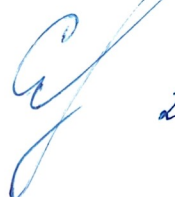


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

На правах рукописи



21.04.2022.

СМИРНОВ
Виктор Леонидович

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ

Специальность 01.04.20
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна – 2022

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

**Официальные
оппоненты:**

*Овсянников Дмитрий Александрович
доктор физико-математических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет
Заведующий кафедрой теории систем управления
электрофизической аппаратурой*

*Ламзин Евгений Анатольевич
доктор физико-математических наук
ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова г. Санкт-Петербург
начальник лаборатории*

*Корнев Сергей Александрович
доктор технических наук
Корпорация Коре-АйПи, Ноксвилл, США
старший научный сотрудник*

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/CalendarThesisDefenses>

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук
старший научный сотрудник

 В.А. Арефьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке и применению методов прецизионного моделирования циклотронных установок. Независимо от цели применения циклотрона, будь то ядерная физика, либо прикладные исследования, ускорительная установка представляет собой сложную систему. Стоимость создания циклотрона на современном уровне оценивается десятками миллионов долларов, а на его проектирование, изготовление и ввод в эксплуатацию уходят годы. Циклотронная физика не может обойтись без компьютерного моделирования, которое на сегодняшний день прочно заняло свое место в ней на этапах проектирования и модернизации ускорительных установок.

Неизбежность использования тех или иных упрощений на этапе проектирования циклотрона компенсируется работами во время ввода установки в эксплуатацию. Поэтому, зачастую, второй этап требует временных затрат, сравнимых со временем, потраченным на расчеты. Время ввода ускорителя в эксплуатацию находится в обратной зависимости от точности, как предварительных расчетов, так и организации процесса обработки измеренных данных. С экономической и потребительской точек зрения существует востребованность в циклотронах, имеющих наименьшие размеры, вес и потребляемую мощность. Удовлетворение таких требований возможно лишь при создании установок, в идею проекта которых заложена работа на грани физико-технических возможностей. В случае ошибок на этапе проектирования экспериментальная доводка установки во время ввода её в эксплуатацию может быть значительно затруднена или вовсе невозможна. Лишь прецизионные методы моделирования и эффективные алгоритмы и инструменты, обеспечивающие высокую точность расчетов, позволяют добиться положительного результата. Разработке и применению последних и посвящена данная диссертационная работа.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическим планом ЛЯП им. В.П. Джелепова ОИЯИ в рамках проектов «Разработка циклотронов для медицинских применений» и «Развитие физико-технических методов и программ для разработки перспективных ускорителей циклотронного типа».

Цели диссертационной работы

- разработка и внедрение новых прецизионных методов анализа динамики пучка в установках циклотронного типа;
- проектирование и создание изохронных циклотронов с уникальными параметрами для научных исследований и прикладных применений;
- повышение эффективности действующих циклотронных установок путем доработки отдельных систем на основе всестороннего анализа движения пучка с помощью созданных методов и программных пакетов.

Научная новизна и практическая ценность

1. Разработаны новые методики моделирования циклотронных установок, которые, как показала практическая реализация для ряда модернизированных и введенных в эксплуатацию циклотронов, обеспечивают совпадение расчетных значений с экспериментальными данными с точностью лучше, чем 10% по ключевым параметрам пучка на всех стадиях ускорения.

2. На основе разработанного комплексного подхода создан пакет программ для расчетов циклотронов, позволяющий рассчитывать движение пучка частиц в трехмерных электромагнитных полях сложной конфигурации с учетом трехмерной геометрической структуры элементов ускорителя, отличающийся функциональностью, интегрируемостью, производительностью и удобством в использовании. Программы позволяют учитывать асимметрию «верх-низ» установки и по результатам расчетов формулировать допуски на точность изготовления систем ускорителя.

3. Предложен и запатентован новый метод уменьшения энергетического разброса пучка в изохронных циклотронах на средние энергии (до 100 МэВ), основанный на линеаризации формы ускоряющей волны в диапазоне фаз, который занимает пучок при пересечении ускоряющих зазоров. Это приводит к созданию условий ускорения пучка, при которых выравнивается прирост энергий частицами, имеющими различные фазы, за оборот. В итоге энергетический разброс пучка на входе в выводную систему уменьшается на порядок. Действие метода экспериментально подтверждено в сеансе работы циклотрона RIKEN K-70 AVF (RIKEN, Япония) в режиме ускорения протонов до 20 МэВ.

4. Разработан и запатентован новый способ аксиальной инжекции пучка в циклотрон с полями до 4.5 Тл. За счет использования спирального инфлектора нового типа пучок частиц переводится в

медианную плоскость под определенным углом, а сам инфлектор и его инфраструктура при этом смещены относительно медианной плоскости в аксиальном направлении. Таким образом, создается пространственное разделение в аксиальном направлении между траекториями частиц и инфлектором. Это позволяет осуществить первый оборот, не задев пучком систему инфлектора. Предложенный способ открывает возможность создания компактных сверхпроводящих циклотронов с высокими магнитными полями (4-5 Тл).

5. Созданные методы, алгоритмы и программы широко использовались для проектирования и модернизации различных циклотронных установок в различных мировых научных центрах, в значительной части которых расчеты привели к практической реализации (RIKEN (Вако, Япония), NIRS (Тчиба, Япония), IMP (Ланьчжоу, Китай), MSU (Лансинг, США), Ionetix (Лансинг, США), Osaka University (Осака, Япония), ASIPP (Хэфэй, Китай), VECC (Кольката, Индия), National Nuclear Energy Agency of Indonesia, BATAN (Джокьякарта, Индонезия)).

6. Подготовлен концептуальный проект сверхпроводящего циклотрона для производства медицинских изотопов ION-12SC (США), на основе которого установка создана и запущена в серийное производство. Циклотроны изготовлены в соответствии со сформулированными на основании выполненных расчетов допусками изготовления и позиционирования узлов установки. В процессе наладки ускорителей серии проведена коррекция магнитного поля, и эффективность трансмиссии пучка увеличена на 85%. К настоящему моменту изготовлено семь циклотронов, которые успешно используются в медицинских центрах.

7. Проработан концептуальный проект компактного циклотрона-инжектора НИММ (Heavy Ion Medical Machine, Ланьчжоу, Китай) для углеродной терапии. Изменение проекта привело к шестикратному повышению расчетной интенсивности конечного пучка. Циклотрон изготовлен и введен в эксплуатацию. По сравнению с существующим циклотроном-инжектором, предназначенным для аналогичных целей и используемым в институте современной физики, созданный циклотрон производит пучок на порядок большей интенсивности (10 мкА) и обладает в 3.5 раза меньшим весом.

8. Спроектирована новая центральная зона циклотрона RIKEN K-70 AVF (RIKEN, Япония), установка которой привела к повышению энергии протонного пучка с 14 до 30 МэВ за счет перехода в режим ускорения на 1-ой кратности ВЧ.

9. Подготовлены концептуальные проекты серии сверхпроводящих медицинских циклотронов для адронной терапии:

- а. компактный циклотрон K230 (Pronova, США), предназначенный для производства протонов с энергией 230 МэВ и их использования в протонной терапии; системы циклотрона обладают высокой функциональностью и эффективностью, дающими возможность формирования ускоряемого пучка в широком диапазоне фаз и обеспечивающими эффективность вывода пучка до 90% с варьируемой интенсивностью; проект включает требования на точность изготовления и позиционирования узлов ускорителя;
- б. ускорительная установка, предназначенная для адронной терапии, и базирующаяся на использовании каскада сверхпроводящих ускорителей; основной циклотрон K1600 является секторным и ускоряет ионы углерода $^{12}\text{C}^{6+}$ до энергии 400 МэВ/нукл.; в качестве инжектора используется компактный изохронный циклотрон K280, предназначенный для получения пучков $^2\text{H}^+$ ионов, углерода и протонов с энергией 70 МэВ/нукл.; комплекс является многофункциональным и позволяет как нарабатывать медицинские изотопы, так и осуществлять протонную и углеродную терапию; требуемые параметры пучков достигаются за счет использования эффективных систем инжекции, ускорения и вывода пучка, коэффициент проводки пучка через которые не менее 70%.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. разработанные методы и алгоритмы анализа динамики пучка в циклотронах, а также программное обеспечение, позволяющие получать расчетные данные, которые согласуются с измерениями с точностью лучше 10%;
2. сверхпроводящий ультракомпактный циклотрон ION-12SC, предназначенный для производства радиоизотопов, с магнитным полем 4.5 Тесла, что является самым высоким уровнем поля среди изохронных циклотронов и приводит к тому, что установка имеет минимальные размеры и вес; методы коррекции поля, приведшие к повышению интенсивности пучка на 85%;
3. проработка концептуального проекта введенного в эксплуатацию углеродного циклотрона-инжектора НИММ, приведшая к шестикратному повышению интенсивности пучка; совпадение измеренной эффективности трансмиссии и интенсивности пучка с расчетными данными в пределах 10%;
4. двукратное повышение энергии выведенного пучка в циклотроне RIKEN K-70 AVF за счет разработки новой центральной зоны;

5. концептуальный проект сверхпроводящего циклотрона K230 для протонной терапии с эффективностью вывода пучка до 90% и возможностью вариации интенсивности и качества пучка, включающий чертежи основных узлов циклотрона; детальный анализ динамики пучка в ускорителе, содержащий исследование влияния неточностей сборки частей магнита, его асимметрии и магнитных свойств стали на параметры пучка; геометрические допуски на производство и позиционирование частей циклотрона;
6. способ значительного снижения величины энергетического разброса в ускоренном пучке;
7. способ аксиальной инжекции пучка в компактный циклотрон с уровнем магнитного поля до 4.5 Тл.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы были представлены на семинарах ЛЯП по проблемам ускорителей заряженных частиц, Общелабораторных семинарах ЛЯП, на международных конференциях и совещаниях: Mathematical Modeling and Computational Physics MMCP'2009, Laboratory of Information Technologies, JINR, Дубна, Россия; 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications, CYCLOTRONS'10, Lanzhou, China; 14th 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 RUPAC 2012, Saint-Petersburg, Russia, 2012; 26th International Linear Accelerator Conference, LINAC12, Tel Aviv, Israel, 2012; XXIV Russian particle accelerators conference RUPAC 2014, Obninsk, Russia, 2014; 5th International Particle Accelerator Conference, IPAC'14, Dresden, Germany; HIAT 2015, , RIKEN, RCNP, NIRS, University of Tsukuba, JAEA, Yokohama, Japan; 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, Tsuruga, Japan; 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART12), Finland, 2015; XXV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC 2016, Peterhof, St. Petersburg, Russia, 2016; 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, PSI Zürich, Switzerland, 2016; European Cyclotron Progress Meeting 2018 (ECPM'2018), Dubna, Russia; International Conference on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, 2019.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 34 работы, из которых 18 в изданиях, рекомендованных ВАК (16 статей в журналах и 2 патента на изобретение). Часть из приведенных журнальных статей являются монографиями и написаны без соавторов.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

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

В первой главе дан краткий обзор программного обеспечения, которое может быть использовано для моделирования динамики пучка заряженных частиц в циклотронных установках [A1]. Приведено описание структуры программ, методов, используемых в них, и их основных возможностей. Указаны ограничения и границы применимости к установкам циклотронного типа, в том числе к современным разработкам, находящимся на передовом крае физико-технических решений и возможностей [A2].

Во второй главе раскрывается методология проектирования компактного циклотрона [A3-A5]. Приведены общеизвестные этапы моделирования ускорителя: основы движения заряженных частиц в электромагнитном поле; обзор аналитических и численных методов расчета динамики пучка и эффектов пространственного заряда; основные факторы, влияющие на количественные и качественные характеристики пучка. Также дано описание методов прецизионного анализа динамики пучка и алгоритмов, используемых автором диссертации для организации эффективной работы в области проектирования новых и модернизации существующих циклотронов.

Математическое моделирование в его классическом определении – это отображение на ЭВМ физического объекта в его наиболее существенных особенностях [1]. Это предполагает создание детальной компьютерной (математической) модели циклотрона, которая описывает основные характеристики изучаемого физического объекта. При построении модели исходят из основных физических законов, учитывающих только наиболее существенные черты явления, отвлекаясь от ряда его второстепенных характеристик. Численное моделирование является надежным, эффективным, и основным способом анализа и оптимизации различных систем циклотронных установок. При создании модели исследователь всегда применяет ряд упрощений и допущений. Эффективность такого подхода подтверждается введенными в эксплуатацию ускорительными установками. В настоящее время подавляющая часть циклотронных установок проектируется для работы на грани физико-технических возможностей. Отсюда следует принципиальная важность

максимально детального и точного моделирования ускорителя на всех этапах его создания. Лишь прецизионные подходы и инструменты позволяют добиться положительного результата – достижения установкой проектных параметров. Автор диссертационной работы разработал уникальные методы и алгоритмы, позволяющие значительно повысить реалистичность (точность) проводимых расчетов и уменьшить время, требуемое на анализ, по сравнению со всеми имеющимися в настоящее время подходами.

Максимальная точность моделирования достигается за счет:

- учета всех основных элементов установки, представленных трехмерными распределениями электромагнитных полей;
- прецизионного подхода к созданию моделей для расчета полей и построению трехмерной сетки конечных элементов, преимущественно в местах с особенностями геометрической структуры;
- трассировки частиц от источника ионов до выводного окна, т.е. от начальной точки инжекции и до окончания ускорения и вывода пучка;
- прецизионного расчета сил пространственного заряда пучка;
- заполнения фазового пространства при генерации начальных распределений частиц по законам, максимально точно описывающим физические свойства системы;
- анализа потерь частиц на трехмерной структуре всех частей установки, находящихся в рабочей области без использования каких-либо упрощений;
- численного исследования влияния рассогласований системы на качественные и количественные характеристики пучка, что необходимо при формулировании требований на допуски при изготовлении и позиционировании частей установки и анализе данных измерений на этапе ввода установки в эксплуатацию.

Автором создан комплекс программ для расчета динамики частиц SNOP [A6, A7], который реализует перечисленные принципы и дает возможность проведения вычислений в короткие сроки. Благодаря ряду уникальных особенностей разработанный код является наиболее эффективным и удобным в использовании пакетом в сравнении с мировыми аналогами:

- Разработан ряд «быстрых» алгоритмов, а также применены известные способы решения задач, предполагающие минимальное количество вычислительных операций;
- Все алгоритмы адаптированы для проведения параллельных расчетов и реализованы на языке C++. Разработаны и созданы версии программы, выполняющие расчеты параллельно с применением многоядерности и графических процессоров [2];

- Все программы имеют графический интерфейс пользователя, по средствам которого ведется управление параметрами установки без необходимости редактирования текстовых файлов и использования командной строки;

Разработаны принципиально новые методы рассмотрения движения частиц в ускорителе и анализа результатов расчетов, основанные на использовании визуализации. Эти методы в отличие от общеизвестных способов оценки поведения пучка, состоящих в анализе координат и скоростей его частиц, значительно упрощают процесс моделирования и сокращают расчетное время. Можно ввести термин «визуальные методы анализа», применимый к новому подходу в ускорительной физике. Его суть состоит в том, что используется визуальное наложение места локализации частицы на фоне трехмерной геометрической структуры установки. Положение частицы может быть воспроизведено трехмерным объектом в пакете автоматизированного проектирования на каждом итерационном шаге интегрирования уравнений движения. Созданы отдельные блоки программ, позволяющие визуализировать проводимые расчеты как в «ON-Line», так и в «OFF-Line» режимах. Одновременно можно воспроизводить положения тысяч частиц. При этом сам расчет трассировки макро-частиц ведется в трехмерных полях. Такой метод до сих пор не использовался ни в одном научном центре мира и оказался крайне эффективным. Одновременно разработаны и реализованы методы для организации связей между пакетами расчета для обмена данными.

Программа SNOP адаптирована для исследований влияния рассогласований системы на пучок. Для этого введена возможность проведения расчетов в трехмерных электромагнитных полях, обладающих асимметрией относительно медианной плоскости.

Существуют дополнительные версии программы SNOP, предназначенные для расчета кольцевых циклотронов и FFAG-ускорителей. Имеются завершенные работы по подготовке физических проектов таких ускорителей с помощью данной программы [A8]. Комплексы программ адаптированы для моделирования линий транспортировки пучка и использовались для анализа динамики частиц в линиях транспортировки выведенного пучка медицинских циклотронов [A9], а также других ускорительных установок, в частности линии инъекции FRIB (MSU, США) [A10, A11], где проведено прецизионное моделирование динамики многокомпонентного сильноточного пучка с учетом трехмерных распределений полей оптических элементов.

Третья глава посвящена работе по проектированию и вводу в эксплуатацию сверхпроводящего ультракомпактного циклотрона ION-12SC, предназначенного для ускорения

протонов до энергии 12.5 МэВ. Установка предназначена для производства изотопов ^{13}N и ^{18}F . Инициатор её создания – корпорация Ionetix (Lansing, США). Начальным требованием было использование уникальной запатентованной технологии работы с «холодным» ярмом [3], когда в криостат помещается не только основная обмотка, но и возвратное ярмо магнита. Такая конструкция не требует дополнительного места для термоизоляции между обмоткой и ярмом магнита, что в некоторой степени упрощает криогенную систему. На момент начала работ был создан прототип, представляющий собой классический сверхпроводящий циклотрон (без пространственной вариации магнитного поля), на котором была успешно опробована новая криогенная технология. Но в классическом циклотроне со спадающим полем по определению невозможно ускорить протоны до энергии выше 9-10 МэВ при использовании малых ускоряющих полей. Поэтому при запуске ограничились лишь проверкой работы источника и ускорением протонов до малых энергий с незначительными интенсивностями пучка. Отсутствие проблем с точки зрения криогеники позволило продвинуться в сторону формулирования задачи создания изохронного циклотрона. Ответственным за создание концептуального проекта изохронного циклотрона был автор настоящей диссертационной работы. Постановка задачи состояла в создании циклотрона, производящего 12.5-МэВ протоны для производства изотопов и имеющего максимальный уровень магнитного поля из всех существующих в мире изохронных циклотронов (преследуя цель минимизации размера и веса) и минимально возможную потребляемую мощность.

Принципиальными трудностями создания изохронных циклотронов с такими параметрами являются:

- отсутствие возможности использования внешнего источника ионов;
- трудности проектирования, изготовления и функционирования центральной зоны;
- проблемы устойчивости аксиального движения;
- необходимость использования трехсекторной магнитной системы с одним ускоряющим дуантом приводит к сильной радиальной неустойчивости пучка.

Возможным решением поставленной задачи является система, чувствительная к любым малым изменениям её параметров. Это связано с необходимостью работы ускорителя с относительно малой величиной аксиальной фокусировки и тенденцией к сильному радиальному децентрированию пучка вследствие малых рассогласований системы. Поэтому проектирование и создание такого ускорителя возможно только с использованием прецизионных методов численного моделирования. Потенциальная сложность изготовления системы с критическим с точки зрения динамики пучка рассогласованием и крайне ограниченные механизмы его

компенсации и явились причинами того, что такие проекты ранее не реализовывались, несмотря на их очевидную востребованность. Применяя методы, описанные в Главе 2, в короткие сроки проект ускорителя был подготовлен [A12, A13] и в дальнейшем реализован (Рис. 1). Подготовка технической документации, изготовление частей ускорителя и ввод в эксплуатацию опытного и серийных образцов установки велись в тесном сотрудничестве с сотрудниками ЛЯП.



Рис. 1. Ускоритель в сборе. Циклотрон расположен внутри криостата [A13].

Ускоритель представляет собой компактный сверхпроводящий циклотрон с центральным магнитным полем 4.5 Тл, что является абсолютным рекордом для изохронных циклотронов. Общий вес установки 2.3 т, размеры 1×2 м², что позволяет без проблем размещать её в клинике. Установка по праву именуется «самым компактным в мире ускорителем для производства ПЭТ изотопов». Потребляемая мощность всего 34 кВт.

Выполненные расчеты позволили получить магнитную структуру, обеспечивающую требуемый изохронизм поля и устойчивость радиального и аксиального колебаний пучка. Магнитная система использует три крутоспиральных сектора, боковая поверхность описывается логарифмическим законом с углом спирали 60 градусов. Данный ускоритель – единственный в мире компактный циклотрон, использующий спиральные шиммы с постоянным углом спирали на всех радиусах (Рис. 2). Для того чтобы получить приемлемую величину аксиальных бетатронных частот в центральной области была применена разработанная автором технология, согласно которой боковая поверхность спирального сектора разбивается на области, в каждой из которых его поверхность прямолинейна [A12].



Рис. 2. Изготовленная секторная структура циклотрона ION-12SC [A13].

Для получения пучка протонов в циклотроне используется внутренний источник ионов с холодным катодом. При величине магнитного поля в центре 4.5 Тесла и малом ускоряющем напряжении размеры центральной зоны составляют всего 10 мм. Расчеты показали, что при величине амплитуды ускоряющего напряжения 17-20 кВ расстояние между щелью ионного источника и пуллером дуанта должно быть ~ 1.5 мм. В таком случае значительная часть пучка имеет возможность обогнуть структуру источника, не задев его.

Для того чтобы сформулировать требования на допуски при изготовлении и позиционировании узлов установки был проведен тщательный анализ влияния рассогласований системы на количественные и качественные характеристики пучка. Особое внимание было уделено различного рода смещениям обмотки и секторов. Вращение частей магнитной системы вокруг горизонтальной оси или их аксиальное смещение приводят к появлению радиальной компоненты магнитного поля в плоскости симметрии магнита, что ведет к аксиальному смещению пучка. Для изучения эффектов проводятся расчеты трехмерных полей с введенными искажениями структуры, которые впоследствии используются для анализа динамики пучка. Исследование показало, что, несмотря на относительно малую величину частоты аксиальных бетатронных колебаний, которая на всех радиусах меньше 0.15, пучок довольно устойчив с точки зрения аксиального смещения под действием сдвига обмотки и секторов. Причина тому – малость производной аксиальной компоненты поля вклада обмотки (секторов) от радиуса. Центр масс пучка смещается не более чем на 0.5 мм при аксиальном смещении обмотки на 0.3 мм, что было заключено в качестве допуска при позиционировании обмотки. Критическим можно считать аксиальное смещение обмотки на 0.5 мм, которое приводит к сдвигу центра масс пучка на 1 мм (при апертуре дуантов ± 5 мм).

Выявлено, что вращения обмотки и секторов вокруг осей X и Y приводят к разным эффектам. Вращение вокруг оси Y (оси центра дуанта) более опасно. Это обусловлено тем, что в этом случае большее количество частиц децентрировано таким образом, что они теряются на стенках вакуумной камеры, не достигнув конечной энергии и мишени. Это связано с эффектом пересечения так называемого «electric gap crossing» резонанса [4, 5]. Эффект в большей степени проявляется, когда периодичности магнитной структуры и ускоряющей системы не кратны друг другу. В данном случае при трех секторах имеются два ускоряющих зазора. Явление заключается в наличии резонансного децентрирования орбит, центры которых смещаются в радиальном направлении в результате того, что частицы на каждом обороте получают различные приросты энергии на соседних ускоряющих зазорах (прирост энергии на одном ускоряющем зазоре всегда превышает набор энергии на соседнем). На начальном этапе расчетов положение ионного источника находилось на линии симметрии дуанта (на оси Y). Эффективность трансмиссии пучка через центральную зону при этом составляла ~25%, но вследствие децентрирования частиц, конечной энергии достигало всего лишь 5% частиц от начального их количества. Исследование показало, что управлять величиной центрирования частиц возможно с помощью изменения положения ионного источника. Для этого достаточно переместить его вдоль линии ускоряющего зазора. В магнитном поле с отсутствием гармоник ошибок оптимальным является положение источника при его смещении на 2-2.5 мм. При этом эффективность трансмиссии пучка от щели источника до мишени составляет 21% вместо 5% для случая размещения источника на центральной линии. Фазовый акцептанс возрастает практически в 2 раза. При оптимизации положения источника на прототипе и на бета-версии циклотрона максимальный ток пучка на мишени был получен при поперечной координате центра источника 3.5 мм и 2.0 мм соответственно, что согласуется с проектной величиной 2.5 мм. В присутствии «electric gap crossing» резонанса взаимное расположение секторной структуры и ускоряющей системы непосредственно влияет на величину центрирования частиц. Поэтому азимутальное положение секторных шимм тщательно оптимизировалось.

Работы по проектированию циклотрона ION-12SC начались в апреле 2013 года. В сентябре того же года был закончен концептуальный проект ускорителя, и начались работы по подготовке технического проекта и непосредственному созданию установки. Прототип магнита был изготовлен и поставлен для тестирования в сентябре 2014 года. Бета-версия циклотрона изготовлена в 2015 году. Измерения показали, что отклонение измеренного среднего поля от расчетного не превышают 40 Гс во всей рабочей области, что составляет не более 0.1 % уровня поля (Рис. 3).

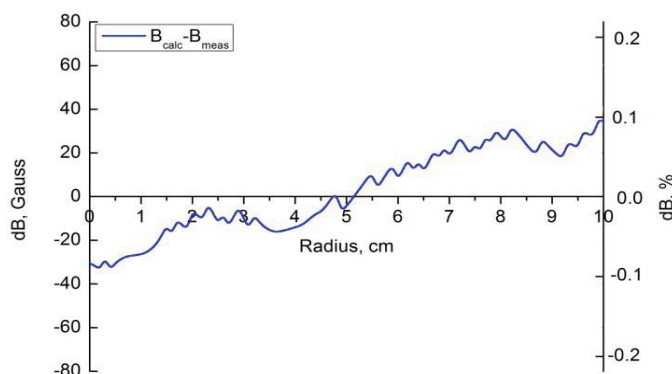


Рис. 3. Отклонение измеренного среднего поля от расчетной зависимости для бета-версии циклотрона.

Проведенные измерения тока пучка на бета-версии ускорителя (после его отладки, детали которой описаны ниже) показали, что при максимальном токе дуги на источнике интенсивность пучка на мишени достигает величины в 25 мкА. Рабочее напряжение на ускоряющем дуанте при этом 18 кВ.

В настоящее время ускорительная установка запущена в серийное производство. Изготовлено семь экземпляров циклотронов, часть из которых успешно используется по прямому назначению в медицинских центрах.

При вводе циклотронов в эксплуатацию анализировались причины потерь пучка, основываясь на расчетах динамики в измеренных полях. На бета-версии установки измерения показали, что энергия частиц, достигающих мишень, в два раза меньше требуемой. Анализ магнитного поля показал, что амплитуда первой гармоники от выводной шиммы 80 Гс вместо проектных 30 Гс, и величина заброса пучка значительно превышает требования. Фаза заброса пучка на мишень также отличалась от расчетной на 15-20 градусов. Измерения обнаружили неточность изготовления выводной шиммы (двукратное превышение толщины). Для компенсации эффектов был спроектирован дополнительный магнитный элемент, располагающийся рядом с мишенью. Установка его в циклотрон привела к повышению энергии ускоренного пучка до проектной величины и увеличению эффективности трансмиссии пучка до мишени на 30%.

На циклотроне серии с рабочим названием Т5 было выявлено отклонение пучка в аксиальном направлении на всех рабочих радиусах (Рис. 4).

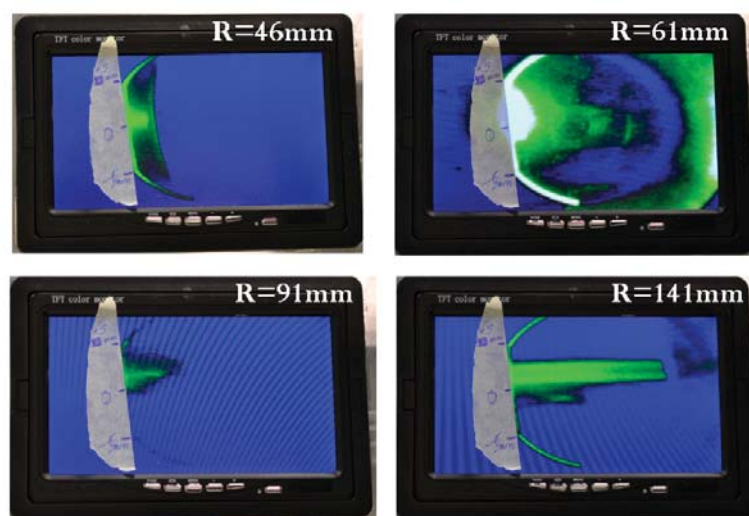


Рис. 4. Показания камеры фиксации пучка во время настройки пятого серийного экземпляра циклотрона ION-12SC. Результаты приведены для различных радиусов, начиная с 46 мм и заканчивая радиусом расположения мишени. На снимках хорошо видно аксиальное смещение пучка во всем диапазоне радиусов вследствие рассогласования системы [A14].

Имеющаяся система измерения магнитного поля дает информацию лишь об аксиальной компоненте поля в одной плоскости, что исключает возможность её использования для исследования причин аксиальных смещений пучка. Для интерпретации результатов измерений и поиска путей увеличения конечной интенсивности проведена серия расчетов динамики пучка с использованием трехмерных магнитных полей циклотрона, которые получены расчетным путем с искусственным введением рассогласований системы. Целью было попытаться найти такую конфигурацию, в которой поведение пучка в процессе ускорения схоже с результатами измерений. Очевидно, что любые аксиальные сдвиги обмотки и её вращения вокруг горизонтальной оси приводят к аксиальному сдвигу пучка, но направление сдвига не может иметь один и тот же знак на всем протяжении радиусов. Этот факт обусловлен тем, что производная вклада обмотки от радиуса $\partial B_z^{coil} / \partial r$ меняет знак в пределах зоны ускорения. К аналогичным эффектам приводят сдвиги и вращения секторной структуры, как целого. Поэтому описанные комбинации не могут объяснить данных измерений. Но независимый сдвиг отдельных частей магнитной структуры в купе со смещением обмотки может дать искомый результат. Расчеты показали, что при аксиальном сдвиге обмотки на 1 мм и одновременном сдвиге долиной шиммы на 2 мм без изменения положения секторов аксиальное движение пучка качественно описывает результаты измерений. По результатам исследования были даны рекомендации операторам установки. Было проведено измерение сил, действующих на обмотку в аксиальном направлении на различных азимутах, и

обнаружена асимметрия в их величинах. Этот факт говорит о том, что обмотка повернута относительно горизонтальной оси. Измерения положения долинной шиммы показали наличие аксиального сдвига величиной около 1 мм. После выравнивания обмотки и коррекции положения шиммы экспериментально удалось уменьшить величину аксиального сдвига пучка на 1 мм.

