.
5. Yu. Martirosyan, V.Ayvazyan, K.Balewski, R.Brinkmann, Y.Derbenev and P.Wesolowski, Conceptual design of recirculator ring for electron cooling in PETRA., Proc.EPAC-2000, p. 1256-1260, Vienna, DESY rep., DESY-M-00-04, 2000.
6. P.Wesolowski, K.Balewski, R.Brinkmann, Y.Derbenev and Yu. Martirosyan, Electron cooling at PETRA using a bunched beam, Proc.EPAC-2000, p. 1277-1280, Vienna. DESY report, DESY-M-00-04, 2000.
7. P.Wesolowski, K.Balewski, R.Brinkmann. Y.Derbenev and Yu.Martirosyan, Studies on Electron Cooling at DESY, Workshop on Beam Cooling and Related Topics, pp.13-18, May, 2001, Bad Honnef, Germany.
8. V. Tsakanov, et al., Armenian Light Source, *CANDLE*, Proc. of Int. Conf. on "Electron-photon Interaction in dense media", p. 331-348, June, 2001, Nor-Hamberd, Armenia.
9. Yu. Martirosyan, V. Tsakanov, Insertion Devices for CANDLE Light Source, Proc. of Int. Conf. on "Electron-photon Interaction in dense media", p. 349-356, 2001, Nor-Hamberd, Armenia.
10. V.Tsakanov, G. Amatuni, V. Avagyan, V.Ayvazyan, B. Grigoryan, M.Ivanian, Yu. Martirosyan, S. Tatikian and A.Yeremian, Design Study of CANDLE Synchrotron Light Source, Proc. of 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, SSILS, 2001, p. 37-41, Shanghai, China.
11. Yu.Martirosyan, V.Tsakanov, B.Grigoryan, Booster Synchrotron for CANDLE Light Source, Proc. of 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, SSILS, 2001, p.115-119, Shanghai, China
12. V. Tsakanov et al, CANDLE: A new project for 3 GeV Intermediate Energy Light Source in the Republic of Armenia, Rev. Sci. Instr., v.73, #3, pp.1411-1413, 2002
13. V.Tsakanov et al., Status of 3 GeV Intermediate Energy Light Source Project CANDLE in Republic of Armenia, Proc. of EPAC2002, p. 763-765, Paris
14. Мартirosян, Исследование эффектов краевых магнитных полей в накопительных кольцах, Журнал Тех. Физики, т. 73, #10, стр.113-115, 2003.
15. Y. Martirosyan, M. Ivanyan, V. Khachatryan, V. Tsakanov, Nonlinear Beam Dynamics Study in CANDLE Light Source, Proc. of EPAC2002, p. 715-717, Paris
16. Y. Martirosyan, M. Ivanyan, V. Tsakanov Beam current limitations study for CANDLE light source, Proc. of EPAC2002, p. 718-720, Paris
17. A. Abashyan et al, CANDLE- 3 GeV Synchrotron Light Source, Design Report, Yerevan, 267 p., 2002.
18. Y. Martirosyan, Fringe Field Effect Study for CANDLE Light Source, Proc. of Workshop Dampingring-2003, p. 48-52, Daresbury Laboratory, Daresbury, 2003.
19. M.I.Ivanyan, Yu.L. Martirosyan, V.M.Tsakanov, Dependence of the Photon Beam Characteristics on Electron Beam Parameters in Third Generation Synchrotron Light Sources, Proc. of EPAC2002, p. 691-693, Paris
20. Y. Martirosyan, Effects of Fringe Fields in Storage Rings, J. of Technical Physics, v.48, #10, 2003, pp.1330-1332.
21. Y.Martirosyan, Study of CANDLE Tunes Dependence on Fringing Fields of Quadrupoles, NIM, A., 521/2-3, pp.560-568, 2004
22. Д.Калантарян и Ю.Мартirosян, Связанная неустойчивость частиц в сильноточных накопителях электронов,

- Журнал "Физика" НАН Армении, т. 39, # 5, стр. 293-300, 2004.
23. V. Tsakanov et al., The Status of 3GeV CANDLE Synchrotron Light Facility Project, Proc. of EPAC2004, p.2251-2253, Lucerne.
 24. Ю. Мартиросян, Возмущенная сепаратриса и коррекция нелинейных синхротронных колебаний в накопителях электронов, Журнал "Физика" НАН Армении, # 3, т.39, стр.153-159, 2004.
 25. M. Ivanyan, Y. Martirosyan and V. Tsakanov, On the Brightness of Diluted Photon Source in Synchrotron Light Facilities, NIM A, 531/3, pp.649-654, 2004
 26. V. Tsakanov et al, An overview of CANDLE synchrotron light facility, Proc. of 4th National Conf. on Semiconductor Microelectronics, p.208-211, Tsakhkadzor, 2003.
 27. A.Abashian et al. (editors); CANDLE Activity Report, October 2001-May 2003, ASLS CANDLE-R-03-028, 181 p., 2003
 28. V. Khachatryan and Yu. Martirosyan, Magnets for the CANDLE Booster Synchrotron, Design and Prototyping, Proc. of EPAC2004, p.1588-1591, Lucerne.
 29. D. Kalantaryan and Yu. Martirosyan, Transfer Matrices for the Coupled Space Charge Dominated 6D Particle Motion, Proc.of EPAC2004, p.1135-1137, Lucerne.
 30. Yu. Martirosyan, M. Ivanyan, D. Kalantaryan, Nonlinear Beam Dynamics Study with MATLAB, Proc. of EPAC2004, p.1813-1815, Lucerne.
 31. V. Tsakanov et al., The Status of CANDLE, NATO Advanced Research Workshop "Advanced Photon Sources and Their Application", Nor-Hamberd, Armenia, 2004, 7p.
 32. Yu. Martirosyan, Non-linear beam dynamics study in low emittance storage rings, NATO Advanced Research Workshop "Advanced Photon Sources and Their Application", Nor-Hamberd, Armenia, 2004, 4p.

