

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-2012-122

На правах рукописи  
УДК 621.384.6

**СМИРНОВ**  
Виктор Леонидович

**КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПАКТНОГО  
ЦИКЛОТРОНА**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2012

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джеллепова  
Объединенного института ядерных исследований.

**Научный  
руководитель:**

доктор физико-математических наук  
Ворожцов Сергей Борисович

**Официальные  
оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
Сычевский Сергей Евгеньевич  
ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»  
г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук  
Михайлов Владимир Афанасьевич  
ЛФВЭ ОИЯИ

**Ведущая  
организация:**

Петербургский институт ядерной физики  
им. Б.П. Константинова, г. Гатчина Ленинградской  
области

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в “ \_\_\_\_ ” часов на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор



Ю.А. Батусов

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность**

Со времени изобретения циклотрона прошло более 80 лет [1]. За это время построены сотни циклотронов во всем мире. Последние десятилетия характеризуются активным развитием, и использованием циклотронов, в большинстве своем компактных. Под классификацией «компактный» понимается общепринятое определение циклотронов со сплошным полюсом. Основные области применения циклотронов – исследования по ядерной физике, генерация и исследование радиоактивных ионов, прикладные применения, главным образом в медицине и для детектирования взрывчатых веществ, использование циклотронов в качестве инжекторов в другие ускорители. Компактность, простота в обслуживании и сравнительно низкая стоимость явились факторами, приведшими к всеобщей востребованности циклотронов. По всему миру существуют центры, занимающиеся разработкой циклотронов и исследованиями на них.

Независимо от цели применения циклотрона, будь то ядерная физика либо прикладные исследования, ускорительная установка представляет собой сложную систему. Стоимость создания компактного циклотрона на современном уровне оценивается десятками миллионов долларов и недопустимы ошибки на этапе проектирования ускорителя.

Основным инструментом на сегодняшний день при проектировании ускорителя является компьютерное моделирование, которое прочно заняло свое место в ускорительной физике. Несомненно, важным и актуальным видится создание максимально приближенных к реальности компьютерных моделей установок и комплексов программ, а также моделирование циклотрона как целого в комплексе с системами инъекции и вывода пучка, учитывая при этом реалистичные трехмерные электромагнитные поля и влияние собственного поля частиц. При помощи таких моделей возможно моделировать динамику частиц и максимально полно «видеть физику», что дает уверенность, что спроектированный ускоритель после его создания будет иметь характеристики, близкие к заданным. В данной работе описаны методы и способы комплексного моделирования компактных циклотронов. Полученные наработки были использованы при исследовании динамики пучка в AVF-циклотроне (RIKEN, Япония) [A3], при моделировании HITFiL-циклотрона [A5] (IMP, Китай),

при моделировании компактного циклотрона AVF-930 (NIRS, Япония) [A6] и при моделировании линии инжекции низкоэнергетического пучка для установки FRIB (MSU, США) [A7, A8]. Здесь речь идет как об участии в разработке новых циклотронных установок, так и в модернизации действующих. Разработанное при этом программное обеспечение для расчета динамики пучка в компактных циклотронах может быть также применено в экспериментах с пучком. В отделе новых ускорителей ОИЯИ существуют давние традиции развития теории и техники ускорения заряженных частиц на базе изохронных циклотронов [2, 3]. Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическим планом ЛЯП им. В.П. Дзелепова, ОИЯИ в рамках проекта «Развитие циклотронного метода ускорения сильноточных пучков».

**Цель реферируемой работы** состоит в реализации комплексного подхода к моделированию компактного циклотрона, включающего в себя расчет динамики частиц с учетом действия сил пространственного заряда пучка и связанный с этим расчет электромагнитных полей структурных элементов установки. Конечной целью таких расчетов является создание технических проектов для установок, находящихся в стадии разработки, а также выбор оптимальных параметров систем инжекции, ускорения и вывода пучка, повышение интенсивности и улучшение качества пучка в компактных циклотронах, находящихся в стадии модернизации. При этом необходимо создание комплекса программ для решения поставленных выше задачи.

### ***Научная новизна работы***

1. Впервые проведен полный анализ динамики пучка для HITFiL-циклотрона (IMP, Китай), начиная от линии инжекции и заканчивая выводной системой. Предложены радикальные изменения большинства структурных элементов первоначального технического проекта циклотрона, предложена установка новых элементов управления пучком в процессе ускорения и оптимизированы параметры существующих элементов. Все предложенные модификации технического проекта, по результатам расчетов, приводят к значительному увеличению интенсивности выведенного пучка. Результаты работы явились основой переработанного технического проекта.

2. Определена конфигурация новой центральной области AVF-циклотрона (RIKEN, Япония), позволяющая как работать с существующими режимами ускорения на второй гармонике ускоряющего поля, так и иметь возможность ускорения на первой гармонике.
3. Впервые предложен и исследован способ уменьшения энергетического разброса пучка в изохронных циклотронах при режимах работы ускорителя, когда частицы при прохождении ускоряющих зазоров находятся не на вершинах ускоряющей волны, и когда использование известного метода создания «Flat-Top» волны не приносит результата.
4. Впервые интерпретированы экспериментальные данные на циклотроне NIRS-930 (NIRS, Япония), основываясь на проведенном детальном моделировании установки с учетом эффектов пространственного заряда пучка и в трехмерных электромагнитных полях структурных элементов.
5. Впервые проанализирована функциональность линии транспортировки низкоэнергетического пучка установки FRIB (MSU, США), основываясь на результатах уникального расчета динамики многокомпонентного пучка с учетом пространственного заряда пучка с использованием большого количества модельных частиц ( $10^6$ ). В расчетах использовались реалистичные трехмерные электромагнитные поля элементов установки. Разработаны физические модели основных структурных элементов системы.
6. Создан уникальный комплекс программ для анализа динамики частиц в компактном циклотроне и линиях инжекции с учетом потерь частиц на структурных элементах установки, включающий в себя расчет сил пространственного заряда пучка, отличающийся тем, что покрывает расчетной областью всю ускорительную установку от выхода из источника частиц и до выводного окна. При исследовании динамики пучка учитываются реалистичные трехмерные распределения электромагнитных полей элементов ускорителя. Эффективное использование вычислительных ресурсов персонального компьютера позволяет значительно уменьшить время, требуемое на расчет, увеличить количество модельных частиц и, как следствие, получать более точные оценки. На принципиально новый уровень выведена визуализация расчетов, что позволяет более наглядно анализировать полученные данные.

## **Научная и практическая ценность работы**

1. Предложенная переработка первоначального технического проекта HITFiL-циклотрона была принята к реализации в виде нового проекта установки, который включает предложения по введению дополнительных элементов управления пучком и изменения технических параметров существующих узлов.
2. Предложенные модификации центральной области AVF-циклотрона легли в основу программы по модернизации ускорителя с соответствующими испытаниями на пучке частиц.
3. Интерпретированы экспериментальные данные в измерениях на ускоренном пучке на циклотроне NIRS-930. Созданная компьютерная модель ускорителя является инструментом для интерпретации существующих экспериментальных данных и для расчета параметров режимов ускорения с целью повышения качественных и количественных характеристик выводимого пучка.
4. Проанализирована функциональность линии инжекции установки FRIB, основываясь на уникальном расчете динамики многокомпонентного пучка с учетом пространственного заряда пучка в трехмерных электромагнитных полях структурных элементов. Разработаны физические модели основных структурных элементов системы. Все результаты включены в технический проект установки.
5. Созданное программное обеспечение установлено и применяется в исследовательских центрах: RIKEN, NIRS, IMP, MSU.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Внесены кардинальные изменения в технический проект HITFiL-циклотрона. Циклотрон находится в стадии создания.
2. Разработана новая центральная зона AVF-циклотрона и принята как основная в программе по замене центра, намеченной на 2012 год.
3. Новый способ уменьшения энергетического разброса в пучке частиц в изохронных циклотронах.
4. Интерпретированы экспериментальные данные для компактного циклотрона NIRS-930, основываясь на созданной компьютерной модели установки.
5. Проанализирована функциональность линии инжекции установки FRIB. Разработаны технические проекты структурных элементов системы.

6. Создан программный комплекс для расчета динамики частиц в компактных циклотронах и линиях инжекции с возможностями мирового уровня.

### ***Апробация работы***

Основные результаты работы были представлены на 5-и семинарах ЛЯП по проблемам ускорителей заряженных частиц, Общелабораторном семинаре ЛЯП, семинаре НТОУ ЛЯР, на международных конференциях и совещаниях: Mathematical Modeling and Computational Physics MMCP'2009, Laboratory of Information Technologies, JINR, Дубна, Россия; 19<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications, CYCLOTRONS'10, Lanzhou, China; 14<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, Giardini-Naxos, Italy, 2011; NIRS accelerator seminar, Department of Accelerator and Medical Physics, NIRS, Chiba, Japan, 2011; Information meeting, National Superconducting Cyclotron Laboratory, MSU, Michigan, USA, 2011; International Particle Accelerator Conference IPAC'12, New Orleans, USA, 2012; XXIII Russian Particle Accelerator Conference, Saint-Petersburg, 2012; 26<sup>th</sup> International Linear Accelerator Conference, LINAC12, Tel Aviv, Israel, 2012.

### ***Личный вклад автора***

Вся работа, результаты которой представлены в настоящей диссертации, выполнена лично автором и при его непосредственном участии.

### ***Публикации***

По материалам диссертации опубликовано 10 работ, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

**Во введении** обоснована актуальность проводимого исследования, новизна и практическая ценность диссертации.

**В первой главе** кратко рассмотрены основные этапы моделирования компактного циклотрона: основы движения заряженных частиц в электромагнитном поле; обзор численных методов расчета динамики пучка и сил пространственного заряда; основные факторы, влияющие на количественные и качественные характеристики

пучка; описаны методы, которые использовались при написании программ для расчета динамики частиц.

Вновь созданная программа SNOP [A10] явилась качественным развитием программы CBDA [ 4 ]. Существенными отличиями новой программы от уже существующей являются алгоритмы расчета сил пространственного заряда и учета потерь частиц на структурных элементах установки, а также способы задания электромагнитных полей и использование эффектов визуализации при расчете динамики частиц (Рис. 1).

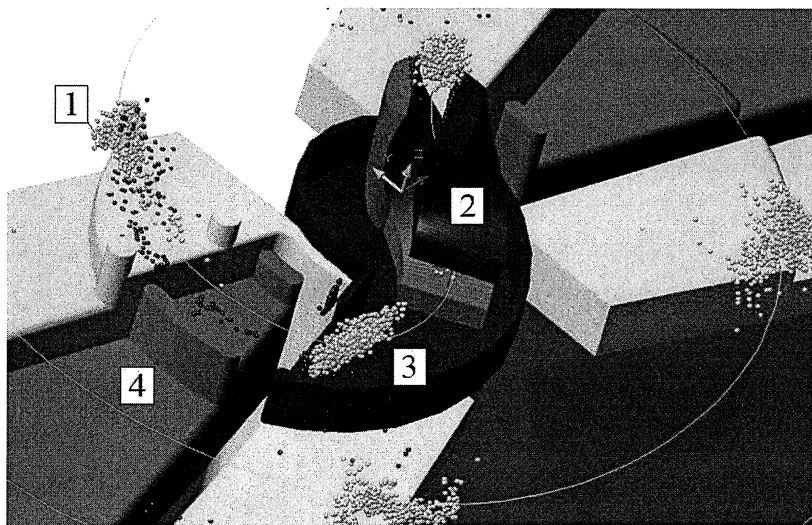


Рис. 1. Визуализация ускорения пучка ионов во время счета программы: 1 – пучок, 2 – спиральный инфлектор, 3 – корпус инфлектора, 4 – ускоряющий дуант.

В программе имеется возможность использования вычислительных мощностей графических процессоров и подключение специальных библиотек, которые максимально полно задействуют ресурсы центрального процессора. Такая особенность позволяет выйти на новый уровень расчета эффекта пространственного заряда пучка благодаря использованию значительного количества модельных частиц.

Все эти нововведения позволили создать программу для моделирования динамики частиц в циклотроне с учетом суперпозиции трехмерных электрических и магнитных полей, потерь частиц на геометрии установки и пространственного заряда пучка. При этом такие расчеты выполняются за времена, недоступные другим программам аналогичного назначения.



Программа SNOP использовалась при расчетах динамики частиц для AVF-циклотрона (RIKEN, Япония), при работе по проектированию циклотрона-инжектора ускорительного комплекса HITFiL (IMP, Китай), при моделировании циклотрона NIRS-930 (NIRS, Япония) и при расчете динамики пучка в линии транспортировки низкоэнергетического пучка для установки FRIB (MSU, США). Соответствующее программное обеспечение установлено и применяется в большинстве указанных исследовательских центров.

**Вторая глава** посвящена работе по проектированию HITFiL-циклотрона (IMP, Китай). Новый ускорительный комплекс HITFiL (Heavy Ion Therapy Facility in Lanzhou) находится в стадии создания в Институте Современной Физики (IMP) [5]. Комплекс предназначен для лучевой терапии опухолей и в своей основе содержит синхротрон, предназначенный для ускорения углерода до энергий 120-400 МэВ/нукл. и протонов до энергии 60-250 МэВ. Энергия инжекции в синхротрон равна 7 МэВ/нукл. В качестве инжектора ионов углерода предполагается использование компактного изохронного циклотрона [ 6 ]. Основные параметры циклотрона приведены в Таблица 1.

Таблица 1. Основные параметры циклотрона.

Параметр	Величина
Магнитное поле в центре	1.2128 Т
Воздушный зазор между секторами	80 мм
Частота ускоряющего напряжения	32.023 МГц
Количество дуантов	2
Угловой размер дуанта	30-33°
Амплитуда ускоряющего напряжения	70 кВ
Гармоника ускоряющего напряжения	4
Ускоряемая частица	углерод $^{12}\text{C}^{5+}$
Радиус инжекции	2.7 см
Энергия инжекции	111.6 кэВ
Радиус вывода	75 см
Энергия вывода	7 МэВ/нукл.
Размеры пучка на выводе	20 $\mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$
Ток в пучке	10 мкА
Разброс по энергии	1 %

Сотрудниками IMP был подготовлен начальный технический проект ускорителя, который явился стартовой позицией для начала расчетов. Основной целью

моделирования было создание обновленного технического проекта циклотрона, характеристики получаемого пучка (качество пучка, ток в пучке, разброс по энергии и т. д.) углерода которого соответствовали бы заявленным требованиям. Для этого необходим анализ динамики пучка в линии инжекции, параметров режима ускорения и параметров выводной системы.

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие задачи:

- Расчет электромагнитных полей структурных элементов установки, генерация трехмерных карт электромагнитных полей;
- Оценка функциональности отдельных составных частей циклотрона таких как: линия инжекции, центральная зона ускорителя, зона ускорения и выводная система;
- Внесение предложений в первоначальный технический проект, касательно структурных элементов циклотрона и оптимальных параметров режима ускорения.

Для анализа динамики частиц была создана детальная компьютерная модель циклотрона, включающая все основные структурные элементы (Рис. 2).

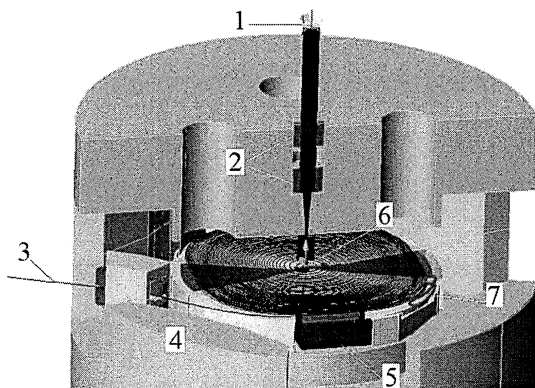


Рис. 2. Компьютерная модель NITFiL циклотрона: 1 – банчер; 2 – соленоиды; 3 – траектория центральной частицы; 4 – магнитный канал; 5 – электростатический дефлектор; 6 – спиральный инфлектор; 7 – гармоническая обмотка.

Установка содержит множество элементов управления пучком, создающих электрические и магнитные поля, которые накладываются друг на друга, образуя суперпозицию полей, которую необходимо было учесть в процессе расчета динамики пучка. Поля рассчитывались в процессе анализа динамики пучка по мере

необходимости для каждого структурного элемента, а также велась работа по выбору оптимальной геометрии элементов для соответствия полученных полей необходимым характеристикам. Для расчета электромагнитных полей использовались коммерческая программа Opera/Tosca [7] и свободно распространяемая программа Poisson-Superfish [8].

Центральная область ускорителя была тщательно исследована на предмет повышения качества пучка после первых оборотов, так как именно формирование пучка в центральной области влияет на качественные и количественные характеристики пучка на его выводе из вакуумной камеры ускорителя.

Часть работы была посвящена оценке влияния величин обрезания спирального инфлектора на динамику частиц в процессе ускорения. В результате ряда проведенных расчетов динамики пучка были выбраны оптимальные величины для обрезания пластин инфлектора. Показано уменьшение аксиальных колебаний равновесной частицы с 2 мм до 0.3 мм.

Основными особенностями, которые приходится учитывать при проектировании циклотрона, обращая внимание на зону ускорения, являются создание магнитного поля с требуемым уровнем изохронизма, минимизация радиальных колебаний частиц в процессе ускорения и отсутствие пересечения опасных резонансов. Показателем изохронности поля может служить зависимость фазы ВЧ при прохождении частицами, например, центров ускоряющих дуантов от радиуса или количества оборотов, совершаемых частицей в магнитном поле. Расчетное поле, полученное из модели магнита с размерами, определенными в первоначальном проекте, имеет отклонение от изохронного поля около 10 Гаусс. Для исследования влияния такой точности формирования поля был проведен ряд оптимизационных процедур (добавление к основному полю полей виртуальных корректирующих обмоток, оптимизация токов в них), целью которых было создание поля, имеющего меньшие отклонения от изохронной зависимости. Результатом явилась полученная карта поля с отклонениями от изохронного не более 5 Гаусс. При ускорении в таком поле отклонение фазы ВЧ для центральной частицы при прохождении ею центров ускоряющих дуантов составило менее  $5^\circ$  во всем диапазоне ускорения. При этом энергетический разброс в пучке на конечном радиусе уменьшается в 2 раза по сравнению с ускорением в первоначальном магнитном поле. На основании

проведенного анализа была проведена дополнительная работа по формированию магнитного поля циклотрона [9].

Анализ частот бетатронных колебаний, проведенный в магнитном поле, полученном при первоначальной структуре магнита, обнаружил пересечение частицей нескольких опасных резонансов в процессе ускорения. Частицы совершают 70 оборотов в магнитном поле. Пересечение резонансов происходит вблизи конечного радиуса, где в области резонанса находится значительная часть оборотов. Это явилось причиной концептуальной модификации магнита. Воздушный зазор между секторами был увеличен с 50 мм до 80 мм. На Рис. 3 показана диаграмма частот бетатронных колебаний для начальной магнитной структуры и структуры с измененным зазором между секторами с обозначенными на ней линиями резонансов.

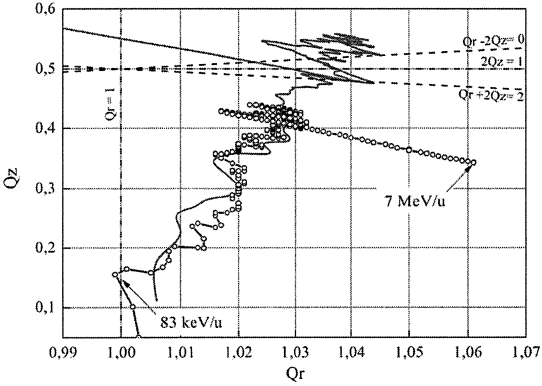


Рис. 3. Положение рабочей точки на диаграмме частот в поле магнита, с расстоянием между секторами 50 мм (сплошная линия) и 80 мм (линия с кругами).

Из рисунка видно, что в модифицированной структуре удалось избежать пересечения опасных резонансов за исключением пересечения резонанса  $Q_r = 1$  в начале ускорения. Данный резонанс возбуждается первой гармоникой магнитного поля. Для анализа его опасности и формулирования требований на максимальную амплитуду первой гармоники были проведены расчеты динамики пучка с присутствием первой гармоники в основном магнитном поле.