Основной причиной уменьшения интенсивности конечного пучка на большинстве циклотронов серии было наличие низших гармоник магнитного поля. В большинстве случаев присутствовала первая гармоника с амплитудой 10-20 Гс, которая, действуя совместно с «гар-crossing» резонансом, приводила к радиальному смещению пучка, превышающему допуск, и частицы либо не попадали в мишень, либо достигали ее при малой энергии. Численно исследовались методы коррекции магнитного поля с помощью смещения обмотки, а также подбирались система из магнитных пластин, которые устанавливались в аксиальный зазор между секторами [A14]. Результаты измерений показали 7-кратное увеличение интенсивности пучка на мишени (Рис. 5).

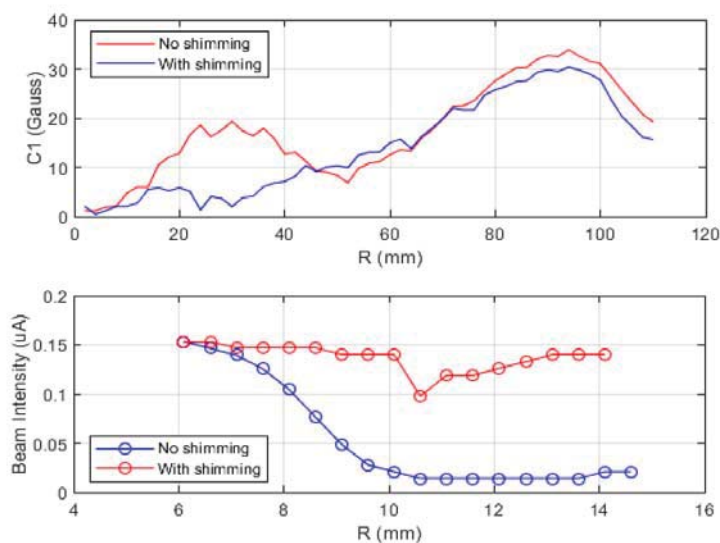


Рис. 5. Результаты измерения амплитуды первой гармоники магнитного поля (верхний график) до и после шиммирования и интенсивность ускоренного пучка (нижний). Анализ динамики пучка показал, что достаточно уменьшить величину первой гармоники на начальных радиусах до 2-5 Гс, чтобы устранить причину потерь пучка, заключающуюся в его децентрировании, что подтверждено экспериментально [A14].

Проект циклотрона ION-12SC и опыт взаимодействия между сотрудниками НЭОНУ ОИЯИ и корпорации Ionetix оказались настолько удачны, что впоследствии была спроектирована целая серия сверхпроводящих циклотронов для производства медицинских изотопов [A15-A17]. Проекты находятся в завершающей стадии проработки, и обсуждается возможность их практической реализации.

Положительный опыт создания изохронного циклотрона с магнитным полем 4.5 Тл открывает путь к проектированию ультракомпактных медицинских циклотронов с внешней инжекцией, что крайне актуально с точки зрения повышения величины конечного тока пучка. В ходе исследований выявлено, что практически реализуемыми являются изохронные протонные циклотроны, использующие аксиальную инжекцию, с величиной центрального поля вплоть до 2.9 Тл. Дальнейшее увеличение уровня поля ограничивается возможностью изготовления и функционирования центральной зоны циклотрона. Для решения вопроса внешней инжекции в высоких полях автором предложен и запатентован метод, который позволяет осуществить инжекцию в полях вплоть до 4.5 Тл [A18, A19]. Структура центра использует спиральный инфлектор новой конфигурации, переводящий пучок в медианную плоскость циклотрона под определенным углом (5-7 градусов). При этом сам инфлектор и его инфраструктура смещены относительно медианной поверхности в аксиальном направлении. Это позволяет совершить первый оборот ниже инфлектора, не задев его. Аксиальная устойчивость движения частиц достигается за счет фокусирующего действия сил электрического поля ускоряющих электродов.

Четвертая глава содержит результаты проектирования сверхпроводящего циклотрона K230 для протонной терапии, ускоряющего протоны до энергии 230 МэВ.

В начале 2014 года медицинским центром ProNova Solutions (США) было объявлено о начале деятельности, направленной на создание циклотрона для протонной терапии. За реализацию работ по проектированию циклотрона взялась корпорация Ionetix (США), у которой имелся успешный опыт проектирования медицинских ускорителей в сотрудничестве с учеными НЭОНУ ЛЯП им. В.П. Желепова ОИЯИ. Сотрудники НЭОНУ отвечали за подготовку концептуального проекта будущего ускорителя [A20], который был закончен к началу 2016 года с определяющим вкладом автора данной диссертационной работы. На протяжении 2016 года велась подготовка технической документации и согласование её с концептуальным проектом циклотрона. Работа велась в тесном контакте с сотрудниками ОИЯИ, которые отвечали за согласование технических решений с физическими требованиями к установке.

Величина уровня магнитного поля выбиралась, исходя из нескольких критериев, основными из которых были частота ускоряющей системы и размеры установки. В результате выбор был сделан на значении 3 Тл. Устойчивость аксиального движения достигается за счет использования четырехсекторной структуры с величиной спиральности до 71 градуса. Вес циклотрона около 60 тонн, его внешний диаметр 2.6 метра при общей высоте ярма около 1.5 метра (Рис. 6).

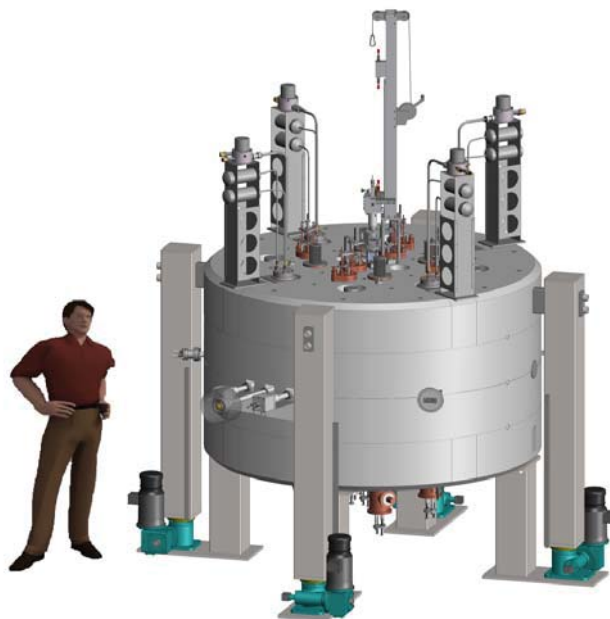


Рис. 6. Общий вид циклотрона K230 [A20].

В магнитной системе предусмотрены два набора подвижных металлических штырей, расположенных на центральной линии сектора, для введения первой гармоники в распределение магнитного поля. Штыри в центральной области предназначены для центрирования пучка и имеют диаметр 14 мм. Выводные штыри диаметром 18 мм, расположенные вблизи конечного радиуса, предназначены для создания первой гармоники с амплитудой в несколько Гс для использования прецессионного метода вывода пучка из циклотрона. Вывод осуществляется при значении частоты радиальных бетатронных колебаний, близкой к 0.95. Частота аксиальных колебаний в области конечных радиусов имеет значение не меньше, чем 0.22.

Для проведения процесса изохронизации магнитного поля и коррекции гармоник ошибок предусмотрена установка на каждой из секторных накладок системы, состоящей из 27 Т-образных шимм. Такая конструкция располагается вдоль центральной линии сектора со стороны медианной плоскости и крепится к телу сектора специальным винтом. Расчеты напряженно-деформированного состояния показали, что конструкция устойчива в столь высоком магнитном поле. Диапазон изменения аксиального размера каждой из шимм ± 5 мм, что делает доступным коррекцию отклонений среднего поля и гармоник поля с амплитудами до 50 Гс.

Циклотрон K230 имеет уникальную ускоряющую систему. Особенность её в том, что используются четыре ускоряющих дуанта трех разных типов. Два из них начинаются в центре и

доходят до конечного радиуса ускорения (так называемые «полноценные» дуанты). Два других начинаются с радиуса 412 мм («полудуанты»). Один из «полудуантов» расположен в долине, которая занята электростатическим дефлектором, поэтому он не доходит до конечного радиуса. Выбор такой ускоряющей системы обусловлен необходимостью обеспечить минимальное количество оборотов ионов в магнитном поле до достижения конечной энергии. Уменьшение количества оборотов, очевидно, ведет к улучшению радиального качества пучка на конечном радиусе за счет меньшего энергетического разброса в пучке. С другой стороны, обеспечивается свободная зона в долинах в центральной области для размещения систем формирования и диагностики пучка. Радиус начала «полудуантов» тщательно оптимизировался, исходя из критериев уменьшения влияния на амплитуды радиальных бетатронных колебаний и технических возможностей расположения короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий (стемов) дуантов. Процесс, инъекции, ускорения и вывода пучка оптимизированы таким образом, что имеется возможность работы ускорителя без «полудуантов», что не требует введения других модификаций системы. Эффективность вывода пучка в этом случае уменьшается на 14-18 %.

Центральная зона ускорителя содержит развитую систему формирования пучка (Рис. 7), параметры которой тщательно оптимизировались по средствам проведения детального анализа динамики пучка. В частности, фазовые щели, устанавливаемые в центре, предназначены для выборки части пучка с определенным фазовым диапазоном и радиальным размером. Имеется три подвижных фазовых щели. Первая из них расположена на первом обороте, вторая – на втором, третья – на радиусе 75 мм (область 7-8 оборотов). Причем две из них локализованы в долинах, одна – в холме магнитной системы. Расчеты показали, что такая система щелей позволяет сформировать пучок практически с любым фазовым диапазоном.

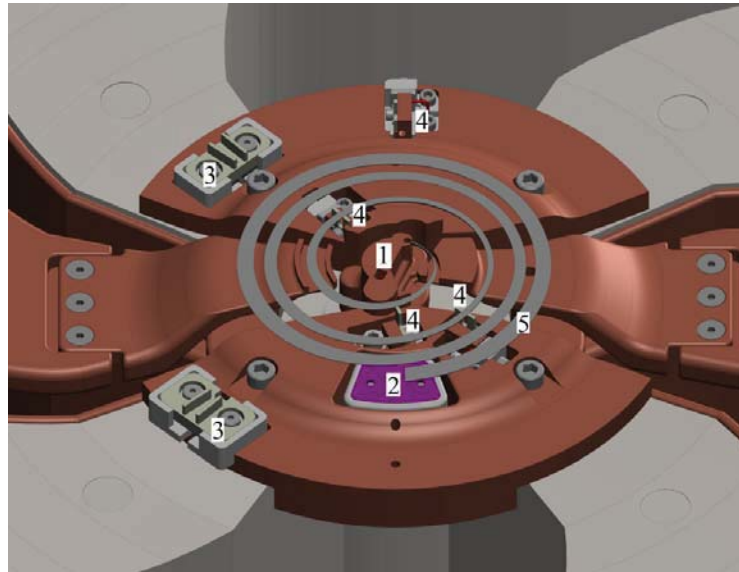


Рис. 7. Центральная область ускорителя K230: 1 – ионный источник, 2 – устройство изменения интенсивности пучка (электрический дефлектор), 3 – аксиальный коллиматор, 4 – фазовая щель, 5 – траектории ионов пучка [A20].

Устройство модуляции интенсивности пучка, расположенное в центральной зоне, представляет собой дефлектор с электрическим полем, отклоняющим частицы в аксиальном направлении, который может работать с частотой до 1 кГц. Расчеты трассировки проводились с использованием 100,000 модельных частиц и с учетом их потерь при столкновениях с поверхностями всех структурных элементов центральной зоны без каких-либо упрощений. Такая статистика позволяет получать максимально точные оценки характеристик пучка после прохождения центра.

Центральный плаг K230 имеет сложную форму с вырезом в виде креста, в одной из вершин которого располагается щель источника. Таким решением удалось добиться ускорения пучка в условиях присутствия магнитной аксиальной фокусировки, и величина амплитуд радиальных колебаний для частиц всего пучка не превышает в центре 3 мм (средняя величина 1 мм). С помощью введения дополнительной первой гармоники в центре с амплитудой 10 Гс, создаваемой при помощи штырей, можно уменьшить величины амплитуд радиальных колебаний до ~1.5 мм (средняя величина 0.6 мм).

Выводная система K230 (Рис. 8) состоит из одного электростатического дефлектора, расположенного в долине между секторами, с относительно малой величиной напряженности поля на нем (≤ 100 кВ/см) и пяти пассивных магнитных каналов.

Геометрическая структура секторов вблизи конечного радиуса подбиралась таким образом, чтобы величина спада магнитного поля в области, где проходит отклоненный пучок, не превышала

10-15 Т/м. В этом случае увеличивается длина траекторий ионов, движущихся в краевом поле, но достигается основная цель – малое локальное негативное действие магнитного поля на радиальный размер пучка. Установка дополнительных фокусирующих элементов (магнитных каналов) с практически реализуемыми величинами градиентов поля (12-20 Т/м) позволяет уменьшить амплитуду поперечных огибающих и получить выведенный пучок с малыми эмиттансами. Предложенная структура позволяет избежать необходимости во втором электростатическом дефлекторе, вместо которого используется пассивный септумный магнитный канал. Толщина его септума всего 1.2 мм. Также имеется набор корректирующих шимм, расположенных в области циркулирующего пучка. Толщина шиммирующих пластин доходит до десятых 0.25 мм.

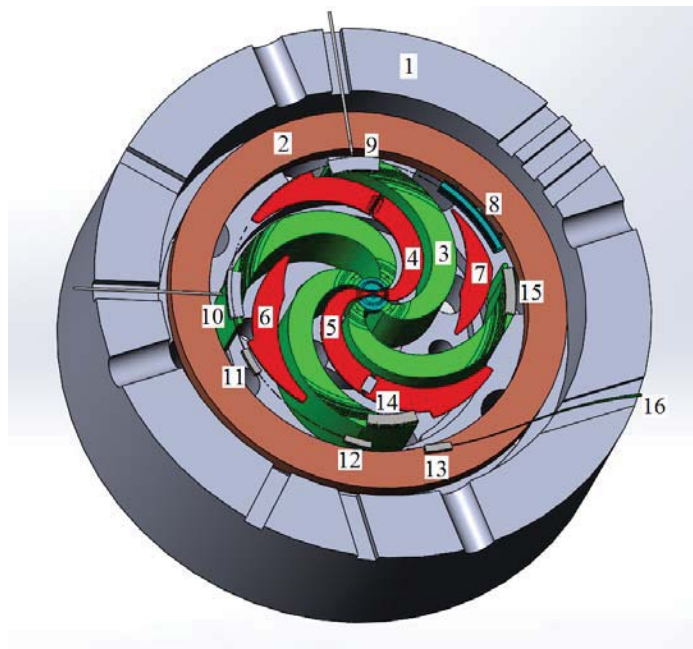


Рис. 8. Расположение элементов выводной системы циклотрона K230: 1 – ярмо магнита, 2 – сверхпроводящая обмотка, 3 – секторная шимма, 4 – первый дуант, 5 – второй дуант, 6 – третий дуант, 7 – четвертый дуант, 8 – электростатический дефлектор, 9 – первый магнитный канал, 10 – второй магнитный канал, 11 – третий магнитный канал, 12 – четвертый магнитный канал, 13 – пятый магнитный канал, 14 – компенсатор первого канала, 15 – компенсатор второго канала, 16 – огибающая выводимого пучка [A20].

Для осуществления прецессионного вывода пучка вводится первая гармоника магнитного поля с амплитудой 2-5 Гс. Эффективность вывода 14-градусного пучка равна ~73%. С начальным током пучка, вытягиваемым из источника, равным 40 мкА, превышает проектная интенсивность выведенного пучка 600 нА. Поперечные эмиттансы выведенного за пределы ярма пучка: горизонтальный – $4.3 \mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$, аксиальный – $0.9 \mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$. Энергетический разброс ± 350 кэВ. При этом поперечные размеры пучка $10 \text{ мм}\times 2 \text{ мм}$. Пучок выводится из циклотрона за девять оборотов при вкладе первых трех оборотов в интенсивность более 90%. Очевидный путь для

повышения эффективности вывода и уменьшения количества оборотов, за которые выводится пучок, – это уменьшение фазового размера пучка, прошедшего через набор фазовых щелей. Так в качестве дополнительных режимов работы рассматривается ускорение 10- и 8-градусного банча. Последний выводится с эффективностью $>90\%$ за один оборот.

В ходе работ были изучены эффекты влияния возможных рассогласований магнитной системы на характеристики пучка. Основное внимание уделено анализу эффектов различных сдвигов и вращений обмотки и секторной структуры. Все расчеты проводились с использованием трехмерных полей, где изучалось поведение пучка частиц в процессе ускорения и вывода. В результате сформулированы требования к допускам при изготовлении и позиционировании узлов циклотрона. Величины допусков разделены на две группы: приемлемые и критические. К первой группе относятся значения, изготовление и позиционирование узлов, в соответствии с которыми ведет к незначительному ухудшению интенсивности конечного пучка (не более 5-10%). Достижение рассогласований системы, обозначенных как критические, ведет к такому изменению движения пучка, которое находится на границе условий, приводящих к потере значительной части частиц (более 30%). В результате величины допусков составляют десятые доли миллиметров с самым жестким допуском на аксиальное смещение обмотки и секторов 0.1 мм. Допуск на вращение секторов и обмотки вокруг горизонтальной оси составляет 0.02 градуса. Критические значения рассогласований в 3-5 раз превышают значения допусков. В цикл расчетов было включено исследование асимметрии в магнитных свойствах стали различных частей установки, и произведен анализ влияния на пучок. В случае максимальной асимметрии, когда верхняя часть возвратного ярма обладает свойствами стали 1010, а нижняя – стали 1008 происходит кардинальное нарушение изохронности поля, приводящее к смещению фазы ВЧ частиц до критического значения (до 90 градусов). Происходит также аксиальное смещение пучка на 6 мм. В каждом случае сформулированы возможные пути компенсации опасных рассогласований, заключающиеся в использовании системы изохронизации поля, добавлении магнитных масс с внутренней и внешней стороны ярма, использовании магнитных штырей в секторах, а также модификации азимутального и аксиального профиля секторов. Расчеты велись с использованием измеренной кривой намагниченности стали.

В пятой главе приведены результаты работы по разработке концептуального проекта компактного циклотрона НИММ (Heavy Ion Medical Machine, IMP, Lanzhou, China) [6], предназначенного для использования в качестве инжектора в медицинский синхротронный

комплекс для углеродной терапии. Циклотрон производит пучок ионов углерода с энергией 7 МэВ/нукл. [7].

Работы по созданию проекта циклотрона начались в 2009 году в ИМР. Был подготовлен начальный проект установки, который базировался на анализе динамики пучка, сделанном с использованием упрощенных моделей и с учетом электромагнитных полей структурных элементов установки, в большинстве своем заданных аналитически. В 2010 году к работе по проработке концептуального проекта установки присоединились сотрудники НЭОНУ ЛЯП, в частности автор настоящей диссертационной работы [A22]. Основной целью было создание циклотрона, характеристики которого (интенсивность и размер пучка, вес циклотрона) значительно превышают параметры имеющегося циклотрона-инжектора SFC [8].

Магнитная структура циклотрона состоит из ярма броневоего типа и четырех радиальных секторов. В качестве ускоряющей системы используются два радиальных дуанта, расположенных в долинах между секторами, в качестве источника ионов – ЭЦР источник. Центральное магнитное поле 1.21 Тл. Вес циклотрона 70 тонн. Проектный ток выведенного пучка 10 мкА. Ускорение происходит на второй гармонике ВЧ с частотой 32 МГц.