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Ժամանակակից արագացուցիչները՝ որպես լիցքավորված մասնիկների և ֆոտոնային փնջերի աղբյուրներ, անփոխարինելի են ֆունդամենտալ և կիրառական գիտությունների ամենալայն բնագավառներում: Արդի գիտական և փորձարարական հետազոտություններն այդ փնջերի վրա դնում են խիստ սահմանափակումներ՝ փոքր էմիտանս և միաժամանակ փնջում էլեկտրոնների նեղ ցրվածություն ըստ էներգիաների, էլեկտրոնային թանձրուկների հետազոտի բարձր կայունություն և փնջի կյանքի երկար տևողություն: Այդպիսի պահանջների բավարարող փնջերի ստացման համար անհրաժեշտ է դառնում նրանց ոչ-գծային դինամիկայի ուսումնասիրությունը արագացուցիչներում:

Ատենախոսությունը նվիրված է ժամանակակից օղակաձև արագացուցիչներում էլեկտրոնային փնջերի ոչ-գծային դինամիկայի անալիտիկ և թվային մեթոդների ուսումնասիրությանը և զարգացմանը: Աշխատանքները ատենախոսության մեջ կատարվել են երեք հիմնական ուղղություններով՝ ա) պրոտոնային և իոնային փնջերի մագնիսականացված էլեկտրոնային հովացման համար ռեցիրկուլյատորային օղակի կառուցվածքի և մագնիսական համակարգի հիմնական սկզբունքների մշակում; բ) երրորդ սերնդի լույսի աղբյուրների կուտակիչ օղակներում ոչ-գծային բարձր կարգի դինամիկական էֆեկտների հետազոտություն; և գ) սինքրոտրոնային ճառագայթման համալիրներում սնուցիչ բուստերային օղակի մագնիսական համակարգի կառուցվածքի հիմնական սկզբունքների մշակում:

Ատենախոսությունում կատարված աշխատանքների արդյունքները կարելի է ամփոփել հետևյալ կերպ.

1. Առաջարկվել և մշակվել է PETRA (DESY, Համբուրգ) արագացուցիչ պրոտոնային փնջի էլեկտրոնային հովացման համալիրում էլեկտրոնային փնջի կուտակիչի նախագիծը և մագնիսական համակարգը:

2. Առաջարկվել և մշակվել է կուտակիչի շրջադարձային հատվածի համար փնջի հետազոտի սահուն անցումը ապահովող լուծում՝ սլեյֆոդի երկայնական մագնիսական դաշտի տիրույթից դեպի թեքող մագնիսների լայնական դաշտերի տիրույթը:

3. Մշակվել է փնջի ինքնահամաձայնեցված շարժման նկարագրությունը, որի օգնությամբ գտնվել է ռեցիրկուլյատորային օղակում մեկ թանձրուկում էլեկտրոնների թվի թույլատրելի սահմանային արժեքը:

4. Մշակվել է արագացուցչային-կուտակիչ համալիրներում փնջերի ոչ-գծային դինամիկան բազմակողմանի ուսումնասիրելու համակարգչային ծրագիր:

5. Մշակված ծրագրի օգնությամբ հետազոտվել է CANDLE լույսային աղբյուրում փնջի դինամիկական ապերտուրայի, փուլային պատկերների, բետատրոնիկ տատանումների հաճախությունների քարտեզի, բարձր կարգի ոչ-գծային ռեզոնանսների, և այլն հետազոտություններ:

6. Մշակվել է մագնիսների եզրային դաշտերի նկարագրության նոր անալիտիկ մեթոդ, որի կիրառմամբ CANDLE կուտակիչի համար գտնվել է աշխատանքային հաճախությունների վերահաստատման պայմանները:

7. Ուսումնասիրվել է ոչ-գծային երկայնական տատանումների ազդեցությունը սեպարատրիսայի վրա և առաջարկվել է նրա դեֆորմացիայի կոմպենսացիայի մեխանիզմները:

8. Հետազոտվել է կուտակիչ օղակներում փնջերի սինքրո-բետատրոնային կապվածության հետևանքները տատանումների կայունության վրա: Գտնվել է արագացնող բարձր հաճախության էլեկտրամագնիսական լարվածության և հաճախության թույլատրելի փոփոխության սահմանները:

9. Առաջարկվել և մշակվել է օնոլյատորների և վիզերների եռաչափ ոչ-գծային դաշտերի ազդեցության հետազոտության նոր մոտեցում, որի կիրառմամբ ստացվել է փնջերի դինամիկական ապերտուրայի փոփոխության գրաֆիկները կախված փնջում ըստ էներգիայի մասնիկների ցրվածության արժեքից, ինչպես նաև ըստ Տուշեկի փնջի կյանքի տևողության կարճացումը:

10. Մշակվել է CANDLE կուտակիչ համակարգի սինքրոտրոնային սնուցիչ (բուստերային օղակ) արագացուցչի նախագիծը և մագնիսական համակարգը:

11. Ղուրս է բերվել սնուցիչ արագացուցչում էլեկտրոնային փնջի վարքը արագացման պայմաններում նկարագրող հավասարումը և գտնվել է դինամիկ պարամետրերի փոփոխության ընթացքը արագացման պրոցեսում: