



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-2013-76

На правах рукописи

УДК 621.384.633

**КОСТРОМИН**  
Сергей Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКОВ ДЛЯ АДРОННОЙ ТЕРАПИИ  
В ЦИКЛОТРОНАХ С ПРОФИЛИРОВАННЫМ  
ПО ВЕРТИКАЛИ МЕЖПОЛЮСНЫМ ЗАЗОРОМ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2013

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

Официальные оппоненты:

Серов Александр Васильевич, доктор физико-математических наук,  
ФИАН, Лаборатория ускорительных устройств,  
главный научный сотрудник

Коваленко Александр Дмитриевич доктор физико-математических наук,  
ОИЯИ, Лаборатория физики высоких энергий,  
заместитель директора Лаборатории

Зенкевич Павел Романович доктор физико-математических наук,  
ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ»,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: НИЦ «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г. в  
«\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при  
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных  
исследований.

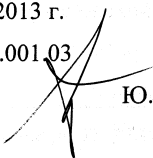
Адрес: 141980, г. Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 720.001.03

доктор физико-математических наук, профессор

  
Ю.А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

В последние десятилетия адронная терапия пучками протонов и ионов углерода бурно развивается во многих странах мира. Она обладает рядом преимуществ перед лучевой терапией с использованием гамма-радиации и электронов. В настоящий момент протоны наиболее часто по сравнению с ионами углерода используются для лечения онкологических заболеваний. Однако пучки углерода обладают дополнительным преимуществом по сравнению с протонными пучками благодаря более высокому радиобиологическому эффекту воздействия на клетки, они особенно эффективны для радиорезистивных типов опухолей. Поэтому в последние годы в мире наблюдается повышенный интерес к терапии ионами углерода.

Применение метода адронной терапии основывается на нескольких основных технологиях: диагностике, планировании облучения, получении пучка частиц нужной энергии и интенсивности, его доставке к опухоли, контроле дозы и др.

Технологии адронной терапии последнего поколения ориентированы на обеспечение максимального соответствия дозы облучения пространственной форме мишени. При этом максимум формируемого дозного распределения с точностью до одного миллиметра соответствует объему опухоли. Уровень доставленной дозы резко спадает за границами мишени, в результате чего радиационная нагрузка на здоровые ткани существенно снижается. Это позволяет проводить облучение ранее недоступных для лучевой терапии локализаций или повысить эффективность облучений.

В последние годы успешно внедрены новые технологии адронной терапии, связанные с синхронизацией облучения и движения органов, а также с активным сканированием мишеней модулированным по интенсивности пучком.

В первом случае облучение реализуется в цикле дыхания в течение короткого времени, когда скорость перемещения облучаемого органа минимальна. Суммарное время облучения за дыхательный цикл в этом случае занимает  $\sim 1$ с при длительности цикла 2-4с. Чтобы обеспечить стандартную дозу облучения при неизменной длительности одного сеанса, ток пучка из ускорителя должен вырасти в 2-4 раза.

При активном сканировании мишени модулированным по интенсивности пучком его интенсивность многократно изменяется от нулевого до максимального уровня. В результате среднее значение тока примерно в два раза меньше максимального. Поэтому для подведения к опухоли стандартной дозы при неизменной длительности сеанса (1-3мин, как и при непрерывном пассивном облучении) необходимо иметь возможность двукратного увеличения тока из ускорителя.

Одновременная реализация активного сканирования с модулированным по интенсивности пучком и синхронизации облучения с движением органов требует 5-8 кратного увеличения тока пучка по сравнению с технологией пассивного облучения.

Одна из тенденций развития современных медицинских ускорителей для адронной терапии ориентирована на увеличение максимального тока выведенного пучка. В специализированном медицинском циклотроне C235 фирмы IBA (Ion Beam Applications), который на данный момент установлен в 11-ти работающих и планируется использоваться в еще в 11-ти строящихся центрах протонной терапии по всему миру, ток протонов составляет 300 нА, что соответствует интенсивности  $\sim 2 \times 10^{12}$  протонов в

секунду. Такие параметры обеспечивают реализацию активного сканирования с модулированным по интенсивности пучком и синхронизации облучения с движением органов при дозе облучения 1-3Гр/мин. Однако, в случае необходимости формирования более высокой дозы требуется увеличение тока из ускорителя. Медицинский циклотрон фирмы Varian (энергия выведенного пучка 250МэВ, ток - 800нА) обеспечивает дозу 1-5Гр/мин при реализации современных технологий протонной терапии.

Ускоритель частиц – самый сложный, технологичный, наукоемкий элемент, входящий в комплекс оборудования центра адронной терапии. Он выдает пучок требуемой энергии и интенсивности. От эффективной работы ускорителя зависит успешная работа всего комплекса. К его параметрам предъявляются особые требования по надежности и стабильности функционирования.

Надежное и эффективное функционирование используемого ускорителя закладывается разработчиком при полном и всестороннем анализе динамики пучка. Его создание требует новых решений в физике и технике, разработки новых ускорительных технологий, применения различных математических методов для моделирования ускорителей.

Современные циклотроны, применяемые в адронной терапии, должны потреблять минимум электроэнергии, быть надежными и стабильными в работе, простыми в эксплуатации и сервисном обслуживании, иметь незначительную активацию внутренних систем в процессе работы.

Использование меняющегося с радиусом вертикального профиля магнитной системы циклотрона позволяет обеспечить изохронный рост магнитного поля и подвести циркулирующий пучок на расстояние в несколько миллиметров от края полюса. Это дает возможность эффективно

вывести пучок при помощи электростатического дефлектора и реализовать предельно простую схему транспортировки пучка за пределы ускорителя. Однако при вертикальном зазоре в несколько миллиметров циклотрон становится чувствительным с точки зрения движения пучка к возмущениям магнитного поля в средней плоскости, что накладывает жесткие допуски на точность изготовления магнитной системы.

В рамках Федеральной целевой программы «Создание высокотехнологичных центров медицинской радиологии» в России планируется создание 3-х центров в Дмитровграде, Обнинске и Томске. Объединенный институт ядерных исследований, являясь одним из ведущих центров России по созданию и использованию циклотронов, принимает активное участие в этой программе. Создание эффективных циклотронов для российских центров адронной терапии является актуальной задачей для ускорительщиков ОИЯИ.

Для первого госпитального центра протонной терапии в г. Дмитровграде ОИЯИ совместно с бельгийской фирмой IBA осуществил разработку медицинского протонного циклотрона C235-V3. В 2011-2012 г.г. в Дубне проведена сборка ускорителя, формирование магнитного поля и испытания с выведенным пучком, после чего он отправлен в Дмитровград. Основные усилия при создании и запуске циклотрона C235-V3 направлены на двукратный рост интенсивности выведенного пучка по сравнению с серийным циклотроном C235, для того чтобы обеспечить реализацию современных технологий протонной терапии, связанных с синхронизацией облучения и движения органов, а также с применением модулированных по интенсивности пучков.

### **Цели диссертационной работы:**

Основными задачами диссертационной работы являлись:

- разработка и внедрение изохронных циклотронов, удовлетворяющих новым технологиям адронной терапии;
- всесторонний анализ динамики пучка в протонном медицинском циклотроне С235 для получения научных данных по улучшению его эффективности;
- формирование магнитного поля, сборка и наладка циклотрона С235-V3 для первого в России госпитального центра протонной терапии в Дмитровграде;
- разработка концепции вывода пучков из сверхпроводящего изохронного циклотрона С400 для адронной терапии с разным отношением заряда к массе частиц.

#### **Главные направления работ:**

1. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики пучка в изохронном циклотроне С235 фирмы ИВА для протонной терапии, включающее в себя выявление опасных резонансов, анализ влияния эффектов медианной плоскости на движение пучка, а также расчет потерь пучка при выводе.
2. Подготовка научных данных по структуре совместного ОИЯИ-ИВА циклотрона С235-V3 с характеристиками, превышающими показатели серийного медицинского циклотрона С235 и позволяющими использовать его для реализации технологий адронной терапии, связанных с синхронизацией облучения и движения органов, а также с активным сканированием опухолей модулированным по интенсивности пучком.
3. Моделирование динамики пучка в циклотроне С235-V3, оптимизация центральной области магнитной системы, формирование требуемого магнитного поля с новым ВЧ-резонатором и оптимизация системы вывода ускорителя.

4. Разработка и внедрение новых технологий по формированию магнитного поля циклотрона С235-V3.
5. Создание в ОИЯИ специализированного центра для сборки и испытаний ускорительной медицинской техники. Проведение пучковых испытаний циклотрона С235-V3, предназначенного для первого в России госпитального центра протонной терапии в Димитровграде. Формирование в ускорителе стабильного протонного пучка с эффективностью ускорения и вывода в два раза выше, чем в циклотроне С235.
6. Разработка концепции вывода двух пучков из сверхпроводящего изохронного циклотрона С400 для адронной терапии с разным отношением заряда к массе частиц, строящегося в настоящее время в рамках проекта «Arcade» в Ganil (Франция).

#### **Личный вклад автора**

Участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им лично проведены теоретические и экспериментальные исследования динамики пучка в циклотроне С235, по результатам которых совместно ОИЯИ и ИВА создан компактный изохронный циклотрон С235-V3 для протонной терапии. При определяющем участии автора разработаны и внедрены новые технологии по формированию магнитного поля этого ускорителя, а также проведена его сборка и пучковые испытания в ОИЯИ. По эффективности ускорения и вывода пучка циклотрон С235-V3 в два раза превосходит циклотрон С235. При участии диссертанта разработан физический проект сверхпроводящего циклотрона С400, который может производить пучки углерода и протонов для адронной терапии. Ему принадлежит разработка концепции вывода



двух пучков из циклотрона С400 с разным отношением заряда к массе частиц.

### **Научная новизна и практическая ценность работы**

1. Проведен всесторонний анализ динамики пучка в специализированном медицинском циклотроне С235 для протонной терапии, на основании которого сделан вывод, имеющий принципиальное значение для настройки ускорителя: основной причиной потерь частиц при ускорении является значительное влияние эффектов медианной плоскости на вертикальное когерентное движение пучка. Представлены научные данные по структуре совместного ОИЯИ-ИВА циклотрона С235-V3, характеристики эффективности ускорения и вывода которого превосходят показатели специализированного ускорителя С235 фирмы ИВА.

2. Для циклотронов С235 и С235-V3 создана эффективная система вывода пучка на базе электростатического дефлектора с улучшенной конфигурацией электродов. Экспериментально достигнутый коэффициент вывода увеличен с 50% до 75%. Эта система установлена и используется более чем на 10-ти ускорителях.

3. В ОИЯИ создан специализированный центр для сборки и испытаний ускорительной медицинской техники, включая испытания с циркулирующим и выведенным пучком. В нем проведена сборка, формирование магнитного поля и пучковые испытания циклотрона С235-V3 для первого в России центра протонной терапии в Димитровграде.

4. В ходе работ по формированию магнитного поля на циклотроне С235-V3 в Дубне впервые использован ряд новых технологий:

- разработана и изготовлена компактная платформа для обработки боковой поверхности полюсных накладок ускорителя;

- осуществлен контроль обработки профиля боковых поверхностей полюсных накладок при помощи измерений на 3-х мерном приборе «Eclipse» фирмы Carl Zeiss с точностью несколько микрон;
  - разработан и создан дипольный калибровочный магнит с полем до 2.9Тл, соответствующим максимальному полю в циклотроне С235-V3;
  - использованы азимутальные проточки на съемных элементах магнитной системы для шиммирования узких (несколько сантиметров) по радиусу возмущений магнитного поля с амплитудой до  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл;
  - разработан прототип системы измерения средней радиальной компоненты магнитного поля, проведены тестовые измерения, указаны допуски на точность изготовления элементов системы.
5. Проведены пучковые испытания ускорителя С235-V3, в ходе которых оптимизирована центральная область магнитной системы. Это позволило в два раза уменьшить вертикальный профиль ускоряемого пучка и сформировать его без использования диафрагм на начальных оборотах. При этом впервые для данного типа циклотрона достигнута эффективность ускорения пучка от радиуса  $\sim 300$ мм до конечного радиуса 72%, эффективность вывода составляет 62%.
6. Циклотрон С235-V3 сертифицирован для клинического использования в центрах протонной терапии в России и будет установлен в первом таком центре в Димитровграде. Характеристики ускорителя открывают возможность использовать его для реализации современных технологий протонной терапии дающих наилучшие результаты.
7. Для циклотронов со значительным (более  $40^\circ$ ) углом спиральности секторов при высокой относительной вариации магнитного поля  $\varepsilon \sim 0.3 \div 0.5$ , впервые создана методика расчета изохронного поля, которая дает необходимую для соблюдения изохронизма зависимость среднего магнитного поля от радиуса.

8. Впервые создана методика расчета ускорения и заброса пучка в выводную систему в циклотронах с учетом действия магнитного поля от ВЧ-системы. При значительном росте величины ускоряющего напряжения с радиусом орбиты эффект приводит к 30÷50% увеличению эмиттанса и энергетического разброса пучка на входе в выводной канал, что требует учета при создании эффективных систем вывода.

9. Разработана структура выводной системы сверхпроводящего циклотрона С400. Она позволяет выводить из ускорителя ионы углерода с энергией 400 МэВ/нуклон при помощи электростатического дефлектора и протоны с энергией ~270 МэВ при помощи обдирочной фольги. Система обеспечивает проводку пучков разными трактами внутри циклотрона с их последующим сведением и транспортировкой в одном канале.

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

1. Создан компактный изохронный циклотрон для протонной терапии. По своим характеристикам ускоритель является одним из двух лучших в мире медицинских циклотронов. Он вдвое превосходит серийные циклотроны ИВА по интенсивности выведенного пучка. Это открывает реализацию с его помощью новых методов и технологий протонной терапии, связанных с синхронизацией облучения и движения органов, а также с активным сканированием модулированным по интенсивности пучком. Циклотрон С235-V3 сертифицирован для клинического использования в госпитальных центрах протонной терапии в России.

1.1 Структура магнитного поля сформирована с точностью  $(2-3) \cdot 10^{-4}$  Тл от изохронного поля циклотрона и обеспечивает эффективное ускорение пучка.

1.2 Результаты пучковых испытаний ускорителя в ОИЯИ: эффективность ускорения -72%, эффективность вывода - 62%.

2. Конфигурация созданного электростатического дефлектора новой выводной системы циклотронов С235 и С235-V3, позволившего увеличить эффективность вывода пучка с 50% до 75%.

3. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования динамики ускорения и вывода пучка в специализированном медицинском циклотроне С235 фирмы ИВА. Установлен принципиальный факт, что основной причиной потерь пучка при ускорении является наличие радиальной компоненты магнитного поля с уровнем  $(1-3) \cdot 10^{-4}$  Тл в средней плоскости ускорителя. Потери происходят на элементах магнитной системы в области вывода. Показано, что для улучшения эффективности ускорения пучка необходимо увеличить вертикальную фокусировку на конечных радиусах, повышая значение частоты вертикальных бетатронных колебаний с 0.25 до 0.45.

4. Методики расчетов изохронного поля для циклотронов со значительным (более  $40^\circ$ ) углом спиральности секторов при высокой относительной вариации магнитного поля  $\varepsilon \sim 0.3 \div 0.5$ , а также ускорения и заброса в выводную систему пучка в циклотронах с учетом действия магнитного поля, создаваемого при работе ускоряющей системы.

5. Параметры выводной системы сверхпроводящего циклотрона С400, позволяющей выводить из ускорителя ионы  $^{12}\text{C}^{6+}$  с энергией 400 МэВ/нуклон и эффективностью 70%, а также протоны с энергией  $\sim 270$  МэВ и эффективностью вывода, близкой к 100%. Система обеспечивает проводку пучков разными трактами внутри ускорителя с их последующим сведением и транспортировкой в одном канале.

### **Апробация диссертационной работы**

Результаты, изложенные в диссертации, использованы для практического применения и докладывались на российских и

международных конференциях и совещаниях: «11-е Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине», Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005; Russian Particle Accelerators Conference -RuPAC (2004, Дубна; 2006, Новосибирск; 2008, Звенигород; 2010, Протвино; 2012, Санкт-Петербург); Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, г. Алушта, Крым, Украина (2007, 2009, 2011); European Particle Accelerator Conference -EPAC: (2006, Эдинбург, Шотландия; 2008, Генуя, Италия); International Conferences on Cyclotrons and Their Applications –CYCLOTRONS (2007, Giardini Naxos, Италия; 2010, Lanzhou, Китай), Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT (2009, Венеция, Италия); International Particle Accelerator Conference – IPAC (2011, Сан-Себастьян, Испания), семинар ЛФВЭ ОИЯИ.

По теме диссертации опубликовано 36 работ, из них 14 в реферируемых журналах. Текст диссертации изложен на 223-х страницах, включает 262 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 127-ти наименований.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** сформулирована направленность работы, дается краткий обзор истории развития методов изучения динамики пучка в ускорителях циклотронного типа при помощи численного моделирования, описана структура и содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена теоретическим основам и методам построения численного расчета ускорения и вывода пучка в циклотронах и синхроциклотронах. Описана постановка задачи. Приводятся уравнения движения заряженной частицы в электромагнитном поле ускорителя в

цилиндрической системе координат. Для циклотронов удобно решать эти уравнения, интегрируя их по азимутальному углу  $\varphi$  в качестве независимой переменной. Для синхроциклотронов, так как частота ускоряющей системы изменяется в цикле ускорения, удобно использовать время как переменную интегрирования. Получены выражения для компонент магнитного и электрического поля, используемые в численных расчетах.

Широко используемая разработчиками ускорителей техника расчета изохронного поля, основанная только на анализе пространственной вариации магнитного поля ускорителя, не дает нужного результата для циклотронов со значительной (более  $40^\circ$ ) спиральностью магнитной структуры и высокой относительной вариацией магнитного поля  $\varepsilon \sim 0.3-0.5$ . Численные расчеты показывают, что пучок не ускоряется до радиусов вывода в поле, рассчитанном по этой методике. Описана итерационная процедура, включающая численное моделирование движения пучка и анализ частоты обращения на замкнутых равновесных орбитах, которая в дополнении с расчетом, основанным на анализе пространственной вариации магнитного поля ускорителя, дает зависимость среднего поля от радиуса необходимую для соблюдения изохронизма для данной магнитной системы ускорителя.

Действие магнитного поля, создаваемого ВЧ-системой, приводит к изменению поперечных размеров пучка и фазовой протяженности сгустков во время ускорения при значительном изменении напряжения на дуантах с радиусом орбиты. Как следствие, изменяются фазовые портреты пучка на входе в систему вывода. Получены выражения для компонент магнитного поля от ВЧ-системы в окрестности медианной плоскости циклотрона, которые необходимо учитывать в расчетах при проектировании эффективных систем вывода.

Обсуждается задание начальных данных для расчетов ускорения пучка и способ расчета фазы частицы по отношению к ускоряющему напряжению.

В конце главы описана схема интерполяции данных, обсуждается точность расчетов динамики пучка при помощи численного решения уравнений движения.

Во второй главе представлены основные параметры медицинского протонного циклотрона C235. Описан проведенный автором анализ ускорения и вывода пучка, приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по формированию выведенного пучка.

Магнитная система циклотрона C235 создает поле, конфигурация которого обеспечивает необходимую поперечную фокусировку пучка при ускорении от ионного источника до попадания на вход электростатического дефлектора.

Диаграмма рабочей точки показана на Рис. 1. Она пересекает три опасных резонанса:  $Q_r=1$  – в центре,  $Q_r-Q_z=1$  – на средних радиусах,  $3Q_r=4$  – в области вывода.

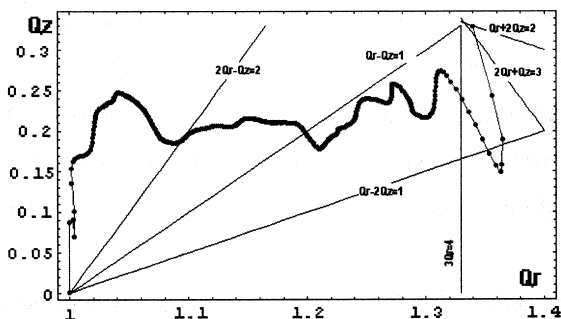


Рис. 1. Диаграмма рабочей точки циклотрона C235

Сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля для эффективного ускорения. Показано, что

при соблюдении этих требований структура магнитного поля циклотрона обеспечивает сохранение поперечного размера пучка при пересечении всех резонансов во время ускорения.

В результате проведенных автором расчетов вывода протонов из С235 и численного анализа потерь на элементах выводной системы (Рис. 2) получены научные данные по улучшению конструктивной конфигурации электростатического дефлектора для уменьшения потерь на нем.

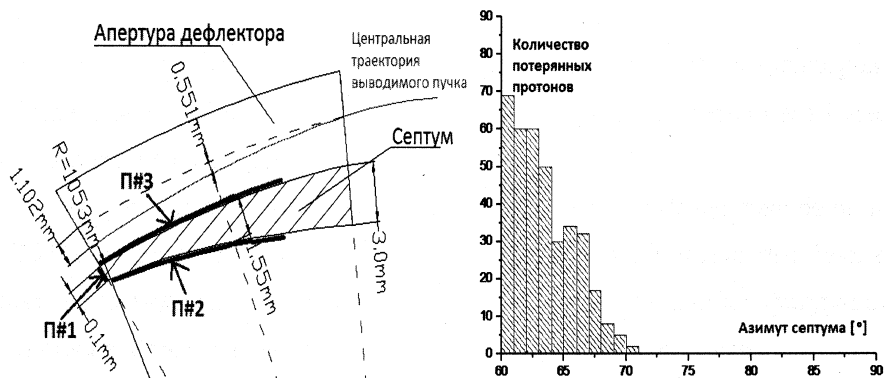


Рис. 2. Схематическая геометрия дефлектора для расчетов вывода пучка (слева), распределение потерь пучка на внешней стороне септума по его длине П#2 (справа)

Дефлектор с оптимизированной конфигурацией электродов изготовлен и испытан во время тестов с пучком циклотрона С235 РАР-111 (для медицинского центра в Париже (Орсей), Франция) при непосредственном участии автора. При этом экспериментально достигнутая эффективность вывода увеличена с 50 до 75% (Рис 3). В период 2007-2012гг. улучшенный вариант дефлектора использован и планируется для использования более чем в 10-ти ускорителях С235 для протонных центров в разных странах мира.



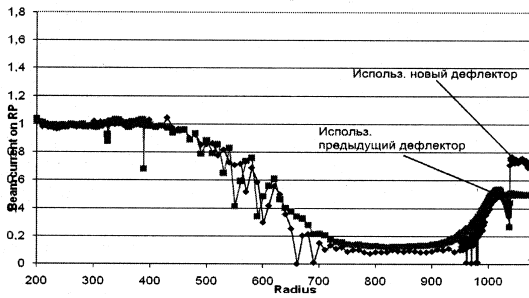


Рис. 3. Зависимость измеренной интенсивности тока пучка (нормирована на величину тока на радиусе 300 мм) от радиуса в циклотроне С235 при использовании дефлекторов нового и предыдущего типов

На основании результатов анализа динамики пучка в циклотроне С235 сформулированы предложения по созданию его улучшенной версии - С235-V3. Отличия новой версии ускорителя заключаются в изменении магнитной и выводной систем:

- в увеличении спиральности секторов магнитной системы на радиусах более 800 мм для увеличения частоты вертикальных бетатронных колебаний с  $\sim 0.25$  до  $\sim 0.45$ . Это позволит уменьшить примерно в 3 раза когерентный сдвиг пучка от плоскости  $z=0$  при наличии радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  ( $\Delta z \sim Q_z^{-2}$ ) и, таким образом, уменьшить чувствительность ускорителя к эффектам медианной плоскости;
- в изменении геометрии электродов электростатического дефлектора таким образом, чтобы минимум его толщины находился на расстоянии  $\sim 10$  см от входа. Это позволит увеличить эффективность выводной системы примерно на 25%.

В **третьей главе** представлена структура специализированного инженерного центра ОИЯИ, созданного в ЛЯП для сборки и испытаний ускорительной медицинской техники. Описаны этапы работ по формированию магнитного поля ускорителя С235-V3 для центра протонной терапии в Димитровграде Ульяновской области, который

создается в рамках федеральной целевой программы (ФЦП) «Создание высокотехнологичных центров медицинской радиологии».

Формирование требуемого магнитного поля выполнено при непосредственном участии автора на основе измерений вертикальной компоненты в средней плоскости ускорителя и последующей ее коррекции (Рис. 4). При этом ОИЯИ впервые реализовал ряд новых технологий. В ходе работ по формированию магнитного поля на циклотроне С235-V3:

- использована разработанная в ОИЯИ специальная компактная платформа для установки и обработки полюсных наконечников, позволяющая работать на станке с ЧПУ с размером стола ~1м, что в 1.5 раза меньше чем на станках, используемых в ИВА;
- осуществлен контроль точности обработки полюсных накладок при помощи измерений конфигурации их профиля после обработки на специальном 3-х мерном приборе «Eclips» фирмы Carl Zeiss с точностью 1.5 микрон, это позволило сократить общее число итераций;
- использован разработанный и созданный в ОИЯИ дипольный калибровочный магнит с полем до 2.9Тл, покрывающий весь диапазон значений магнитного поля ускорителя, что обеспечило относительную точность измерений  $\sim 10^{-4}$  во всем диапазоне полей;
- впервые в С234-V3 применены азимутальные проточки на съемных элементах магнитной системы для шиммирования узких (несколько сантиметров) по радиусу возмущений магнитного поля с амплитудой до  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл.

Использование компактной платформы для размещения на станке и контроль точности обработки полюсных наконечников важны при серийном производстве медицинских ускорителей, снижении их стоимости и сроков изготовления.

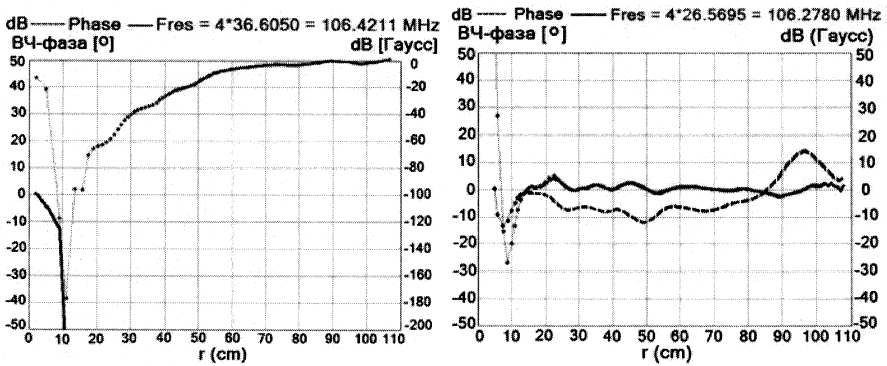


Рис. 4. Разница между изохронным и сформированным магнитным полем циклотрона C235-V3 и фазовое движение в сформированном поле до начала шиммирования (слева) и после завершения шиммирования (справа)

В начале шиммирования магнитного поля ускорителя разница между существующим и требуемым уровнем составляла до  $1.8 \cdot 10^{-2}$  Тл на некоторых радиусах. В результате формирования получена конфигурация магнитного поля, среднее значение которого отличается не более чем на  $(2-3) \cdot 10^{-4}$  Тл от изохронного во всем диапазоне радиусов и обеспечивает эффективное ускорение пучка.

В ходе наладочных работ на C235-V3 впервые опробована уникальная методика измерения средней радиальной компоненты магнитного поля при помощидвигающихся катушек, позволяющая исследовать эффекты отклонения медианной поверхности от средней плоскости ускорителя  $z=0$  до пучковых испытаний.

В **четвертой главе** описаны основные результаты пучковых испытаний циклотрона C235-V3, которые проведены в 2012г. в Дубне при непосредственном участии автора.

В ходе этих работ впервые для ускорителя этого типа проведена оптимизация центральной области магнитной структуры ускорителя, позволившая получить уменьшение вертикального профиля ускоряемого пучка более чем в 2 раза и минимизировать потери в центре:

1) Скорректирован провал частоты вертикальных бетатронных колебаний  $Q_z$  на радиусе  $r \sim 100$  мм при помощи уменьшения градиента среднего магнитного поля по радиусу после  $r \sim 90$  мм. В этом месте увеличен уровень среднего поля на  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  Тл. Для выполнения такого шиммирования магнитного поля восемь стальных накладок были размещены на секторах магнитной системы (4 сверху и 4 снизу) около центральных втулок.

2) Компенсация возмущения  $B_r$  в медианной плоскости, обусловленного ошибками изготовления и установки элементов магнитной системы циклотрона, осуществлена при помощи вертикального несимметричного смещения на 0,3 мм вверх нижней центральной втулки магнитной системы. Параметры пучка до и после оптимизации центра магнитной системы ускорителя показаны на Рис. 5. Видно, что вертикальный размер пучка уменьшился в 2-2.5 раза, при этом в центральной области не были использованы коллимирующие диафрагмы. Движение пучка относительно плоскости  $z=0$  как целого осталось практически неизменным.

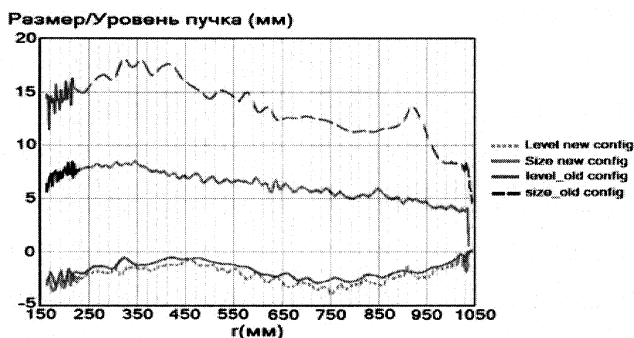


Рис. 5. Вертикальный размер пучка до (фиолетовый) и после (красный) установки стальных шимм в центре, а также профиль вертикального движения центра пучка во время ускорения до (зеленый) и после (голубой) установки шимм

Данные, показанные на Рис. 5, получены при помощи «визуального» пробника (Рис. 6).

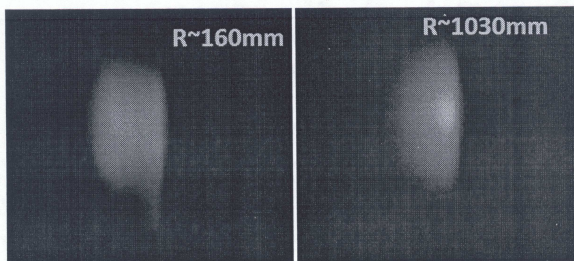


Рис. 6. Изображение пучка, полученное с помощью визуального пробника в начале и в конце ускорения

След выведенного пучка на специальной пластине показан на Рис. 7. Пятно имеет квадратную форму из-за действия коллиматоров, находящихся перед выходным фланцем вакуумной камеры. Окончательная настройка ускорителя будет проведена на месте его эксплуатации в Димитровграде.

В конце главы приводятся основные результаты расчетов, показывающих значительное влияние возмущений магнитного поля в центральной области ускорителя на всю динамику пучка.

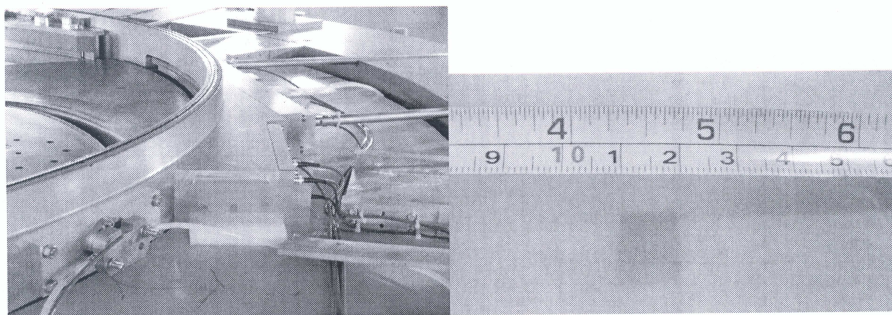


Рис. 7. След от выведенного пучка на специальной пластине, расположенной за выходным фланцем вакуумной камеры

Особенности движения пучка в центральной области связаны с эффектами медианной плоскости, параметрами бампа магнитного поля и минимальным значением  $Q_z$  в этом месте. В циклотроне С235 формирование бампа, для обеспечения аксиальной фокусировки на первых

оборотах, приводит на  $r \sim 100$  мм к уменьшению значений  $Q_z$  до уровня 0,04-0,06. Если в медианной плоскости в этом месте есть возмущение магнитного поля в виде  $B_r$ , с уровнем  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Тл и градиентом  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл/м, оно приводит к трансформации когерентного движения центра тяжести пучка в этой области в некогерентное движение отдельных частиц. Из-за этого увеличивается вертикальный размер пучка в остальной области ускорения. Один из результатов численного моделирования динамики частиц в центральной области циклотрона С235-V3 в отсутствие  $B_r$ , в медианной плоскости и для модельной зависимости  $B_r$  от радиуса приведены на Рис. 8.

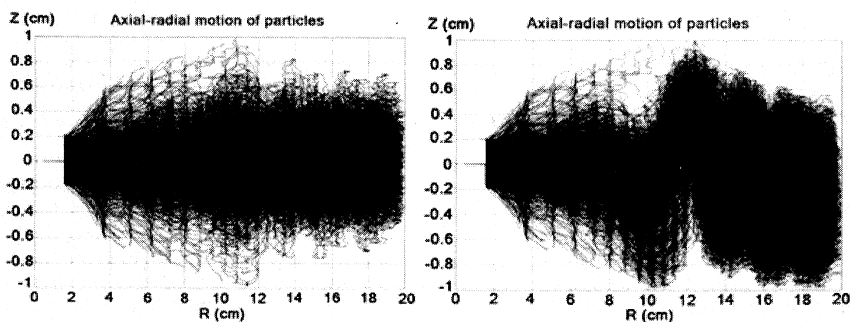


Рис. 8. Вертикальное движение пучка с начальным эмиттансом  $\epsilon_z = 200 \mu$ , начиная от ионного источника. Слева – нет  $B_r$ , внизу – есть  $B_r$ , типа в средней плоскости

Наличие радиальной компоненты в медианной плоскости  $B_r$ ,  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Тл приводит к увеличению среднеквадратичного аксиального размера пучка с 8 мм до 14 мм (Рис. 8).

Выбор оптимальной толщины корректирующих провал частоты вертикальных бетатронных колебаний  $Q_z$  на  $r \sim 100$  мм пластин обусловлен двумя взаимно-противоположными эффектами. С одной стороны, увеличение толщины пластин и, соответственно, амплитуды, корректирующего бампа от них ведет к увеличению магнитной

фокусировки и уменьшению провала  $Q_z$ . В конечном счете, это приводит к снижению эффектов трансформации когерентного движения пучка в некогерентное движение отдельных частиц.

С другой стороны, увеличение амплитуды корректирующего бампа одновременно приводит к росту среднего уровня  $B_z$  в этой области и сдвигу ВЧ-фаз протонов на несколько градусов вниз и, как следствие, уменьшению электрической фокусировки ускоряющим полем.

Проведенный анализ динамики пучка в центральной области циклотрона С235-V3 согласуется с точностью 25-30% с результатами измерений вертикального размера протонного пучка на радиусах более 150мм. Достигнутое двукратное уменьшение вертикального размера пучка и потерь в центральной области связано с компенсацией возмущения  $B_z$  в области минимума  $Q_z$  на  $r \sim 100$ мм и увеличением вертикальной фокусировки в этом месте.

В итоге эффективность ускорения от радиуса  $\sim 300$ мм до конечного радиуса составляет 72%. Вывод пучка из камеры ускорителя осуществлен при помощи электростатического дефлектора. Эффективность вывода пучка - 62%. Таким образом, общая эффективность (ускорение + вывод) циклотрона С235-V3 составляет 45%.

Описаны отличия циклотрона С235-V3 от серийного медицинского ускорителя ИВА С235. В этом ускорителе основные улучшения направлены на двукратное увеличение интенсивности выведенного пучка за счет уменьшения потерь. Приведены особенности использования циклотронов и синхротронов для реализаций технологий адронной терапии последнего поколения.

Из-за увеличенной эффективности ускорения и вывода пучка циклотрон С235-V3 имеет преимущество по сравнению со

специализированными циклотронами фирмы ИВА с точки зрения радиационной терапии:

- при реализации новых технологий протонной терапии, связанных с синхронизацией облучения и движения органов, а также с активным сканированием модулированным по интенсивности тонким пучком;
- при реализации пассивного сканирования для опухолей большого объема, а также при терапии с увеличенной дозой облучения за одну фракцию при сниженном общем количестве фракций;
- в планируемом превышении интенсивности выведенного протонного пучка по сравнению с током протонного медицинского циклотрона фирмы Varian/ACCEL (максимальный ток выведенного пучка 0.8мкА);
- в уменьшении радиационной нагрузки на элементы магнитной и ускоряющей системы, что является важнейшим фактором для сервиса медицинского серийного ускорителя и условий его транспортировки от изготовителя к потребителю.

В пятой главе описаны основные результаты исследования динамики вывода пучков – углеродного с энергией 400 МэВ/нуклон и протонного с энергией ~270 МэВ из сверхпроводящего циклотрона С400. Концепция этого ускорителя разработана при определяющем участии автора группой сотрудников ОИЯИ. Создание циклотрона начато компанией ИВА в 2010г. в рамках проекта «Arcade» в Ganil (Франция).

На основании полученных в ходе исследования результатов разработана и оптимизирована структура выводной системы С400 (Рис. 9).



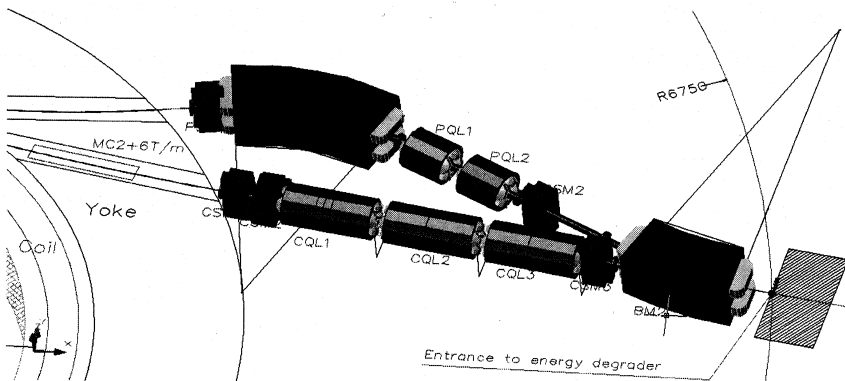


Рис. 9. Схематический вид системы вывода углеродного и протонного пучков из циклотрона С400

Система позволяет эффективно выводить из ускорителя ионы  $^{12}\text{C}^{6+}$  с энергией 400 МэВ/нуклон и протоны с энергией  $\sim 270$  МэВ разными траекториями, а затем сводить выведенные пучки в одном направлении на расстоянии 6.75м от центра циклотрона и транспортировать их в одном канале. Эффективность вывода углерода  $\sim 73\%$ , протонов – близка к 100%.

**В заключении диссертации** сформулированы основные научные результаты работы:

1. Совместно ОИЯИ и ИВА создан и испытан с циркулирующим и выведенным пучком компактный изохронный циклотрон С235-V3, предназначенный для первого в России специализированного центра протонной терапии в Димитровграде. По своим характеристикам ускоритель является одним из двух лучших существующих в мире специализированных циклотронов для протонной терапии. С235-V3 вдвое превосходит специализированные медицинские циклотроны С235 фирмы ИВА по интенсивности выведенного пучка за счет увеличенной эффективности ускорения и вывода. Это обеспечивает реализацию с помощью него новых методов и технологий протонной терапии,

основанных на синхронизации облучения и движения органов, а также активном сканировании модулированным по интенсивности пучком.

2. Сформирована структура магнитного поля в циклотроне С235-V3, среднее значение которого в зависимости от радиуса отличается не более чем на  $(2-3) \cdot 10^{-4}$  Тл от изохронного. Она обеспечивает эффективное ускорение пучка. Для формирования магнитного поля в ОИЯИ предложены и применены оригинальные технологии:

- компактная платформа для обработки боковой поверхности полюсных накладок ускорителя;
- контроль точности обработки полюсных накладок при помощи измерений на специальном 3-х мерном приборе «Eclips» фирмы Carl Zeiss с точностью несколько микрон;
- дипольный калибровочный магнит с полем до 2.9Тл
- азимутальные проточки на съемных элементах магнитной системы для шиммирования узких (несколько сантиметров) по радиусу возмущений магнитного поля с амплитудой до  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл.

3. Для циклотронов С235 и С235-V3 создана новая система вывода пучка на базе электростатического дефлектора с улучшенной конфигурацией электродов. Экспериментально достигнутый коэффициент вывода увеличен с 50% до 75%. Эта система установлена и используется более чем на 10-ти ускорителях.

4. Проведены испытания ускорителя С235-V3 с циркулирующим и выведенным пучком, в ходе которых:

- экспериментально подтвержден изохронизм сформированного магнитного поля ускорителя;

- оптимизирована центральная область магнитной системы, что позволило в два раза уменьшить вертикальный профиль ускоряемого пучка и сформировать его без использования диафрагм на начальных оборотах;
- впервые для данного типа циклотрона достигнута эффективность ускорения пучка от центральной области до конечного радиуса 72%;
- получена эффективность вывода 62%.

5. В ходе разработки С235-V3 проведено исследование динамики ускорения и вывода пучка в серийном медицинском циклотроне для протонной терапии С235, в результате которого установлен принципиальный факт: основной причиной потерь пучка при ускорении является значительное влияние эффектов медианной плоскости с уровнем радиальной компоненты магнитного поля  $(2-3) \cdot 10^{-4}$  Тл на вертикальное когерентное движение пучка. Потери происходят на элементах магнитной системы в области вывода. Показано что, для улучшения эффективности ускорения пучка необходимо увеличить вертикальную фокусировку в зоне вывода, повышая значение частоты вертикальных бетатронных колебаний с 0.25 до 0.45.

6. Для циклотронов со значительным (более  $40^\circ$ ) углом спиральности секторов при высокой относительной вариации магнитного поля  $\varepsilon \sim 0.3 \div 0.5$ , впервые создана методика расчета изохронного поля, включающая численное моделирование движения пучка и анализ частоты обращения на замкнутых равновесных орбитах. Она дает необходимую для обеспечения изохронизма зависимость среднего магнитного поля от радиуса.

7. Впервые создана методика расчета ускорения и заброса пучка в выводную систему в циклотронах с учетом действия магнитного поля от

ВЧ-системы. При значительном росте величины ускоряющего напряжения с радиусом орбиты эффект приводит к 30–50% увеличению эмиттанса и энергетического разброса пучка на входе в систему вывода.

8. Разработана структура выводной системы сверхпроводящего циклотрона С400, позволяющая эффективно выводить из ускорителя частицы с разным отношением заряда к массе (ионы углерода и протоны). Система обеспечивает проводку пучков разными трактами внутри циклотрона с их последующим сведением и транспортировкой в одном канале.

9. Основным результатом работы является решение важной научно-технической задачи по созданию специализированного медицинского ускорителя для реализации современных методик протонной терапии, дающих наилучшие результаты.

**Основные результаты** диссертации опубликованы в работах:

1. G. A. Karamysheva, S. A. Kostromin, Beam Dynamics Study in the C235 Cyclotron for Proton Therapy, препринт ОИЯИ, Е9-2008-39
2. Ю. Г. Аленицкий, С. А. Костромин, Н. Л. Заплатин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов, Циклотрон для лучевой терапии С220р (динамика ускорения и вывода пучка), материалы 11-го Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 2005. С. 233-236
3. Yu. G. Alenitsky, S.B. Vorozhtsov, A.S. Vorozhtsov, A.A. Glazov, N.L. Zaplatin, G.A. Karamisheva, S.A. Kostromin, L.M. Onischenko, E.V. Samsonov, Specialized Cyclotron for Beam Therapy Application, RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006

4. Ю. Г. Аленицкий, А. А. Глазов, Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов, С. Б. Ворожцов, А. С. Ворожцов, Н. Л. Заплатин, Протонный циклотрон для лучевой терапии, XX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 2007г., Алушта, Крым
5. Yu. G.Alenitsky, ... S.A.Kostromin et al., Isochronous cyclotron C250 for proton therapy application, RuPAC 2008, Звенигород
6. Ю. Г. Аленицкий, С. Б. Ворожцов, А. А. Глазов, Н. Л. Заплатин, С. А. Костромин, Г. А. Карамышева, Г. В. Мицын, А. Г. Молоканов, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов, Циклотрон для лучевой терапии, Прикладная физика. 2005. № 5. С.50-54
7. Y. Jongen et al., IBA-JINR 400 MeV/U Superconducting Cyclotron For Hadrons Therapy, Proc. Cyclotrons 2010, Lanzhou, China
8. С.А. Костромин, Г.А. Карамышева, Е.В. Самсонов, И.Йонген, Влияние магнитного поля от ускоряющей системы на динамику пучка в циклотроне, Письма в ЭЧАЯ, 2012., Т. 9, № 4-5, с.384-387
9. Y.Jongen, IBA, Louvain-la-Neuve, Belgium, E.Samsonov, G.Karamysheva, S.Kostromin, JINR, Influence of RF Magnetic Field on Ion Dynamics In IBA C400 Cyclotron, Proceedings of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China
10. С.А. Костромин, Г.А. Карамышева, Е.В. Самсонов, И.Йонген, Влияние магнитной компоненты ВЧ-поля на движение пучка в циклотроне, Прикл Физика, с. 50, №3, 2012г.
11. С.А. Костромин, Л. М. Онищенко, Расчет ускорения и вывода пучка из Фазотрона ОИЯИ, Письма в ЭЧАЯ, 2012., Т. 9, № 4-5, с.388-393
12. Г.А.Карамышева, О.В.Карамышев, С.А.Костромин, Н.А.Морозов, Е.В.Самсонов, Е.М.Сырессин, Г.Д.Ширков, С.Г.Ширков, Динамика пучка в