Проведено тщательное моделирование аксиальной линии инжекции пучка, направленное на согласование размеров пучка с аксептансом центральной зоны ускорителя. В расчетах анализировалось влияние собственного поля пучка на распределение частиц в центре циклотрона и на величину необходимого напряжения на сетках банчера. В целях повышения эффективности банчера было предложено использование пилообразного напряжения ВЧ волны. Расчеты показали, что эффективность банчера, форма волны напряжения на сетках которого имеет пилообразную зависимость от времени, увеличивается до ~61 % по сравнению с ~41 % при использовании банчера с синусообразной формой волны напряжения. Под эффективностью банчера здесь понимается отношение количества ионов в диапазоне $\pm 10^\circ$ ВЧ к общему количеству ионов в 360-градусном пучке.

Центральная область ускорителя была исследована на предмет качественного формирования пучка, захватываемого в режим ускорения. Структура центра представлена на Рис. 9. Основная работа велась по оптимизации конструкции спирального инфлектора и его корпуса, предназначенного для экранирования от ускоряющего поля, а также формы ускоряющих дуантов в области первых оборотов частиц.

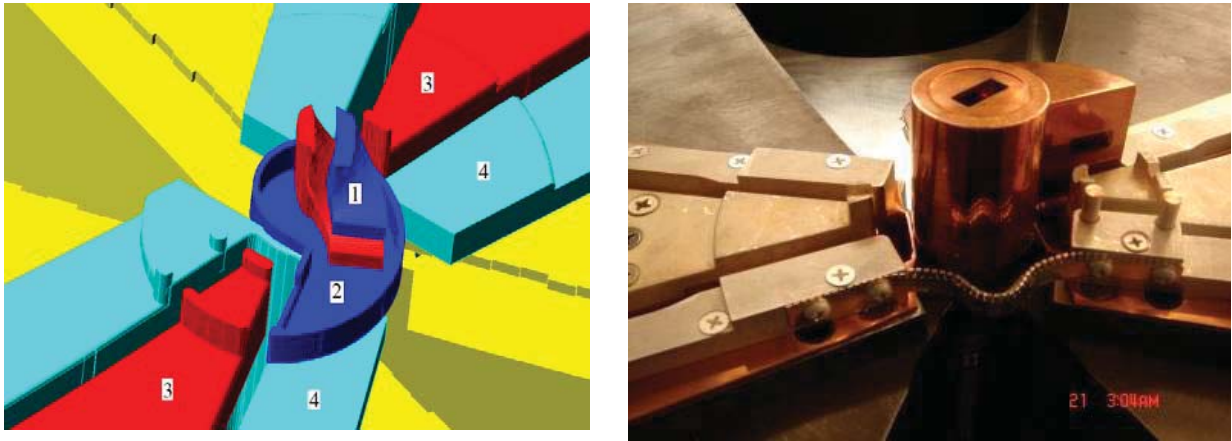


Рис. 9. Спроектированная (слева) и изготовленная (справа) центральная зона циклотрона НИИМ: 1 – спиральный инфлектор, 2 – часть корпуса инфлектора, 3 – ускоряющий дуант, 4 – противоулантная рамка [A21].

Формирование качественного пучка в центральной области циклотрона важно, в первую очередь, с точки зрения повышения эффективности вывода и уменьшения радиационных потерь на выводных элементах. Основным элементом, формирующим пучок в центре, является набор фазовых щелей, целесообразность использования которых в данной установке была изучена. В результате установки фазовой щели радиальный эмиттанс пучка уменьшился примерно в 1.6 раза, энергетический разброс ~ 1.8 раза и фазовый размер пучка ~ 1.2 раза. Эффективность трансмиссии пучка через центральную область с 52 уменьшилась до 48 %. Эффективность вывода пучка из циклотрона при этом увеличилась в 1.5 раза.

Расчет амплитуд радиальных бетатронных колебаний ионов, проведенный в режиме ускорения, предусматривающем симметричное напряжения на ускоряющих дуантах (45 кВ), показал, что величины амплитуд частиц пучка достигают 10 мм. Для выявления способа улучшения центрирования был проведен ряд расчетов, оптимизирующих амплитуды напряжения на ускоряющих дуантах, результатом которых явилось предложение нового режима ускорения с асимметричным напряжением на дуантах (45 кВ на первом и 43 кВ на втором). Такой режим позволяет уменьшить радиальные амплитуды в 3 раза.

Анализ частот бетатронных колебаний в первоначальном варианте магнитной системы обнаружил пересечение частицей нескольких опасных резонансов в процессе ускорения. Это явилось причиной концептуальной модификации магнита, в результате которой воздушный зазор между секторами был увеличен с 50 мм до 80 мм, и в последствии модифицировано ярмо.

В первоначальном проекте установки предполагалась система вывода пучка, состоящая из одной гармонической обмотки, электростатического дефлектора и поворотного магнита.

Существенным моментом было отсутствие какого-либо элемента фокусировки пучка в процессе вывода. Расчеты динамики пучка показали, что эффективность вывода с помощью такой системы составляет всего 26%, что является следствием неудовлетворительного радиального размера пучка на конечном радиусе. Спад основного магнитного поля (~ 20 Т/м) в области, находящейся непосредственно за электростатическим дефлектором, приводит к сильнейшей радиальной дефокусировке частиц. Пучок на выходе из циклотрона имеет размеры, несоизмеримо большие по сравнению с требуемыми величинами (радиальный и аксиальный эмиттансы пучка 240 и 320 $\mu\text{м}\cdot\text{мрад}$ соответственно). Более 50% ионов теряется в линии транспортировки пучка, расположенной непосредственно за выводным окном циклотрона. Поэтому оптимизация процесса вывода оказалась ключевым моментом с точки зрения повышения функциональности установки. Были внесены изменения в конструкцию электростатического дефлектора: уменьшение радиуса кривизны с 6000 до 4500 мм, удаление выступающих краев септума, увеличение зазора между септумом и потенциальным электродом с 8 до 10 мм. Установлен корректор градиента магнитного поля, расположенный непосредственно за электростатическим дефлектором, и спроектирован новый магнитный канал.

Все вышеописанные предложения привели к созданию системы, в которой достигаются требуемые характеристики выведенного пучка. Эффективность трансмиссии через центральную зону возросла в 2 раза. Эффективность вывода пучка из вакуумной камеры циклотрона и его проводки через линию транспортировки за выводным окном увеличилась с 13 до 37 %. Интенсивность выведенного пучка возросла более, чем в 6 раз по сравнению с первоначальным расчетным значением. Горизонтальный и аксиальный эмиттансы пучка на выводном окне составляют 30 и 25 $\mu\text{м}\cdot\text{мрад}$ соответственно. Ток пучка равен 13 мкА. Энергетический разброс соответствует требуемому значению и имеет величину порядка 1 %. График зависимости локальной эффективности трансмиссии для структурных единиц циклотрона приведен на Рис. 10, где начальный ток пучка из источника 100 мкА.

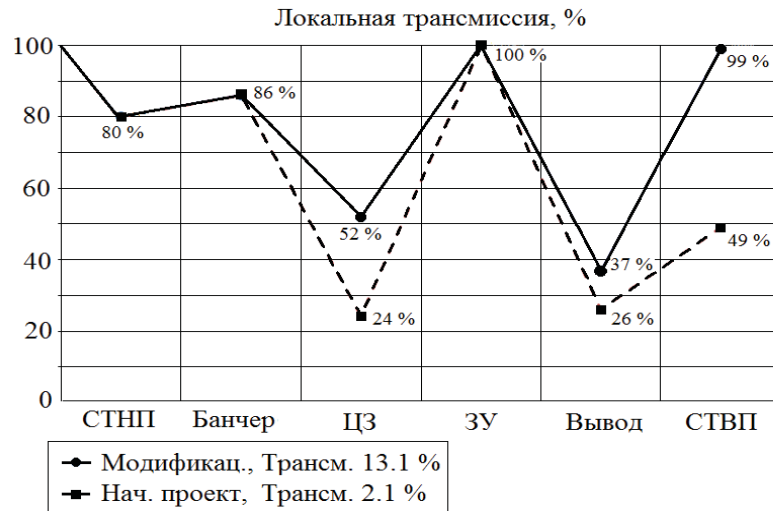


Рис. 10. Эффективность трансмиссии пучка через структурные единицы циклотрона: СТНП–система транспортировки низкоэнергетического пучка, ЦЗ–центральная зона, ЗУ–зона ускорения, Вывод – выводная система, СТВП–система транспортировки высокоэнергетического пучка [A21].

Проведенный прецизионный анализ движения частиц в установке позволил подготовить концептуальный проект циклотрона, соответствующий требованиям, который был закончен в 2011 году. В течение двух лет велась работа над техническим проектом параллельно с процессом изготовления деталей будущего ускорителя. Циклотрон введен в эксплуатацию и испытан в 2014 году (Рис. 11) [9, 10]. Измерения основного магнитного поля показали соответствие проведенным расчетам с наибольшим отклонением измеренного поля на границах раздела долины и холма, достигающей 150 Гс. Первый пучок был получен в августе 2014 года и выведен на проектную мощность в течение месяца. В настоящий момент циклотрон используется по назначению в составе ускорительного комплекса НИММ. Ток выведенного пучка составляет 12 мкА. Измерения параметров пучка, вытягиваемого из источника [11], показали поперечные эмиттансы 75 п·мм·мрад и ток 100 мкА. Эти значения полностью соответствуют расчетным данным. Полноценная диагностика пучка в процессе ускорения не производилась, и данные об интенсивностях пучка на первых оборотах и вблизи конечного радиуса отсутствуют. По имеющимся данным возможно вычислить лишь суммарную эффективность трансмиссии пучка от источника ионов до выводного окна, которая равна 12 %, что хорошо согласуется с расчетной величиной 13%.

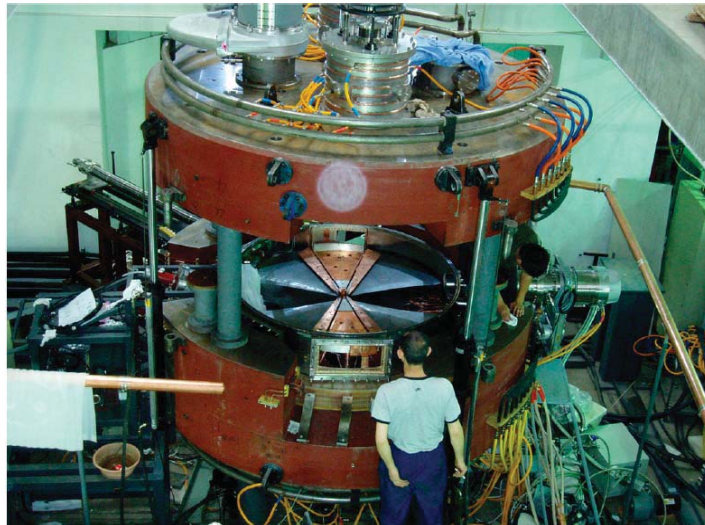


Рис. 11. Циклотрон НИММ в процессе ввода в эксплуатацию.