Результатом проведенных расчетов явилось заключение о том, что наличие первой гармоники магнитного поля влечет за собой появление когерентных колебаний пучка частиц. Существенное увеличение дисперсии амплитуд в пучке не наблюдается. Этот факт является следствием быстрого пересечения пучком области резонанса и наличием малого количества оборотов в этой области.

Основным требованием при проектировании HITFiL-циклотрона было требование максимально возможной простоты конструкции ускорителя. Поэтому выводная система содержала упрощенные варианты выводных элементов и в ней полностью отсутствовали элементы фокусировки пучка. В связи с этим основная работа велась по оптимизации структурных элементов системы вывода.

После серии проведенных расчетов динамики пучка было оптимизировано положение дефлектора, и внесены изменения в его конструкцию: изменение радиуса кривизны, удаление выступающих краев септума (передней пластины), увеличение зазора между септумом и потенциальным электродом. Все перечисленные предложения были приняты, как необходимые и повышающие общую эффективность вывода пучка.

Спад основного магнитного поля, в области, находящейся непосредственно за электростатическим дефлектором, где осуществляется вывод ускоренного пучка, приводит к сильнейшей радиальной дефокусировке пучка. В результате пучок на выходе имеет размеры, несоизмеримо большие по сравнению с требуемыми. Проблему можно решить при помощи использования корректора градиента магнитного поля (градиент-корректора).

После проведенной серии оптимизационных расчетов, включающих создание трехмерной геометрии градиент-корректора, вычисление создаваемого им поля и расчет динамики пучка, была получена необходимая геометрия устройства. Градиент-корректор было решено сделать «активным», т. е. включающим в себя токовые обмотки. Расчеты динамики пучка показали, что вклад поля градиент-корректора существенно улучшает характеристики выводимого пучка.

На ранних этапах работы было обнаружено, что первоначальный проект магнитного канала имел существенные недостатки. Магнитное поле канала имело нелинейную зависимость вдоль координаты, поперечной траектории частиц, отсутствовала «плоская вершина» в рабочей области. Для анализа влияния нелинейностей поля был проведен ряд расчетов динамики пучка, результатом которых стало заключение о необходимости создания магнитного канала, имеющего поле с линейной зависимостью в рабочей области и с положительным градиентом поля. В новом варианте удалось снизить количество ампер-витков, уменьшив поперечное сечение токовых обмоток. Основной особенностью новой конструкции магнита была форма его полюсов, которая непосредственно и отвечала за

формирование поля. После подбора соответствующей геометрии была создана трехмерная модель, расчетное поле которой отвечало требованиям на степень линейности поля. Расчеты динамики пучка, проведенные с учетом расчетного поля нового магнитного канала, показали существенное улучшение качества пучка и, как следствие, увеличение трансмиссии вывода.

Расчеты динамики пучка показали, что благодаря предложенным модификациям получено увеличение трансмиссии через циклотрон более чем в 6 раз (Рис. 4).

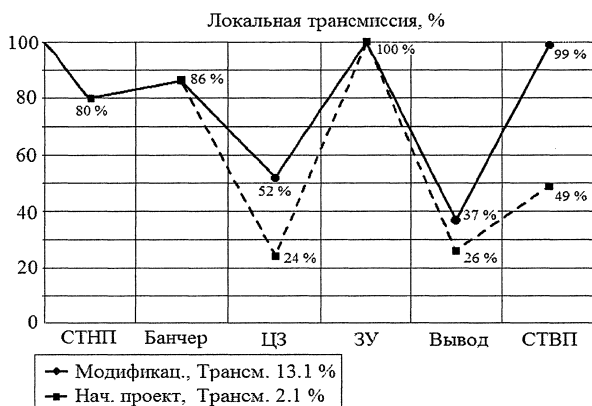


Рис. 4. Трансмиссия через структурные единицы циклотрона: СТНП—система транспортировки низкоэнергетического пучка, ЦЗ—центральная зона, ЗУ—зона ускорения, Вывод—выводная система, СТВП—система транспортировки высокоэнергетического пучка.

**В третьей главе** представлены основные результаты работы по модернизации AVF циклотрона (RIKEN, Япония) [10] с целью ускорения не только на второй, но и на первой и третьей гармониках ускоряющего поля и повышения интенсивности выводимого пучка. Изначально AVF-циклотрон (Рис. 5) был спроектирован для ускорения на второй гармонике ВЧ поля.

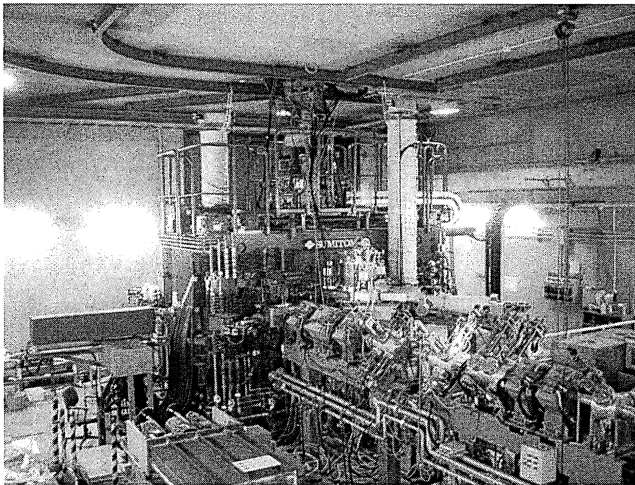


Рис. 5. Общий вид AVF-циклотрона.

Максимальная энергия, экспериментально полученная для протонов на данном ускорителе, равна 14 МэВ. Принципиально важным режимом ускорения для AVF-циклотрона является получение протонов с энергией 30 МэВ. Расчеты динамики частиц, производимые с помощью программ CBDA [4] и SNOP [A10], показали, что существующая структура центральной области циклотрона позволяет ускорить протоны до энергии 20 МэВ при работе на первой гармонике ВЧ поля. Энергии в 30 МэВ можно достичь, лишь после изменения геометрии центральной зоны ускорителя.

Проектирование центральной области является сложной итерационной задачей, чередующей расчет электромагнитных полей и динамики частиц. При проектировании новой геометрии центра велась проверка на предмет совместимости с режимами работы на второй гармонике ВЧ поля. В ходе работ компьютерная модель центральной зоны многократно подвергалась модификации, после которой велись расчеты динамики частиц для существующих режимов ускорения на второй гармонике ВЧ поля и для новых режимов ускорения протонов на первой гармонике. Особенностью центральной области циклотрона является и то, что корпус спирального инфлектора содержит дополнительные элементы структуры, обеспечивающие крепёж деталей и подвод мощности. Это обстоятельство накладывает определенные ограничения на возможность вариации размеров структурных элементов.

Результатом проведенных расчетов явилась компромиссная геометрия центральной зоны ускорителя, которая позволяет получить возможность ускорения в существующих режимах ускорения без уменьшения трансмиссии и делает возможным режим ускорения протонов с энергией 30 МэВ. Предлагаемая новая геометрия центральной области циклотрона в сравнении с существующей показана на Рис. 6.