- циклотроне С235-V3 для протонной терапии, Журнал Технической Физики. 2012. Т. 82 вып.1 с.107
13. И. Енген, Г.А. Карамышева, С.А. Костромин, Н.А. Морозов, Е.В. Самсонов, Е.М. Сыресин, Г.Д. Ширков, С.Г. Ширков, Расчет вывода пучка из циклотрона С235 для протонной терапии, Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд: ОИЯИ, 2010, т. 7, № 7(163), с. 821-826
  14. Г.А. Карамышева, С.А. Костромин, Н.А. Морозов, Е.В. Самсонов, Е.М. Сыресин, Г.Д. Ширков, Вывод пучков из циклотронов с помощью электростатического дефлектора: от расчетов до экспериментальных результатов, Прикладная физика, ISSN:1996-0948, 4, 69-74, 2010
  15. E. M. Syresin, ..., S. Kostromin et al., Development of Radiation Medicine at DLNP JINR, Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8, № 4(167). С.635-646
  16. Yu. G. Alenitsky, S. B. Vorozhtsov, A. A. Glazov, G. V. Mytsyn, A. G. Molokanov, N. L. Zaplatin, G. A. Karamysheva, S. A. Kostromin, L. M. Onischenko, E. V. Samsonov, Cyclotron for beam therapy application, RuPAC 2004, Dubna, 2004. P.162-164
  17. Y. Jongen et al, Design Studies of the Compact Superconducting Cyclotron for Hadron Therapy, Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland
  18. S. A. Kostromin, Development of code for simulation of acceleration of ions from internal source to end of extraction system in cyclotrons and preliminary design study of 8 MeV cyclotron for production of radioisotopes, EPAC 2006, Edinburgh, Scotland
  19. Y. Jongen, W. Kleeven, G. A. Karamysheva, S. A. Kostromin, N. A. Morozov, E. V. Samsonov, Simulation of Ions Acceleration and Extraction in Cyclotron C400, EPAC'06. Edinburgh, 2006
  20. Y. Jongen, D. Vandeplasseche, S. Zarembo, G. Karamysheva, N. Morozov, E. Samsonov, Computer Modeling of Magnetic System for C400 Superconducting Cyclotron, EPAC'06, Edinburgh, 2006

21. Ю. Н. Денисов, С. Н. Доля, В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, С. Б. Федоренко, Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК, Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, №3(126). С.34-38
22. Ю. Г. Аленицкий, А. С. Ворожцов, С. Б. Ворожцов, А. А. Глазов, В. П. Дмитриевский, Н. Л. Заплатин, В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов, Сильноточный циклотрон-инжектор для Фазотрона ОИЯИ, Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 3(126). С.24-28
23. Yu. G.Alenitsky, ..., S.A.Kostromin, et al., Positron Emission Isotope Production Cyclotron in DLNP JINR (status report), Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд:ОИЯИ, 5, 7, 41-44, 2008
24. Ю. Г. Аленицкий, А. С. Ворожцов, С. Б. Ворожцов, Н. Л. Заплатин, Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов, А. Ф. Чеснов, Циклотрон для лучевой терапии C220p (магнитная система), материалы 11-го Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 2005. С. 228-232
25. G. Karamysheva, S. Kostromin, Beam dynamics study in the C235 cyclotron for proton therapy, Письма в ЭЧАЯ, т. 6, вып. №1 с.134-144, 2009
26. Syresin E. M. et al., Proc. Of RuPAC-2010, p. 402
27. Y. Jongen, M. Abs, W. Beeckman, A. Blondin, W. Kleeven, D. Vandeplassche, S. Zarembo, V. Aleksandrov, S. Gurskiy, G. Karamysheva, N. Kazarinov, S. Kostromin, N. Morozov, E. Samsonov, V. Shevtsov, G. Shirkov, E. Syresin, A. Tuzikov IBA C400 Cyclotron Project For Hadron Therapy, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy, 2007
28. Y. Jongen... S. Kostromin Current Status of the IBA C400 Cyclotron Project For Hadron Therapy, EPAC 2008, Genoa, Italy

29. Y. Jongen, M.Abs, A. Blondin, W. Kleeven, S.Zaremba, D. Vandeplassche, IBA, Belgium V.Aleksandrov, S.Gursky, G.Karamysheva, N.Kazarinov, S.Kostromin, N.Morozov, V. Romanov, N. Rybakov, A. Samartsev, E.Samsonov, G.Shirkov, V.Shevtsov, E.Syresin, A.Tuzikov, JINR, Russia. Simulation And Design of The Compact Superconducting Cyclotron C400 For Hadron Therapy, HIAT09, Venice, Italy
30. Y. Jongen, M.Abs, A. Blondin, W. Kleeven, S.Zaremba, D. Vandeplassche, V.Aleksandrov, S.Gursky, O.Karamyshev, G.Karamysheva, N.Kazarinov, S.Kostromin, N.Morozov, E.Samsonov, G.Shirkov, «Compact Superconducting Cyclotron C400 for Hadron Therapy», Nuclear Instruments and Methods, Section A, V. 624, Issue 1, p.47-53, 2012
31. Y.Jongen, S.Kostromin et al. Simulation of Two Beams Extraction from Superconducting Cyclotron C400, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy
32. Y. Jongen, M.Abs, W.Beeckman, A.Blondin, W. Kleeven, D.Vandeplassche, S. Zaremba, G. Karamysheva, N. Morozov, S. Kostromin, E. Samsonov Simulation of Extraction Magnetic Elements For C400 Superconducting Cyclotron, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy, 2007
33. E. Syresin,..., S. Kostromin et al, Development Of The IBA-JINR Cyclotron C235-V3 For Dimitrovgrad Hospital Center Of The Proton Therapy, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain
34. S. Kostromin, L. Onischenko, A. Chesnov, S. Shirkov, Simulation of Beam Dynamics in the Extraction System, Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia
35. S. Kostromin et al., Development of The IBA-JINR Cyclotron C235-V3 For Dimitrovgrad Hospital Center of The Proton Therapy, Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia
36. С.А. Костромин, Е.М. Сыресин, «Тенденции в ускорительной технике для адронной терапии», Письма в ЭЧАЯ, 2013



Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 5.08.2013.

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

Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,56. Тираж 100 экз. Заказ № 58031.

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/)