В институте современной физики уже имеется комплекс циклотрон-инжекторов для синхротронного комплекса NIRFiL, состоящий из компактного циклотрона SFC и секторного SSC. Первый может ускорять ионы углерода $^{12}\text{C}^{4+}$ до энергии 6 МэВ/нуклон. Интенсивность выведенного пучка не превышает 1 мкА при поперечных эмиттансах 30 п.мм·мрад. Созданный в рамках данной работы компактный циклотрон НИММ предоставляет возможность получения пучков углерода с интенсивностью на порядок большей и с меньшей величиной эмиттансов. При этом вес циклотрона стал меньше в 3.5 раза (70 т против 250).

В шестой главе кратко описаны основные результаты по модернизации и проектированию ускорительных установок для медицинских применений.

Разработана новая центральная зона циклотрона RIKEN K-70 AVF (Япония) [12, A22], предназначенная для повышения энергии выведенного пучка за счет перехода в режим работы на первой кратности ускоряющего поля. Циклотрон до начала модернизации центра работал на второй кратности ВЧ поля. Рабочая частота ускоряющей системы ускорителя может варьироваться от 12 до 24 МГц. Максимально возможной конечной энергией протонов при ускорении на второй гармонике ВЧ является величина 14 МэВ. Значимым для проводимых на ускорителе работ является режим ускорения протонов до энергии 30 МэВ. Существующая структура центральной зоны не предназначена для ускорения в таком режиме, и потребовалось создание нового центра. Новая конфигурация центра спроектирована и установлена в ускоритель (Рис. 12). Испытания с пучком показали, что основная цель – проводка пучка протонов через центр при работе на первой кратности ВЧ – достигнута. В ходе тестовых измерений эффективность трансмиссии пучка от

источника ионов до выводного окна оказалась меньше расчетной (5% вместо 20), учитывая то, что не удалось обеспечить расчетную величину ускоряющего напряжения (40 кВ вместо 50), и не велась настройка режима вывода пучка.

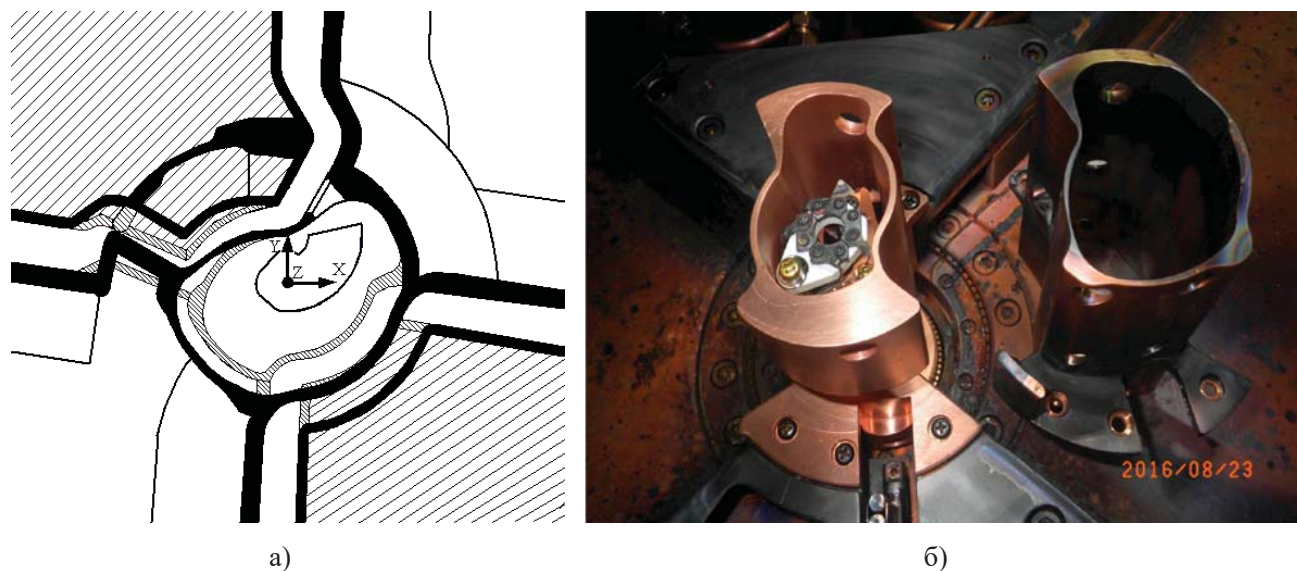


Рис. 12. Существующая (показана черным цветом) и новая (показана штриховкой) структура центральной области RIKEN K-70 AVF циклотрона в процессе расчета (а) и установки в циклотрон (б) [A22].

Новый центр удовлетворяет требованию, состоящему в том, что эффективность трансмиссии пучков для режимов работы на второй кратности ВЧ поля должна быть не меньше, чем в предыдущей структуре. Для решения этой задачи был проведен анализ динамики пучка для значительной части существующих режимов ускорения.

В ходе выполнения расчетов разработан новый метод уменьшения энергетического разброса в ускоренном пучке, основанный на линеаризации формы ускоряющей волны в диапазоне фаз, который занимает пучок при пересечении ускоряющих зазоров, что приводит к созданию условий ускорения пучка, при которых происходит выравнивание прироста энергий частицами за оборот, имеющими различные фазы, и в итоге энергетический разброс пучка на входе в выводную систему уменьшается. Расчетным путем показано 10-кратное уменьшение конечного энергетического разброса.

Автором получен патент на разработанный метод [A23]. Действие метода экспериментально подтверждено в сеансе работы циклотрона RIKEN K-70 AVF в режиме ускорения протонов до 20 МэВ. Показано, что для формирования требуемой формы результирующей ускоряющей волны могут быть использованы системы введения третьей гармоники ВЧ поля, которые часто применяются в режимах создания «Flat Top» волны.

Подготовлен инструментарий для прецизионного анализа динамики частиц в циклотроне NIRS-930 [13, A24 – A28], который включает в себя наборы программ трассировки пучка и полную компьютерную модель установки. Достоверность используемых моделей подтверждена сравнением с измеренными данными на токовых пробниках, имеющихся в установке (Таблица 1). Отличие расчетных данных от измеренных не превышает 7%. Подготовленный инструментарий используется для оптимизации параметров работы ускорителя. Расчетно показаны способы повышения интенсивности конечного пучка за счет модификации выводной системы.

Таблица 1. Эффективность трансмиссии пучка через узлы циклотрона.

Узел	Расчет		Измерения
	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

Разработана ускорительная установка для адронной терапии, базирующаяся на использовании каскада сверхпроводящих циклотронов [A29-A34]. Проведен полный трехмерный анализ динамики пучка в компактном циклотроне-инжекторе K280 и основном секторном циклотроне K1600. Разработаны трехмерные чертежи большинства основных систем. Показано, что медицинский центр, использующий данный комплекс и сверхпроводящую систему гантри, может иметь размеры $40 \times 45 \text{ м}^2$. Суммарный вес двух циклотронов не превышает 600 т. Использование нескольких ускорителей позволяет осуществлять как ядерную медицину пучками протонов с энергией 60-70 МэВ/нуклон, так и радиационную терапию с применением протонов 60-70 МэВ и ионов углерода 70-400 МэВ/нуклон. Система спроектирована таким образом, что интенсивность пучка протонов, производимого инжектором, может достигать 800 мкА, а конечная энергия может варьироваться в диапазоне 60-70 МэВ. Таких параметров пучка достаточно для эффективного производства медицинских изотопов и осуществления лечения меланомы глаза и рака кожи. Ионы углерода и $^2\text{H}^+$, выводимые из циклотрона K280 с энергией 70 МэВ/нуклон, также могут быть использованы для производства радиоизотопов. Пучки ионов углерода с энергией 400 МэВ/нуклон и интенсивностью до 200 нА предназначены для проведения углеродной терапии. Требуемые параметры пучков достигаются за счет использования эффективных систем инжекции и вывода

пучка, в которых обеспечивается коэффициент проводки ионов не менее 70%. Так как основной циклотрон является секторным, то это значительно упрощает процесс изготовления и тестирования его частей.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

- разработан набор методов и алгоритмов прецизионного моделирования циклотронных установок; внедрен новый способ исследования динамики пучка, основанный на визуальном анализе локализации макро-частиц в трехмерной структуре ускорителя; создано программное обеспечение, дающее возможность проводить высокоточные расчеты для каждого из узлов современных циклотронов; отличие расчетных данных от измеренных не превышает 10%; данные разработки оказались востребованными и доказали свою эффективность при создании и модернизации ускорительных установок и, помимо автора, успешно используются учеными из других мировых научных центров;
- с помощью созданных комплексов программ можно проводить расчет сил пространственного заряда пучка с повышенной точностью, используя статистику в 100 000 и более модельных частиц; учет асимметрии трехмерных полей относительно медианной плоскости позволяет исследовать влияние различных рассогласований системы на пучок и проводить прецизионные расчеты для определения допусков на изготовление систем ускорителя и анализировать поведение пучка в измеренных полях при наладке установки;
- создан и запущен в серийное производство уникальный сверхпроводящий циклотрон для производства медицинских изотопов ION-12SC, имеющий наименьшие размеры и вес среди всех циклотронов данного класса; произведен расчет допусков и сформулированы требования на изготовление и позиционирование узлов циклотрона; проведена обработка измеренных магнитных полей; предложены и реализованы методы коррекции системы, приведшие к достижению проектных параметров пучка (эффективности ускорения более 90%, току пучка на мишени более 10 мкА);
- создан и введен в эксплуатацию компактный циклотрон-инжектор НИММ, производящий пучка углерода с энергией 7 МэВ/нуклон и интенсивностью 13 мкА и предназначенный для работы в ускорительной установке для адронной терапии; циклотрон работает в медицинском центре (Ланьчжоу, Китай);
- спроектирована новая конфигурация центра циклотрона RIKEN K-70 AVF; центральная зона изготовлена и установлена в ускоритель; испытания с пучком показали, что основная цель –

осуществление режима работы на первой кратности ВЧ поля и повышение энергии выведенного протонного пучка с 14 до 30 МэВ – достигнута;

- подготовлен концептуальный проект циклотрона для протонной терапии К230, производящего пучки протонов с энергией 230 МэВ и интенсивностью до 600 нА; вес установки менее 60 т; циклотрон находится в стадии изготовления;
- разработан проект ускорительной установки для адронной терапии, состоящей из каскада сверхпроводящих циклотронов; комплекс является многофункциональным и позволяет как производить медицинские изотопы с применением пучков протонов и $^2\text{H}^+$ ионов с энергией 70 МэВ/нуклон, так и проводить радиационную терапию ионами углерода 70-400 МэВ/нуклон; принцип стадийности упрощает процесс изготовления и тестирования узлов ускорителей, а применение технологии сверхпроводимости уменьшает общий вес установки до 700 т.