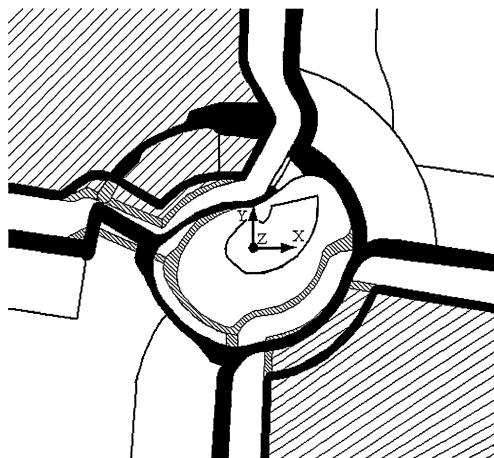


Рис. 6. Существующая (показана черным цветом) и предлагаемая (показана штриховкой) геометрии центральной области циклотрона.

Новая геометрия была определена, основываясь на многочисленных прецизионных расчетах движения частиц через циклотрон. Расчеты покрывали не только область центра, но и зону ускорения. Одним из критериев выбора параметров геометрии центральной зоны было центрирование орбит в ускорителе. Новая структура центра была одобрена и выбрана в качестве замены существующей. Принято решение о замене центральной области циклотрона в 2012 году.

Режим получения протонов до энергии 20 МэВ был выбран для исследования возможности применения имеющейся “Flat Top” системы для уменьшения энергетического разброса в ускоренном пучке. В режиме ускорения, когда ускоряющее напряжение на дуантах имеет синусоидальную зависимость амплитуды от времени, энергетический разброс частиц в пучке на конечном радиусе составляет около 2.5 % от средней энергии. Так как при работе в режиме ускорения на первой гармонике ВЧ поля в AVF-циклотроне пучок при прохождении ускоряющих



промежутков находится не на вершине ускоряющей волны, то стандартный метод использования “Flat Top” системы не дает результата.

При численном моделировании процесса ускорения был исследован способ добавления третьей гармоники к основному ускоряющему полю не в стандартной общепринятой форме, когда она добавляется с противоположным к основной волне знаком, а со знаком основной волны [A9]. Данный режим, в отличие от его стандартного “Flat Top” варианта, был назван “Sharp Top” режимом. Суть метода сводится к тому, что третья гармоника добавляется к основной ускоряющей волне таким образом, что область результирующей ускоряющей волны, занимаемая пучком при прохождении ускоряющего зазора, становится линейна. При последовательном прохождении пучком частиц ускоряющих промежутков происходит постоянная компенсация разницы в наборах энергии частицами, имеющими разную фазу ВЧ.

Расчеты показали, что использование такого метода позволяет уменьшить энергетический разброс более чем на порядок (Рис. 7). Впоследствии данный способ был подтвержден экспериментально [11].

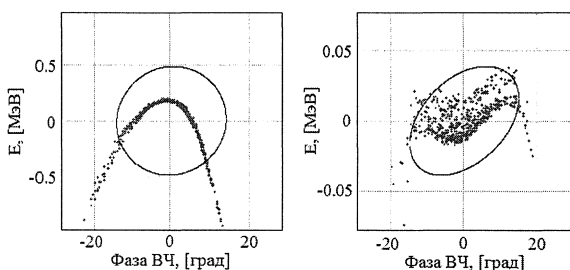


Рис. 7. Продольный эмиттанс пучка на конечном радиусе ускорения с использованием только основного ускоряющего поля (слева) и с использованием “Sharp Top” системы (справа).

В четвертой главе приведены результаты моделирования компактного циклотрона NIRS-930 (NIRS, Япония) [12]. Ускоритель спроектирован компанией Thomson-CSF и имеет величины магнитного и фокусирующего коэффициентов  $K_m = 110$  МэВ и  $K_\phi = 90$  МэВ. Совместно с циклотроном НМ-18 и девятью экспериментальными линиями образует фабрику по производству короткоживущих радиоизотопов.

Циклотрон используется для ускорения ряда частиц, основными из которых являются протоны на энергию 30 МэВ. Данный режим ускорения отличается тем, что в нем удастся добиться максимальных токов пучка (20 мкА), экспериментально доступных на данном ускорителе. Руководствуясь этим фактом, данный режим был выбран для построения компьютерной модели установки и ее калибровки (Рис. 8). Основной целью моделирования были интерпретация имеющихся экспериментальных данных и оптимизация параметров доступных режимов ускорения с целью повышения интенсивности и качества выводимого пучка. Отдельной задачей, требующей рассмотрения, является проверка возможности ускорения на третьей гармонике высокочастотного ускоряющего поля, которое экспериментально не реализовано на данном ускорителе на сегодняшний день.

Основными элементами аксиальной линии инжекции, для которых были рассчитаны трехмерные карты электромагнитных полей, были банчер и четыре соленоида, которые необходимы для управления поперечными размерами пучка и согласования их с центральной зоной циклотрона.

Основной магнит имеет четыре спиральных сектора для формирования поля и двенадцать корректирующих обмоток для коррекции среднего магнитного поля. Для подавления первой гармоники и для введения искусственного возмущения поля в области вывода, необходимого для увеличения разделения между соседними орбитами, служат восемь гармонических обмоток (четыре в области инжекции пучка и четыре в области вывода).

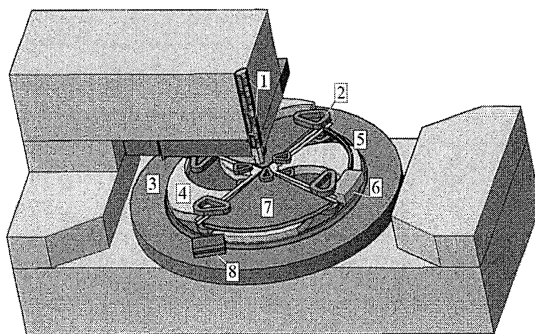


Рис. 8. Компьютерная модель циклотрона: 1 – соленоиды, 2 – гармонические катушки, 3 – основная обмотка, 4 – сектор, 5 – электростатический дефлектор, 6 – магнитный канал, 7 – ускоряющие дуанты, 8 – корректор спада магнитного поля.

Проведенные сравнения среднего поля и вкладов корректирующих обмоток, полученных расчетным путем, с экспериментальными данными показывают соответствие созданной модели магниту реальной установки. Этот факт позволяет говорить о соответствии расчетного магнитного поля реальному при выставлении значений токов в обмотках, соответствующих экспериментальному режиму.

Созданные трехмерные модели спирального инфлектора, системы ускоряющих дуантов, электростатического дефлектора, магнитного канала и корректора градиента магнитного поля были использованы для генерации карт электромагнитных полей, которые впоследствии были использованы в расчетах динамики пучка.

Стартовыми условиями при исследовании динамики пучка, по возможности, явились параметры режима ускорения, взятые из эксперимента. Начальная настройка системы велась при анализе движения равновесной частицы. Анализ динамических характеристик сформированного магнитного поля был проведен с помощью оценки частот бетатронных колебаний, используя аналитические выражения для оценки частот [13] и с помощью трассировки частиц в известной программе “Cyclops” [14].

Расчет фазы ВЧ пучка в процессе ускорения показал, что отклонения фазы от ее оптимального значения составляет не более  $5^\circ$  ВЧ. Такое отклонение по фазе находится в соответствии с измерениями на пучке при помощи фазового пробника (Рис. 9). Соизмеримые величины отклонений фазы ВЧ пучка между расчетом и экспериментом свидетельствуют о том, что расчеты динамики частиц ведутся в магнитном поле, близком к реальному.

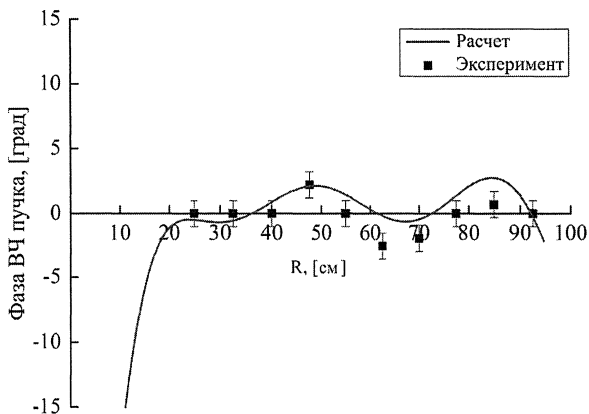


Рис. 9. Расчетная фаза ВЧ пучка и показания фазового пробника.

Для оценки трансмиссии через структурные узлы циклотрона было промоделировано движение пучка, состоящего из  $10^5$  макро-частиц, через весь циклотрон, причем в расчет был включен учет сил пространственного заряда пучка. Ток стартового пучка 130 мкА.

Произведенная оценка потерь частиц на поверхностях структурных элементов в центральной зоне ускорителя показала, что основная масса частиц выпадает из ускорения, как и следовало ожидать, на стенках корпуса, защищающего инфлектор от ВЧ поля, и постах ускоряющих дуантов (Рис. 10). Общие потери составили ~69 % от общего количества частиц в пучке.

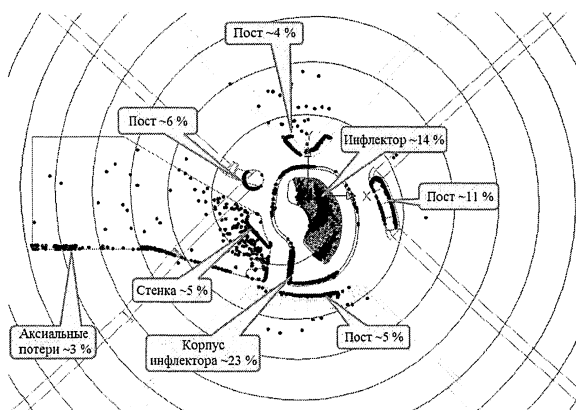


Рис. 10. Распределение потерянных частиц в центральной области циклотрона.

Часть частиц, прошедших центральную зону циклотрона без потерь, выпав из режима ускорения, через некоторое время возвращается в центр ускорителя, где теряется на элементах структуры. Таких частиц оказалось около 15 % от количества ионов, первоначально прошедших центральную зону.

Эффективность выводной системы оказалась 49 %. Под эффективностью структурного узла ускорителя здесь понимается отношение количества частиц прошедших узел без потерь к общему количеству частиц на его входе. Так как радиальный эмиттанс пучка на входе в выводную систему велик, и радиальные размеры больше, чем расстояние между септумом и потенциальным электродом дефлектора, то имеет место многооборотный вывод пучка. Расчеты показали, что в данном режиме практически весь пучок выводится за девять оборотов, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, которые получены на аналогичном

циклотроне JAEA AVF (Takasaki, Япония), где был экспериментально зарегистрирован десяти оборотный вывод пучка [15].

На установке имеется ряд пробников, измеряющих ток пучка: четыре цилиндра Фарадея в линии инжекции, главный пробник, находящийся в вакуумной камере циклотрона на радиусе 100 мм, пробник, расположенный непосредственно перед электростатическим дефлектором и пробник в системе транспортировки пучка после системы вывода. Сравнивая показания этих пробников с расчетными данными, можно установить соответствие созданной модели реальности. В Таблица 2 приведены данные о трансмиссии пучка через структурные узлы установки, полученные расчетным путем, в сравнении с измеренными величинами.

Таблица 2. Трансмиссия через узлы циклотрона.

Узел	Расчет		Эксперимент
	Без учета пространственного заряда	С учетом пространственного заряда	
Центральная область	35	31	29
Зона ускорения	89	85	89
Система вывода	52	49	49
Общая	16	13	12

Из таблицы следует, что расчетные данные, соответствуют экспериментально полученным значениям. Этот факт говорит о корректности созданной модели ускорителя и об адекватности данных получаемых с помощью нее. Предполагается, что дальнейшая работа по моделированию циклотрона будет направлена на выбор оптимальных параметров существующих режимов ускорения с целью повышения интенсивности и качества выведенного пучка. Исследование возможности ускорения на третьей гармонике ускоряющего ВЧ поля с возможной заменой центральной области циклотрона (если потребуется) также входит в план дальнейшей работы по установке.

**В пятой главе** обсуждается применение созданного пакета программ для расчета динамики в линии инжекции пучка для установки FRIB (Facility for Rare Isotope Beams). Установка находится в стадии разработки в Мичиганском Государственном Университете (MSU, США) и нацелена на производство и изучение редких изотопов и их роли в эволюции космоса [16]. Запуск ускорителя планируется в 2018 году.

Основой установки является трехсекционный сверхпроводящий линейный ускоритель, ускоряющий различные ионы от протонов (600 МэВ) до  $^{238}\text{U}$  (200 МэВ/нуклон).

Система транспортировки низкоэнергетического пучка структурно полностью идентична линиям инжекции в современных компактных циклотронах и состоит из двух ЭЦР источников, производящих ионы с энергией 12 кэВ/нуклон, двух систем отбора ионов (СОИ), системы транспортировки низкоэнергетического пучка (СТНП), RFQ и системы транспортировки пучка промежуточной энергии (СТПП) (Рис. 11). СОИ служит для выбора нужного заряда из спектра, производимого источником. Ввиду ограничения на интенсивность пучка из источника, увеличения выходной мощности установки для ионов с порядковым номером выше, чем у Хе предполагается добиться за счет одновременного ускорения двух соседних зарядов. Примером может служить одновременное ускорение  $^{238}\text{U}^{33+}$  и  $^{238}\text{U}^{34+}$ . В дальнейшем ионы транспортируются через СТНП до входа в RFQ, который ускоряет ионы от 12 кэВ/нуклон до 500 кэВ/нуклон, и затем они транспортируются через СТПП.

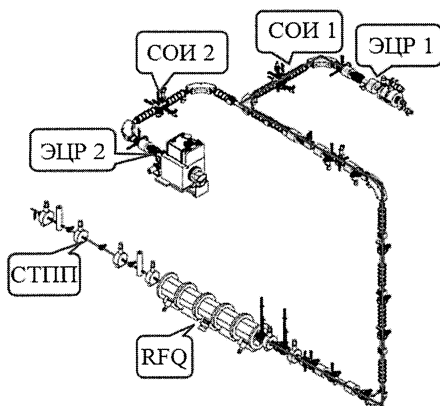


Рис. 11. Общий вид системы инжекции.

На момент начала данной работы существовал первоначальный технический проект установки, который основывался на расчетах динамики частиц с помощью программ, использующих матричные вычисления, таких как DIMAD [17]. Часть расчетов была проведена с помощью программы TRACK [18]. Существующие недостатки матричных программ и недостаточная проработанность расчетов в

трехмерных полях структурных элементов программы TRACK явились причинами для проведения расчетов динамики пучка, более приближенных к реальности. В данной главе описывается численное моделирование динамики многокомпонентного пучка, начиная от входа в СОИ и до плоскости, находящейся перед входом в RFQ.

Оптимизация оптики системы является первичной целью работы. Под оптимизацией здесь понимается анализ динамики пучка в реалистичных трехмерных полях структурных элементов и с учетом пространственного заряда многокомпонентного пучка с последующей коррекцией параметров оптических элементов для согласования отдельных узлов системы. Основными частицами, для которых проводился анализ динамики пучка, являлись ионы  $^{238}\text{U}$ .

На начальном этапе отсутствовали чертежи и разработанные модели структурных элементов и, соответственно, трехмерные распределения электрических и магнитных полей. Система отбора ионов (СОИ) была спроектирована как ахромат (система, имеющая нулевую дисперсию на выходе). СОИ состоит из двух дипольных 90-градусных поворотных магнитов с радиусом поворота 63.7 см и 6 электростатических квадрупольей, сгруппированных в 2 триплета. Система обеспечивает максимум разделения ионов, имеющих различные заряды, в центральной точке, где расположен горизонтальный коллиматор, отсекающий прочие заряды (Рис. 12). Система транспортировки низкоэнергетического пучка (СТНП) состоит из электростатических квадрупольей, соленоидов и сферических электростатических deflectоров.

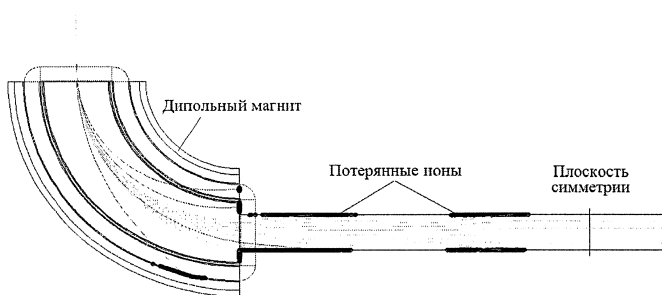


Рис. 12. Принцип работы системы отбора ионов.

Большая работа была проведена по созданию трехмерных компьютерных моделей оптических элементов системы и получению карт электромагнитных полей для детального анализа динамики пучка.

В созданной модели линии инжекции были проведены уникальные расчеты динамики многокомпонентного пучка частиц, который включал 15 различных типов ионов. При анализе динамики частиц основной упор был сделан на учет суммарного пространственного заряда многокомпонентного пучка с интенсивностью на уровне  $\sim 3$  мА. Благодаря использованию большого количества модельных частиц ( $10^6$ ) были учтены эффекты сил пространственного заряда пучка, и сделана соответствующая корректировка параметров оптической системы. В частности расчеты показали, что возможна корректировка влияния пространственного заряда на поперечные размеры пучка в плоскости симметрии СОИ. Таким образом, возможно горизонтальной щелью «выбрать» необходимые заряды  $^{238}\text{U}^{32+}$  и  $^{238}\text{U}^{34+}$  (Рис. 13).

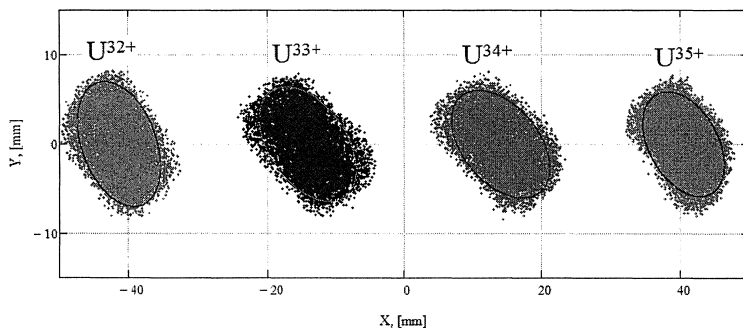


Рис. 13. Распределения ионов в конфигурационном пространстве в плоскости симметрии системы отбора ионов.

Также отличительной особенностью проведенных расчетов являлось то, что все они были проведены с использованием трехмерных распределений электромагнитных полей оптических элементов системы без каких-либо упрощений, что являлось непреодолимой трудностью для предыдущих расчетов, проведенных для данной линии инжекции.

В результате показана работоспособность созданной оптической системы, и указаны оптимальные параметры линии и элементы структуры, с помощью которых ведется корректировка влияния пространственного заряда пучка. Все расчеты оказались востребованы и вошли в проект установки, решение о создании которой принято в 2012 году.



## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Впервые проведено полное изучение динамики пучка для HITFiL-циклотрона (ИМР, Китай), начиная от входа в банчер и заканчивая выводной системой. Для всех структурных элементов HITFiL-циклотрона созданы физические модели и получены распределения трехмерных электромагнитных полей. Предложены радикальные изменения большинства структурных элементов первоначального технического проекта HITFiL-циклотрона, установка новых элементов управления пучком. Показано, что все предложенные модификации ведут к увеличению интенсивности выведенного пучка более чем в шесть раз по сравнению с ускорением в первоначальном варианте установки. В результате внесены существенные изменения в технический проект ускорителя. HITFiL-циклотрон находится в стадии создания. Запуск намечен на июль 2013 года.
2. Разработана конфигурация новой центральной зоны AVF-циклотрона (RIKEN, Япония), обеспечивающая возможность ускорения на первой гармонике ВЧ поля. Новая структура центра была одобрена и выбрана в качестве замены существующей. Принято решение о замене центральной области циклотрона в 2012 году.
3. Впервые сформулирован новый способ уменьшения энергетического разброса в выведенном пучке в изохронном циклотроне. Расчетным путем показано, что применение данного метода ведет к уменьшению разброса по энергии более чем на порядок. Показана возможность реализации данного метода с использованием существующей на ускорителе системы "Flat Top". Впоследствии данный способ был запатентован и экспериментально подтвержден.
4. Интерпретированы экспериментальные данные на циклотроне NIRS-930 (NIRS, Япония), основываясь на проведенном детальном моделировании установки с учетом эффектов пространственного заряда пучка и в трехмерных электромагнитных полях структурных элементов.
5. Проанализирована функциональность линии инжекции установки FRIB (MSU, США), основываясь на результатах уникального расчета динамики многокомпонентного пучка с прецизионным учетом пространственного заряда пучка в трехмерных электромагнитных полях структурных элементов. Указаны оптимальные параметры созданной оптической системы и элементы структуры, с

помощью которых ведется корректировка влияния пространственного заряда пучка. Разработаны физические модели основных структурных элементов системы. Все результаты оказались востребованы и вошли в проект установки, решение о начале строительства которой было принято в марте 2012 году.

6. Создан многофункциональный комплекс программ для анализа динамики частиц в циклотронах и линиях инжекции с учетом потерь частиц на структурных элементах установки, включающий расчет сил пространственного заряда пучка. Программный комплекс обеспечивает произведение расчета динамики частиц от выхода из источника ионов и до выводного окна ускорителя. Он поддерживает множество оптических элементов, использует реалистичные трехмерные распределения величин электромагнитных полей. Для получения более точных оценок оптимизировано использование вычислительных ресурсов персонального компьютера.

### **Список работ опубликованных по теме диссертации**

- [A1] E. Perepelkin, V. Smirnov, and S. Vorozhtsov “Beam Dynamic Calculation by NVIDIA CUDA Technology”, Proc. Mathematical Modeling and Computational Physics, Laboratory of Information Technologies, JINR, Dubna, Russia, 2009.
- [A2] Е.Е. Перепелкин, В.Л. Смирнов, С.Б. Ворожцов “Использование технологии NVIDIA CUDA при моделировании динамики пучка в ускорителях заряженных частиц”. Вестник Российского университета Дружбы Народов, Серия Математика. Информатика. Физика, № 1, с. 76-82, 2010.
- [A3] S. Vorozhtsov, V. Smirnov and A. Goto “Modification of the Central Region in the RIKEN AVF Cyclotron for Acceleration at the H=1 RF Harmonic”. Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications, CYCLOTRONS’10, Lanzhou, China, 2010.
- [A4] S. B. Vorozhtsov, V.L. Smirnov, and A. Goto “Modification of the Central Region of RIKEN AVF Cyclotron for Acceleration at the First Acceleration Harmonics”. RIKEN Accelerator Progress Report, V. 44, p. 105-106, 2011.
- [A5] B. Wang, ... V.L. Smirnov et al. “Computer design of a compact cyclotron”. Physics of Particles and Nuclei Letters, 9, 3 (173), pp. 471-488, 2012.
- [A6] V. Smirnov, S. Vorozhtsov, A. Goto, S. Hojo, T. Honma, K. Katagiri “Quantitative Simulation of NIRS Cyclotron”, Proc. IPAC’12, New Orleans, USA, 2012.
- [A7] L.T. Sun, ... V.L. Smirnov et al. “LEBT For FRIB Driver LINAC”. Rev. Sci. Instrum. 83, 02B705, 2012.
- [A8] E. Pozdeyev, ... V.L. Smirnov et al. “FRIB Front End Design Status”. LINAC12, Tel Aviv, Israel, 9 -14 September 2012.
- [A9] S.B. Vorozhtsov, V.L. Smirnov “Способ уменьшения энергетического разброса пучка частиц в циклотроне”, Patent application, ROSPATENT RU 2455801, 01.02.2011.

[A10] V.L. Smirnov and S.B. Vorozhtsov "SNOP – Beam Dynamics Analysis Code for Compact Cyclotrons". In: Proc. the XXI Russian Accelerator Conference, RuPAC'2012, St. Petersburg, Russia, pp. 325-327, 2012.

## **Цитируемая литература**

- 
- [1] E. O. Lawrence and M. L. Livingston. Phys. Rev., 37, 1707, 1931.
- [2] В.П. Дмитриевский «Мезонные фабрики». Труды I Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. – Дубна: Изд-во ОИЯИ, стр. 168-194, 1976.
- [3] Л.М. Онищенко Циклотроны. Физика элементарных частиц и атомного ядра, Т. 39, В. 6, 2008.
- [4] E.E. Perepelkin and S.B. Vorozhtsov "CBDA - Cyclotron Beam Dynamics Analysis code". In Proc.: The XXI Russian Accelerator Conference (RuPAC2008), Zvenigorod, Russia, 2008, p.40-42.
- [5] J.Q. Zhang, M.T. Song, B.W. Wei "Design of Synchrotron for Hadron Therapy". High Energy Physics and Nuclear Physics. Vol. 31, 12. Dec., 2007, pp.122-1125.
- [6] B. Wang et al. "Design and Construction Progress of a 7 MeV/u Cyclotron". In Proc. 19th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, 2010.
- [7] Opera/Tosca Reference Manual. Vector Fields.
- [8] K. Halbach and R. F. Holsinger "SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry". Particle Accelerators 7 (1976) 213-222.
- [9] Q. G. Yao, L. Z. Ma, H. F. Hao, X. Y. Zhang, S. F. Han, B. Wang, P. Yuan "The Magnetic Field Design of HITFiL Cyclotron", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, V. 22, Issue 3, p. 4401004.
- [10] A. Goto et al. "Injector AVF cyclotron at RIKEN". Proc. 12th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Berlin, Germany, 1989.
- [11] A. Goto, Private communication, February 7, 2012.
- [12] A. Sugiura et al. "Status Report of NIRS Cyclotron Facility (NIRS-930, HM-18)". Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan.
- [13] H.L. Hagedorn and N.F. Verster "Orbits in an AVF Cyclotron". Nuclear Instruments and Methods 18.19 (1962) 2001-228. North-Holland Publishing Co.
- [14] M.M. Gordon, Part. Accel. 16, 39 (1984).
- [15] Kurashima, M. Taguchi, I. Ishibori, T. Nara, W. Yokota "Progress in Formation of Single-Pulse Beams by a Chopping System at the JAEA/TIARA Facility". Proc. of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China.
- [16] "Facility for Rare Isotope Beams. Conceptual Design Report". FRIB-Z00000-AD-000049-R003, Michigan State University, East Lansing, MI. 11 Aug 2010.
- [17] Servranckx, R., et al. "User's Guide to the Program DIMAD". SLAC Report 285, UC-28, May 1985.
- [18] V.N. Aseev, P.N. Ostroumov, E.S. Lessner and B. Mustapha "TRACK: The New Beam Dynamics Code". Proc. PAC'05, Knoxville, May, 2005, TRAT028, p.2053.

Получено 21 ноября 2012 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 22.11.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 100 экз. Заказ № 57839.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)