СПИСОК РАБОТ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- [A1] *V.L. Smirnov*, “Computer codes for beam dynamics analysis of cyclotronlike accelerators”, *Physical Review Accelerators and Beams*, 20, 124801 (2017).
- [A2] *V. L. Smirnov* and *S.B. Vorozhtsov*, “Modern compact accelerators of cyclotron type for medical applications”, *Physics of Particles and Nuclei*, vol. 47, no. 5, pp. 863–883, 2016.
- [A3] *В.Л. Смирнов*, “Компьютерное моделирование компактного изохронного циклотрона”, *ЭЧАЯ*, т. 46, № 6, с. 940-955, 2015.
- [A4] *В.Л. Смирнов*, “Проектирование центральной зоны компактного циклотрона”, *Письма в ЭЧАЯ*, т. 16, № 1 (220), с. 40-55, 2019.
- [A5] *В.Л. Смирнов*, “The cyclotron and its modeling”, *Physics of Particle and Nuclei*, v. 52, № 5, p. 913-996, 2021.
- [A6] *V.L. Smirnov* and *S.B. Vorozhtsov*, “SNOP – Beam Dynamics Analysis Code for Compact Cyclotrons”, *Proc. of the XXIII Russian Accelerator Conference, RuPAC’2012*, St. Petersburg, Russia, pp. 325-327, 2012.
- [A7] *В.Л. Смирнов*, “Процесс моделирования циклотрона в программе SNOP”, *Препринт ОИЯИ Р9-2015-103*, 2015.
- [A8] *V.L. Smirnov*, *N.S. Azaryan*, and *S.B. Vorozhtsov*, “Preliminary parameter assessments of a spiral FFAG accelerator for proton therapy”, *Communication of the JINR*, E9-2013-99, Dubna 2013.
- [A9] *N. V. M. Trung*, *V. L. Smirnov* and *L. H. Khiem*, “Parameter assessment of beam transport line for nuclear physics research”, *Communications in Physics*, Vol. 29, No. 3SI (2019), pp. 385-392, 2019.
- [A10] *L. T. Sun*, *D. Leitner*, *G. Machicoane*, *E. Pozdeyev*, *V. Smirnov*, *S. B. Vorozhtsov*, *D. Winklehner*, and *Q. Zhao*, “Low energy beam transport for facility for rare isotope beams driver linear particle accelerator”, *Review of Scientific Instruments*, v. 83, 02B705, 2012.
- [A11] *E. Pozdeyev*, ... , *V.L. Smirnov* et al., “FRIB Front End Design Status”, *Proc. of LINAC12*, Tel Aviv, Israel, 9-14 September 2012.
- [A12] *V. Smirnov*, *S. Vorozhtsov*, *J. Vincent*, “Design study of an ultra-compact superconducting cyclotron for isotope production”, *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A* 763(2014) pp. 6–12.

- [A13] J. Vincent, G. Blosser, G. Horner, K. Stevens, N. Usher, X. Wu, S. Vorozhtsov, *V. Smirnov*, “The Ionetix ION-12SC compact superconducting cyclotron for production of medical isotopes”, Proceedings of Cyclotrons’16, Zurich, Switzerland, 2016.
- [A14] *V. L. Smirnov*, et. al, “Experimental validation of the field and beam dynamics simulations for a superconducting cyclotron”, Physics of Particles and Nuclei Letters, V. 17, № 2, 2020.
- [A15] *V. L. Smirnov*, S. B. Vorozhtsov, and J. Vincent, “H⁻ superconducting cyclotron for PET isotope production”, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 6, 2014, pp. 774–787.
- [A16] *V. L. Smirnov*, S. B. Vorozhtsov, and J. Vincent, “Innovative 20-MeV superconducting cyclotron for medical applications”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 16, No. 6, 2019.
- [A17] X. Wang, *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, “Superconducting cyclotron for Flash therapy”, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 986, 2020.
- [A18] С.Б. Ворожцов, *В.Л. Смирнов*, “Способ аксиальной инжекции пучка в компактный циклотрон со сверхвысоким магнитным полем”, Патент на изобретение, № RU2554111, Бюл. № 18, 27.06.2015.
- [A19] *V.L. Smirnov* and S.B. Vorozhtsov, “Axial injection to a compact cyclotron with high magnetic field”, Proc. of the XXIV Russian particle accelerators conference RUPAC 2014, Obninsk, Russia.
- [A20] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, Z. Neville, G. Blosser, X. Wu, and J. Vincent, “The R&D of a K230 superconducting cyclotron for proton therapy”, Proc. of ECPM’2018, Dubna, Russia.
- [A21] 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.
- [A22] S.B. Vorozhtsov, *V.L. Smirnov*, A. Goto, “Modification of the central region of RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the first acceleration harmonics (h=1)”, RIKEN Accelerator Progress Report, v. 44, 2011, pp. 105-106.
- [A23] С.Б. Ворожцов, *В.Л. Смирнов*, “Способ уменьшения энергетического разброса пучка частиц в циклотроне”, Патент на изобретение, № RU2455801 от 01.02.2011.
- [A24] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, A. Goto, S. Hojo, T. Honma, K. Katagiri, “Quantitative Simulation of NIRS Cyclotron”, Proc. IPAC’12, New Orleans, USA, 2012.
- [A25] M. Nakao, ..., *V.L. Smirnov*, et al, “Beam simulation for improved operation of cyclotron NIRS-930”, Proc. of IPAC’14, Dresden, Germany, 2014.
- [A26] M. Nakao, ..., *V.L. Smirnov*, et al., “The multi particle simulation for the cyclotron NIRS-930”, Proceedings of HIAT2015, Yokohama, Japan.
- [A27] M. Nakao, ..., *V.L. Smirnov*, et al., “Beam simulation for cyclotron NIRS-930, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.
- [A28] M. Nakao, ..., *V.L. Smirnov*, et al., “Approach to increase beam intensity extracted from a cyclotron”, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 2016.
- [A29] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, “A coupled cyclotron solution for carbon ions acceleration”, Proceedings of Cyclotrons’16, Zurich, Switzerland, 2016.
- [A30] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, “Feasibility study of a cyclotron complex for hadron therapy”, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A, 887 114–121, 2018.
- [A31] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, “A cyclotron complex for acceleration of carbon ions”, Proc. of the XXIII Russian Accelerator Conference, RuPAC’2016, St. Petersburg, Russia, 2016, pp. 467-470.
- [A32] *В.Л. Смирнов*, С.Б. Ворожцов, “Магнитная структура сверхпроводящего секторного циклотрона для адронной терапии”, Письма в ЭЧАЯ, Vol 14, No 4, 2017.
- [A33] *V. Smirnov*, S. Vorozhtsov, F. Taft, T. Matlocha, “Superconducting 70 AMeV cyclotron-injector for a hadron therapy complex”, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A, v. 934, 2019, pp. 1-9.
- [A34] F. Taft, S.B. Vorozhtsov, *V.L. Smirnov*, “Beam transport system for a hadron therapy complex”, Proc. of ECPM’2018, Dubna, Russia, 2018.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

-
- [1] А.А. Самарский. “Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент”. Москва “Наука”, 1988.
- [2] 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.
- [3] T. Antaya, “Compact, Cold, Superconducting Isochronous Cyclotron”, US8558485 B2, Oct. 15, 2013.
- [4] M.M. Gordon, “The electric gap-crossing resonance in a three-sector cyclotron”, Nucl. Instr. and Meth. 18, 19 (1962) pp. 268-280.
- [5] Hongjuan Yao, R. Baartman, Y.-N. Rao, Tianjue Zhang, Yuzheng Lin, “Gap-crossing resonance in cyciae-100 cyclotron”: in Proc. of CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy 2007.
- [6] J.Q. Zhang, M.T. Song, B.W. Wie, "Design of Synchrotron for Hadron Therapy". High Energy Physics and Nuclear Physics. Vol. 31, 12. Dec., 2007, pp.122-1125.
- [7] B. Wang et al., “Design and construction progress of a 7 MeV/u cyclotron”: in Proc. of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China, 2010, pp. 317-320.
- [8] Wei Baowen, “Results from Lanzhou K450 heavy ion cyclotron”, Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference, Accelerator Science and Technology.
- [9] <http://www.lanzhoukt.com/en/News/comm/2015-06-18/174.html>
- [10] W. Yang, S. Han, J. Yang, C. Pei, Q. Yao, X. Zhang, “Status of the magnetic measurement for the Heavy-Ion Medical Machine (HIMM)”: in Proc. of the International magnetic measurement workshop, Hsinchu, Taiwan, 2015.
- [11] Y. Cao, et. al., “The Latest results of LAPECR3 ion source at IMP”, in Proc. of ECRIS’14, Nizhny Novgorod, Russia, 2014.
- [12] J. Ohnishi, A. Goto, M. Kase, Y. Kotaka, “Study on energy upgrade and beam transmission efficiencies for RIKEN K-70 AVF cyclotron”: in Proc. of CYCLOTRONS 2016, Zurich, Switzerland, 2016, pp. 332-335.
- [13] A. Sugiura et al., "Status Report of NIRS Cyclotron Facility (NIRS-930, HM-18)": In Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan.