

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 621.384.633

КОСТРОМИН

Сергей Александрович

ДИНАМИКА ПУЧКОВ В КОМПАКТНЫХ ЦИКЛОТРОНАХ ДЛЯ  
МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная  
техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2008

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Карамышева Галина Анатольевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Перельштейн Элкуно Аврумович

кандидат физико-математических наук  
Чирков Петр Николаевич

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт»  
Институт общей и ядерной физики

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г. в « \_\_\_\_ » часов на  
заседании диссертационного совета Д720.001.03 в Объединенном институте  
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ю. А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность*

Данная работа, проведенная автором совместно с сотрудниками Отдела новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ, посвящена изучению динамики частиц в компактных изохронных циклотронах.

В последние годы компактные циклотроны стали широко использоваться для решения различных прикладных задач [1]-[9]. Это произошло, во-первых, потому что интересы фундаментальных исследований в физике элементарных частиц, в основном, вышли за уровень энергий, достижимый на таких циклотронах (сотни МэВ). Во-вторых, при современном уровне развития промышленности, вычислительных технологий, а также большому накопленному опыту в разработке и изготовлении циклотронов, проекты с использованием ускорителя для решения узкого круга задач стали экономически обоснованными. Круг прикладных задач, где используются компактные циклотроны, достаточно широк: лучевая терапия [4], [10], [11], производство радиофармпрепаратов [12]-[15], изготовление трековых мембран [1] для различного рода фильтров в промышленных масштабах. Известен такой проект [2], где циклотрон является одной из основных частей комплекса для обнаружения взрывчатых веществ.

Сравнительно невысокая стоимость, компактность, надежность в эксплуатации, незначительная активация внутренних систем в процессе работы, малая потребляемая мощность электроэнергии – все эти характеристики очень важны для современных циклотронов, используемых в промышленности и медицине.

Магнитные и ускоряющие системы современных компактных циклотронов, как правило, имеют небольшие размеры вертикальной апертуры – от десяти миллиметров до нескольких десятков миллиметров [7], [16], [17], [18]. Для формирования изохронного поля до области вывода

пучка может использоваться профилированная по высоте и по азимуту секторная структура [19].

При неточностях изготовления и сборки магнитной системы в несколько десятых долей миллиметра (например, при сдвиге в горизонтальном направлении нижней и верхней частей циклотрона относительно друг друга, или при неодинаковой высоте секторов магнитной системы) возникают возмущения магнитного поля в средней плоскости циклотрона величиной до нескольких Гаусс. Эти возмущения могут быть в виде присутствия радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$ , которая приводит к когерентному отклонению пучка от средней плоскости циклотрона. Или в виде 1-й и более высоких гармоник радиальной и аксиальной компонент магнитного поля, которые, в свою очередь, могут привести к увеличению вертикального размера пучка, а также к увеличению амплитуд свободных радиальных колебаний.

Описанные выше процессы могут привести к потерям пучка на элементах магнитной и ускоряющей систем циклотрона.

В связи с этим, детальное моделирование движения пучка в циклотроне во всей области ускорения необходимо на стадии разработки, измерения и шиммирования магнитного поля для определения допусков на точность изготовления различных элементов ускорителя и устранения или уменьшения возможных потерь пучка.

***Цель реферируемой работы*** состоит:

- в выяснении причин возможных потерь пучка на элементах магнитной системы при ускорении в циклотронах типа С235 (ИВА, Бельгия), в частности в С235 Р06 (машина предназначена для эксплуатации в Институте протонной терапии в Джексонвилле, Флорида, США), и их последующей минимизации путем шиммирования магнитного поля;

- в определении параметров магнитной системы новой версии циклотрона С235 V3 на основе полного анализа динамики пучка в С235 Р06.

### ***Научная новизна***

1. Впервые проведен расчет ускорения пучка в протонном циклотроне С235 Р06 с учетом измеренной карты радиальной компоненты магнитного поля.
2. Сформулированы требования на фокусирующие свойства магнитной системы в зоне вывода уникального сверхпроводящего циклотрона С400 (ИВА, Бельгия), предназначенного для адронной терапии онкологических заболеваний.
3. Создан пакет программ для расчета динамики пучка в компактном изохронном циклотроне, где предусмотрена возможность учета возмущений магнитного поля. Электрическое поле задается в виде аналитических представлений, либо на основании карты электрического поля ускоряющей системы циклотрона.

### ***Практическая ценность работы***

1. На основании модельных расчетов, изучено действие опасных резонансов, пересекаемых пучком протонов в процессе ускорения в циклотроне С235 Р06, а также сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля ускорителя.
2. Проведено моделирование ускорения пучка в этом циклотроне, с использованием данных измерений вертикальной и радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости ускорителя. Показано, что в исходном магнитном поле можно ускорить пучок протонов только до энергии  $\sim 220$  МэВ, а для достижения проектной энергии 235 МэВ необходимо провести шиммирование радиальной компоненты магнитного поля.
3. Сделаны рекомендации по улучшению геометрии электростатического deflectора, используемого в выводной системе циклотронов С235. Их реализация позволила увеличить эффективность вывода с 60 до 77%.

4. В результате анализа динамики пучка в С235 Р06 предложено изменить магнитную систему циклотрона. А именно, увеличить спиральность секторов в зоне вывода, для увеличения вертикальной фокусировки пучка и, тем самым уменьшения чувствительности ускорителя к наличию искажений медианной плоскости. Между ИВА и ОИЯИ подписан контракт на разработку и сборку циклотрона С235 V3 – с модифицированной магнитной системой.
5. Сделанные выводы о возможностях вертикальных потерь пучка на конечных радиусах циклотрона С235 Р06 повлияли на проектируемые характеристики магнитной системы в зоне вывода сверхпроводящего циклотрона С400 (энергия 400 МэВ/нуклон), который в данный момент разрабатывается сотрудниками ЛЯП ОИЯИ совместно с фирмой ИВА.

#### *Апробация работы*

Основные результаты диссертации доложены на следующих форумах:

- 11-е Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005.
- Russian Accelerator Conferences: RuPAC-2004, October 4-9, Dubna; RuPAC-2006, September 10-14, 2006, Novosibirsk, Russia.
- European Particle Accelerator Conference: 2006, Edinburgh, UK.
- International Conferences on Cyclotrons and Their Applications: CYCLOTRONS 2007, September 30-October 5, 2007, Giardini Naxos, Italy.
- XX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 9-15 сентября, 2007, Алушта, Крым.
- 11<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference, June 23-27, 2008, Genoa, Italy.
- European Cyclotron Progress Meeting, 15-18 October, 2008.
- Научные семинары ЛЯП ОИЯИ, совещания сотрудничества ЛЯП-ИВА.

### ***Публикации***

По теме диссертации опубликовано 12 работ, приведенных в списке литературы, в том числе в реферируемых журналах.

### ***Структура диссертации***

Диссертация состоит из введения и пяти глав.

В первой главе приведено теоретическое рассмотрение основ движения заряженных частиц в электромагнитном поле и изложены основные принципы, которые были использованы для написания программ для численного моделирования динамики пучка в циклотроне.

Во второй главе представлены основные параметры циклотрона С235 Р06, а также результаты численного моделирования ускорения пучка протонов в этом циклотроне с использованием карты измеренной вертикальной компоненты магнитного поля  $B_z$  в средней плоскости.

В третьей главе рассмотрены результаты моделирования ускорения протонов в циклотроне С235 Р06, с использованием данных измерений вертикальной  $B_z$  и радиальной  $B_r$  компонент магнитного поля в средней плоскости ускорителя.

В четвертой главе описаны основы моделирования вывода пучка частиц из циклотрона при помощи электростатического дефлектора. Проведен расчет вывода протонов из циклотрона С235 Р06.

Пятая глава посвящена использованию созданного пакета программ в расчетах других циклотронов.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** рассмотрены математические основы моделирования ускорения заряженных частиц в циклотроне, использующие уравнения движения частицы в электромагнитном поле, а также уравнения Максвелла для магнитного и электрического поля, записанные для пространства в

окрестности медианной плоскости. Получены выражения для компонент магнитного и электрического поля, используемые в дальнейших расчетах.

**Вторая глава** посвящена изучению резонансов в циклотронах-С235.

В течение последних нескольких лет фирмой IBA (Бельгия) был разработан и затем создан изохронный циклотрон С235 для лучевой терапии. К настоящему моменту семь таких машин установлены и работают в различных медицинских центрах. Еще несколько находятся на стадии изготовления и наладки.

Циклотрон С235 (Рис. 1) предназначен для ускорения протонов до энергии 235 МэВ. Проектный ток выведенного пучка – 500 нА.

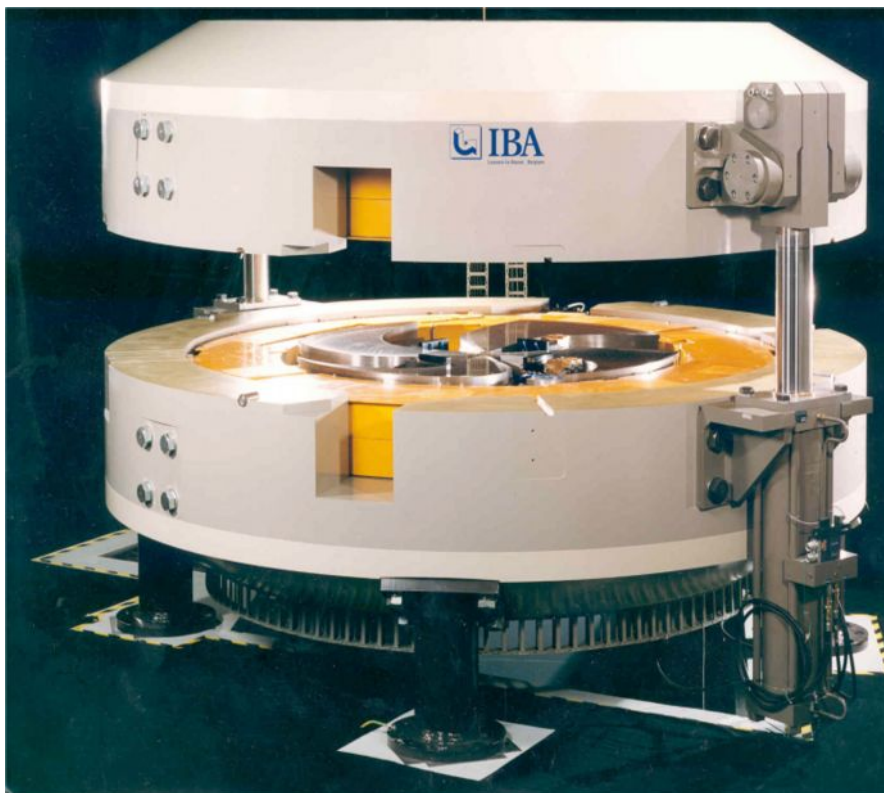


Рис. 1. Протонный циклотрон С235 – внешний вид

Уникальность машины заключается в наличии профилированного по высоте (эллиптического) зазора в холмах, уменьшающегося от центра к радиусу вывода с 9.6см до 0.9см.

На Рис. 2 дана зависимость частот бетатронных колебаний от радиуса, а также указаны резонансы, пересекаемые в процессе ускорения.



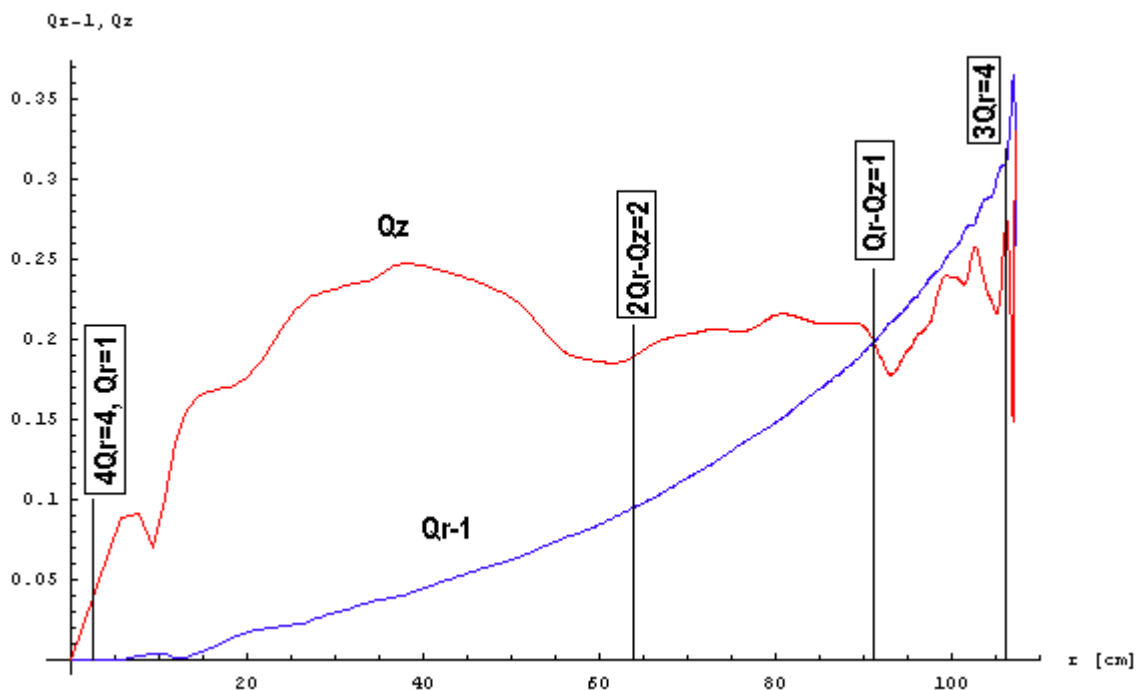


Рис. 2. Зависимость частот бетатронных колебаний от радиуса

На основании проведенных исследований сделаны выводы об опасности резонансов  $Q_r=1$ ,  $Q_r-Q_z=1$  и  $3Q_r=4$ . Сформулированы требования на величины низших гармоник компонент магнитного поля циклотрона для ускорения пучка без ухудшения его параметров при пересечении данных резонансов.

Требование на амплитуду 1-й гармоники магнитного поля, налагаемое первым из этих резонансов, –  $B_{z1} < 3$  Гаусс – может быть снижено путем формирования магнитного поля таким образом, чтобы  $Q_r$  в центре как можно быстрее отходила от единицы и не пересекала резонанс повторно.

Для большей точности изучение эффектов влияния данного резонанса на радиальное движение пучка следует проводить совместно с учетом действия резонанса  $3Q_r=4$ . Эффект незначительного увеличения амплитуд свободных радиальных колебаний во время прохождения резонанса  $Q_r=1$  – может быть усилен во время пересечения пучком резонанса  $3Q_r=4$ .

Второй из опасных резонансов  $Q_r-Q_z=1$  – пересекается в основной области ускорения. Требование на амплитуду 1-й гармоники радиальной компоненты магнитного поля  $B_{r1} < 5-7$  Гаусс, как правило, выполняется на

практике при отсутствии явных неточностей при изготовлении отдельных элементов циклотрона, а также при не нарушении симметрии магнитной системы. Выполнение этого требования может быть также достигнуто путем шиммирования магнитного поля.

Резонанс  $3Q_r=4$  в С235 не накладывает дополнительных требований на магнитное поле ускорителя, т. к. пучок в данном циклотроне выводится с радиуса действия резонанса.

**Третья глава** посвящена изучению динамики протонов в С235 Р06 с учетом измеренной радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости.

Вопросы, связанные с величиной вертикального движения пучка, являются важными для всех С235-циклотронов. Это является следствием эллиптического профиля по высоте межсекторного зазора и достаточно малой величины вертикальной апертуры циклотрона на радиусе вывода – 9мм.

Следует отметить существование достаточно жесткого допуска на величину радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  (которая появляется из-за неточностей изготовления и сборки циклотрона) в области вывода.

Например, наличие средней по азимуту  $B_r \sim 1$  Гаусс на конечных радиусах циклотрона – более 1м (энергия протонов больше 200 МэВ), где среднее магнитное поле  $\sim 2$  Тесла, а  $Q_z \sim 0.2$ , приводит к когерентному смещению пучка от медианной плоскости величиной  $\sim 1.2$ мм. При вертикальной апертуре – 9мм и вертикальном размере пучка 8-10мм такое смещение становится критическим с точки зрения потерь.

Поэтому проведение измерений радиальной компоненты магнитного поля и последующее шиммирование становятся актуальными в процессе запуска циклотрона.

В этой части работы представлены результаты расчета динамики движения пучка в циклотроне С235 Р06 с использованием измеренной карты вертикальной компоненты в средней плоскости  $B_z(r, \varphi, \theta)$  (она же

использовалась при изучении прохождения резонансов, описанного в предыдущей главе) и измеренной карты радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости  $B_r(r, \varphi, 0)$ .

Для получения карты радиальной компоненты  $B_r$  использовалась система для измерения вертикальной компоненты магнитного поля  $B_z$  (механически вращающееся колесо с двигающейся по радиусу головкой). На подвижной головке размещаются следующие устройства:

- три датчика Холла для измерения вертикальной компоненты, расположенные на 1.5мм выше, на 1.5мм ниже и, также, в плоскости измерительной системы;
- датчик Холла для измерения, собственно, радиальной компоненты магнитного поля (ориентирован по радиусу);
- датчик температуры;
- сенсор вертикального положения.

Сенсор вертикального положения представляет собой светочувствительное устройство, освещаемое лазером, зафиксированным на измерительном колесе.

В измеренную величину радиальной компоненты магнитного поля вносилась поправка, связанная с отклонением датчика Холла в процессе измерения от плоскости  $z=0$ :

$$B_r(z=0) = B_r(z) - \frac{\partial B_z}{\partial r} z$$

(здесь использовано соотношение  $\partial B_r / \partial z = \partial B_z / \partial r$ ). Величина отклонения определялась при помощи сенсора вертикального положения и лазера.

Таким образом, была получена карта  $B_r$ -компоненты магнитного поля в плоскости  $z=0$  во всем диапазоне радиусов ускорения. На Рис. 3 представлена зависимость средней (по азимуту) компоненты- $B_r$  от радиуса.

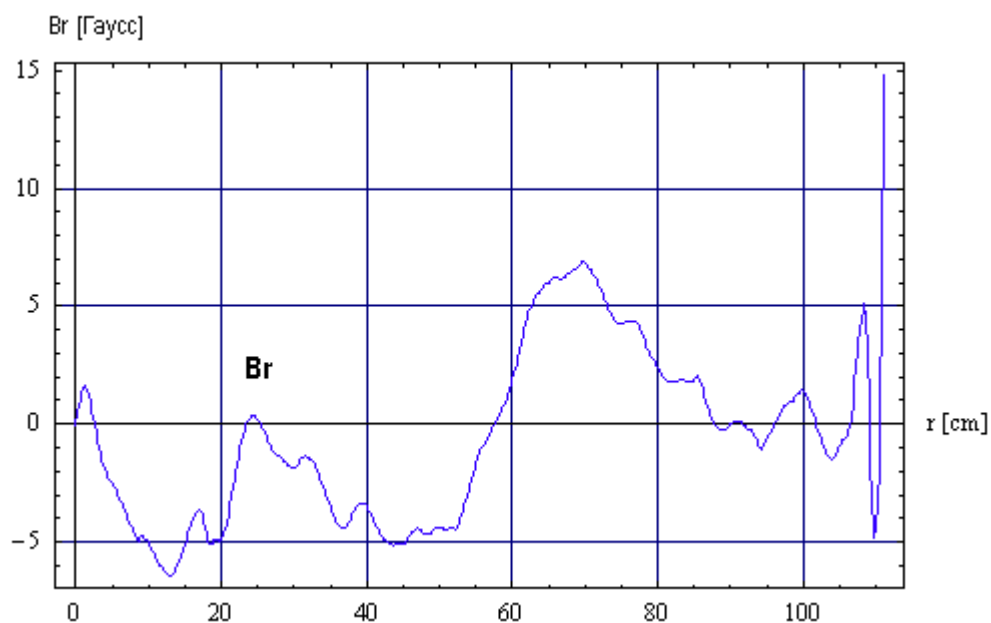


Рис. 3. Средняя (по азимуту) компонента- $B_r$  в циклотроне С235 Р06

Наличие такой радиальной компоненты магнитного поля приводит к когерентному сдвигу пучка от средней плоскости циклотрона. На Рис. 4 показан профиль вертикальной апертуры циклотрона, который определяется профилем магнитной и ускоряющей систем.

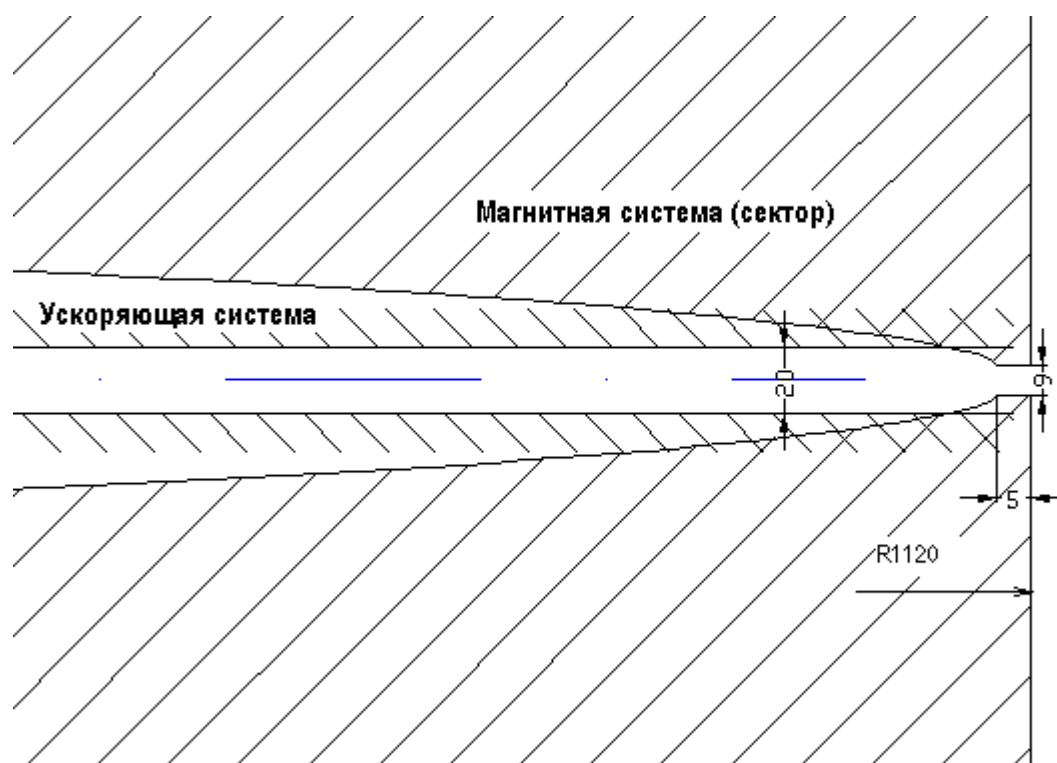


Рис. 4. Вертикальная апертура циклотрона С235

Оценивая сдвиг пучка от плоскости  $z=0$  на средних радиусах по формуле:

$$z = \frac{B_r r}{B_z Q_z^2}$$

где  $B_r=7$  Гаусс,  $r=0.7$ м,  $B_z=1.78$  Тесла,  $Q_z=0.2$ , получим что когерентное смещение пучка составит примерно 7мм, что при амплитуде свободных аксиальных колебаний в пучке ~2-3мм может приводить к потерям части пучка на дуантах даже на средних радиусах. На внешних радиусах ситуация может быть еще более критичной.

Чтобы оценить возможные вертикальные потери пучка, был проведен расчет ускорения пучка во всем диапазоне рабочих радиусов с учетом измеренной радиальной компоненты магнитного поля. На Рис. 5 показано вертикальное движение пучка в процессе ускорения.

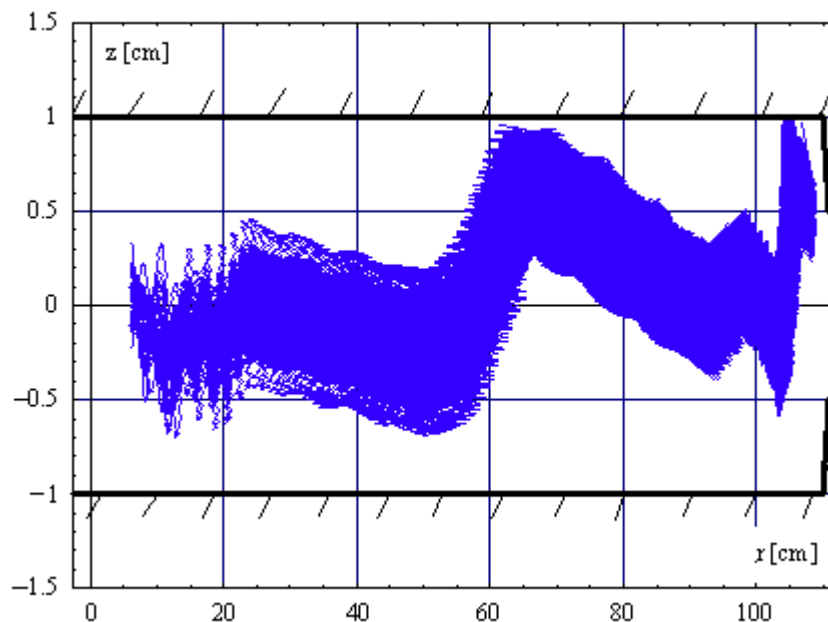


Рис. 5. Вертикальное движение пучка с учетом радиальной компоненты  $B_r$  (вертикальная координата частиц снималась через  $45^\circ$ )

Результаты расчета потерь частиц представлены на Рис 6.

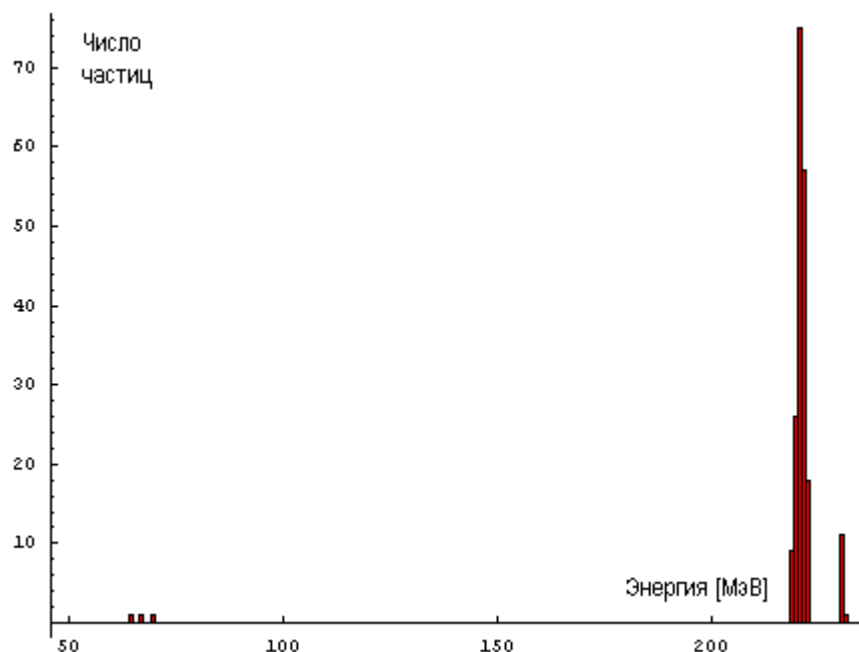


Рис. 6. Распределение потерянных частиц по энергиям

На основании расчетов, описанных в этой главе, можно заключить, что в исходном магнитном поле циклотрона можно ускорить пучок только до энергии  $\sim 220$  МэВ (радиус  $\sim 105$  см). Далее происходит полная потеря пучка по вертикали на дуанте, вызванная наличием средней радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости циклотрона. Возможны некоторые незначительные потери пучка на дуанте на радиусе  $\sim 70$  см.

Профиль рассчитанного вертикального движения пучка также совпадает с данными, полученными при измерениях положения пучка на азимуте  $66^\circ$  во всем диапазоне рабочих радиусов.

Для получения проектной энергии выведенных протонов 235 МэВ необходимо проведение шиммирования радиальной компоненты магнитного поля циклотрона.

**Четвертая глава** посвящена моделированию вывода пучка протонов из циклотрона С235.

В начале главы описано моделирование вывода пучка заряженных частиц из циклотронов при помощи электростатического дефлектора.

Система вывода С235 состоит из электростатического deflectора (параметры приведены в Таблице 1), корректора градиента магнитного поля и фокусирующего квадрупольного дублета на основе постоянных магнитов.

Таблица 1. Параметры электростатического deflectора

Азимутальная протяженность, °	30
Длина, м	0.58
Номинальный зазор, мм	4
Толщина септума, мм	0.1-3.0
Напряжение на высоковольтном электроде, кВ	70
Номинальная напряженность электрического поля, МВ/м	14
Максимальная напряженность электрического поля, МВ/м	17
Угловое отклонение пучка, мрад	19.2

Главная особенность ускорителя с точки зрения вывода пучка – очень малый вертикальный зазор (9мм) между секторами магнитной системы в районе границы полюса. У этого факта есть два основных следствия:

- электростатический deflectор может быть расположен только в долине магнитной системы циклотрона и ограничен по длине ее угловым размером;

- градиент магнитного поля в радиальном направлении, который испытывает на себе выводимый пучок, в районе границы полюса очень высок ( $\partial B_z / \partial r > 100$  Тесла/м).

Поверхности септума электростатического deflectора представляют собой части окружностей. Толщина примерно линейно нарастает с 0.1 мм на входе до 3.0 мм на выходе. Эта особенность вызвана конструктивным решением и, как покажут дальнейшие расчеты, вносит существенный вклад в количество потерь протонов при выводе пучка.

После выхода за границу полюса пучок попадает в область резко спадающего с радиусом магнитного поля. Здесь он испытывает сильную горизонтальную дефокусировку. Чтобы компенсировать это, постоянное по

радиусу магнитное поле, было создано в области прохождения пучка при помощи пассивного магнитного канала – корректора. Он выполнен в виде двух параллельных пластин сверху и снизу от средней плоскости циклотрона.

После выхода из области корректора пучок фокусируется дублетом квадрупольных линз, изготовленных на основе постоянных магнитов. Линзы расположены между основными обмотками магнитной системы циклотрона, расстояние между которыми – 100мм. Это расстояние мало для размещения здесь токовых квадрупольных линз. В качестве материала постоянных магнитов использовался  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

После прохождения дублета пучок попадает в линию транспортировки (см. Рис. 7), которая состоит из классических токовых квадруполой.

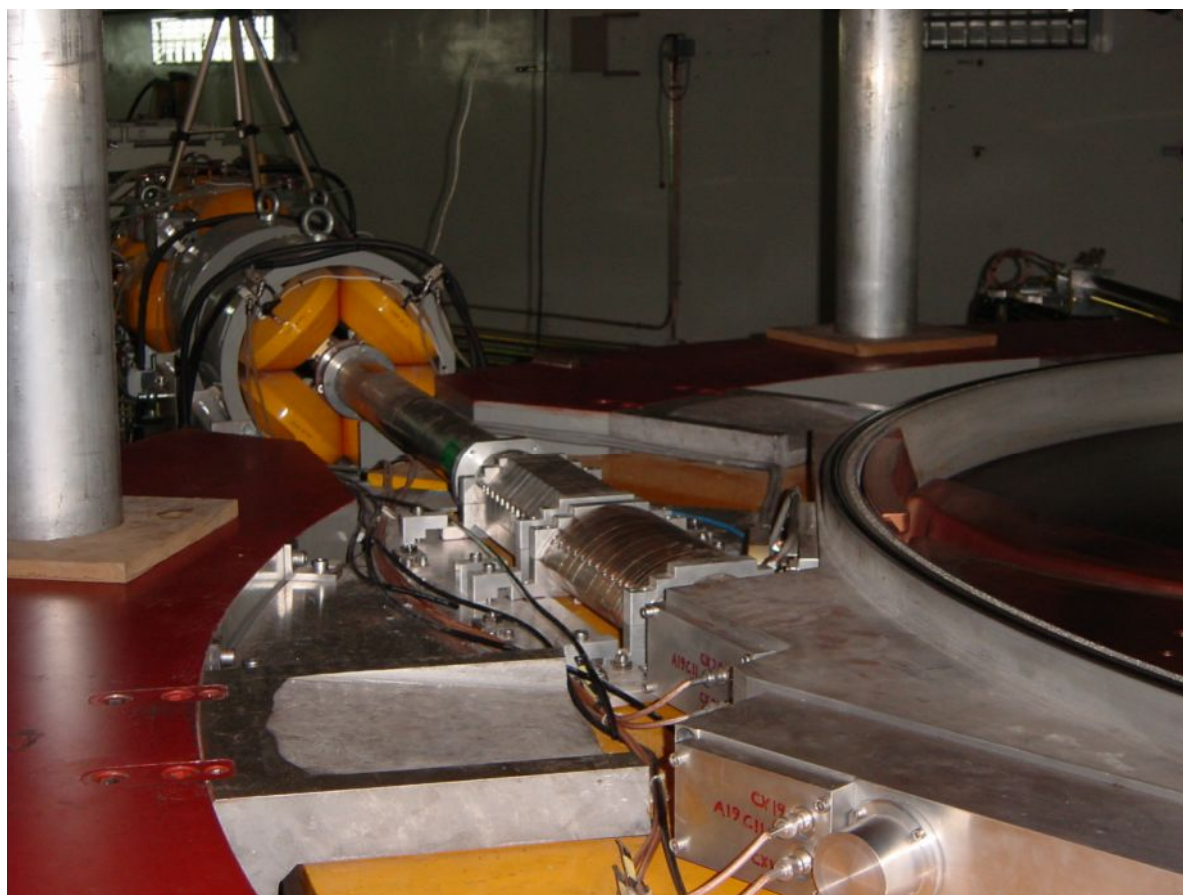


Рис. 7. Линия транспортировки пучка из циклотрона С235

Вывод протонов из С235 моделировался следующим образом: сначала был получен портрет пучка на входе в электростатический дефлектор, затем



моделировалось движение этих частиц с учетом действия отклоняющего поля дефлектора и полей элементов системы вывода. Такой расчет позволяет оценить эффективность выводной системы, т. е. рассчитать потери частиц при забросе в дефлектор на его торце и на боковых поверхностях (внутренних и со стороны циркулирующего пучка), а также на других элементах системы вывода. При этом возможно получить параметры пучка (поперечный размер и эмиттансы) перед системой транспортировки, что нужно для расчета последней. Затем движение пучка моделировалось внутри дефлектора и далее по системе вывода.

Потери пучка на торце септума составили  $\sim 10\%$ , а потери на его внешней поверхности (со стороны циркулирующего пучка) составили  $\sim 25\%$ . Причем, основное количество этих потерь происходит на первой трети длины септума (см. Рис. 8). Потери на внутренних поверхностях септума и высоковольтного электрода составили еще  $\sim 5\%$ .

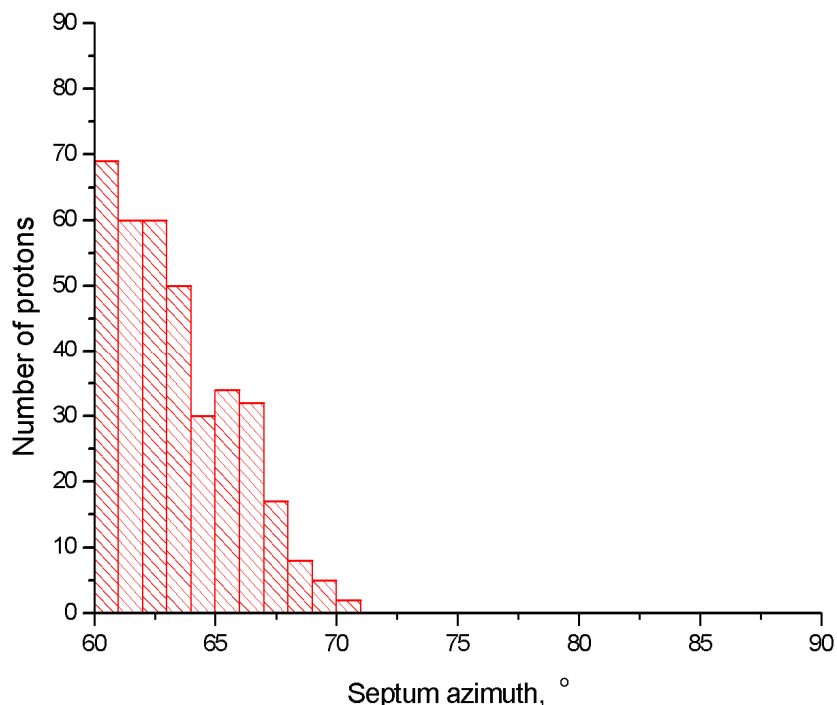


Рис. 8. Распределение потерянных на внешней поверхности септума частиц по его длине

Расчетным способом было показано, что если подобрать параметры окружностей, описывающих боковую геометрию септума, таким образом, чтобы минимум его толщины находился на расстоянии  $\sim 10$  см от входа, то потери со стороны циркулирующего пучка составят 8-10%.

Вместе с оптимизацией радиального положения входа и выхода из дефлектора это приведет к увеличению эффективности выводной системы до 80%.

Дефлектор с новой геометрией был изготовлен и испытан на одном из циклотронов С235 (С235 РАР-111 - изготовлен для медицинского центра в Орсей (Франция)). При этом удалось увеличить эффективность вывода с 60 до 77% (см. Рис. 9).

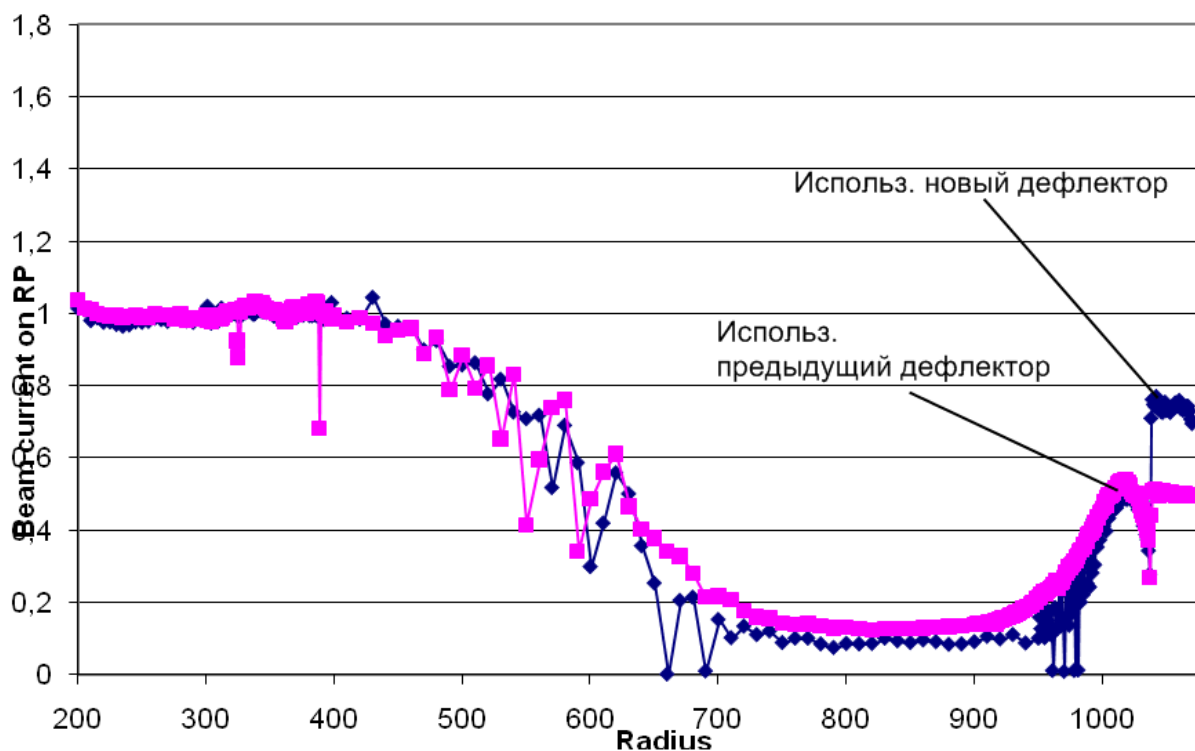


Рис. 9. Зависимость измеренной интенсивности тока пучка (нормирована на величину тока на радиусе 300мм) от радиуса в циклотроне С235 РАР-111 при использовании дефлекторов нового и предыдущего типов

Результаты моделирования вывода пучка протонов из циклотрона С235, описанные в главе, совпадают с экспериментальными данными полученными при настройке выводной системы: траектория выведенного

пучка с точностью до нескольких миллиметров совпадает с расчетной кривой.

**В пятой главе** кратко описываются основные результаты, полученные при использовании созданного автором пакета программ для расчета динамики пучков в других циклотронах.

Сначала – расчет динамики пучка протонов в циклотроне для лучевой терапии С220р, проект которого разрабатывается в настоящий момент в Отделе новых ускорителей ОИЯИ. Показана возможность ускорения и вывода протонов в расчетном магнитном поле, а также сформулированы требования к параметрам выводной системы циклотрона.

Далее описано моделирование ускорения пучка протонов в циклотроне на энергию 8 МэВ, создаваемого на базе модели магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК. На основании этих расчетов определена геометрия центральной области циклотрона, а также оценена эффективность выводной системы, использующей электростатический дефлектор.

В конце главы кратко описываются результаты расчетов вывода двух пучков – углеродного с энергией 400 МэВ/нуклон и протонного с энергией 260 МэВ из сверхпроводящего циклотрона С400.

Разрабатываемый фирмой ИВА совместно с сотрудниками ЛЯП ОИЯИ сверхпроводящий изохронный циклотрон С400 предназначен для ускорения пучков ионов с отношением заряда к массе равным 0.5. Предполагается ускорять ионы  $^{12}\text{C}^{6+}$  (до 400 МэВ/нуклон), а также  $\text{H}_2^+$  (до 260 МэВ/нуклон). Ионы углерода предполагается выводить при помощи электростатического дефлектора, протоны – при помощи обдирочной фольги.

Вид в плане на рассчитанные траектории обоих выводимых пучков в магнитном поле циклотрона представлен на Рис. 10.

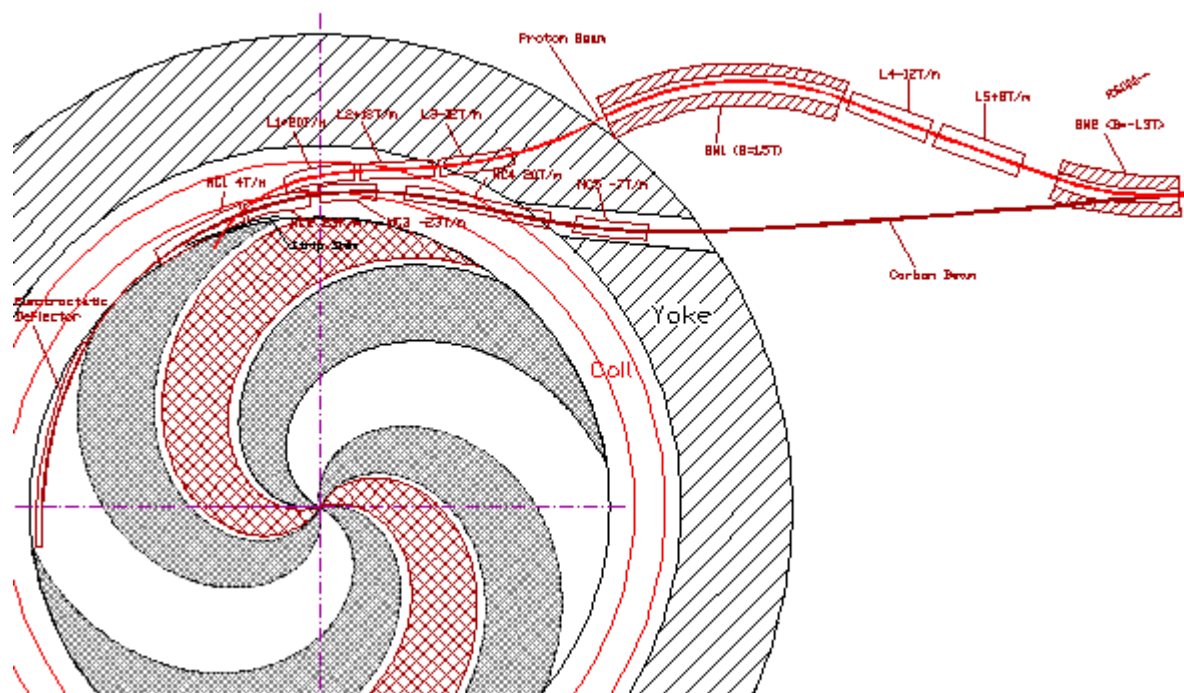


Рис. 10. Вид в плане на выводимые из циклотрона С400 углеродный и протонный пучки

Следует отметить, что данный циклотрон проектируется по подобию существующего проекта С235. Магнитная система броневого типа имеет 4-х секторную спиральную структуру. Эллиптический зазор в холмах уменьшается от нескольких сантиметров в центре до 12мм – на радиусе вывода.

Таким образом, в С400, как и в С235 существуют достаточно жесткие требования на наличие радиальной компоненты магнитного поля в зоне вывода.

Учитывая результаты расчетов ускорения пучка в циклотроне С235 Р06, описанные выше, магнитная система С400 разрабатывается таким образом, чтобы на радиусах вывода пучка бетатронная частота вертикальных колебаний была близка к 0.5 [36]. За счет этого частично снижена чувствительность машины к присутствию компоненты ошибок магнитного поля в средней плоскости циклотрона на радиусах вывода.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Создан набор программ для ЭВМ, позволяющий рассчитать динамику пучка и вывод заряженных частиц из циклотрона, с учетом возмущений магнитного поля.

2. Выявлены опасные резонансы, которые пучок протонов пересекает в процессе ускорения в циклотроне С235 Р06, а также сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля ускорителя.

3. Проведено моделирование ускорения протонов в циклотроне С235 Р06, используя данные измерений вертикальной и радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости ускорителя. Показано, что в исходном магнитном поле можно ускорить пучок протонов только до энергии ~220 МэВ, а для достижения проектной энергии 235 МэВ необходимо провести шиммирование радиальной компоненты магнитного поля.

4. Сделан вывод, что основной причиной потерь во время ускорения в циклотронах-С235 является вероятное наличие радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости ускорителя.

5. На основании полного анализа динамики пучка в С235 Р06 даны рекомендации по изменению магнитной системы циклотрона для уменьшения чувствительности ускорителя к искажениям медианной плоскости, возникающим в результате неточностей изготовления и сборки магнитной системы.

6. Сделаны рекомендации по улучшению геометрии электростатического дефлектора, используемого в выводной системе циклотронов-С235. Их реализация позволила увеличить эффективность вывода с 60 до 77%.

8. Сформулированы требования на величины фокусирующих градиентов и поперечные апертуры элементов, входящих в системы вывода ионов углерода и протонов в сверхпроводящем циклотроне С400, а также оптимизировано их геометрическое расположение.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. 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
2. L. M. Onischenko, Yu. G. Alenitsky, A. A. Glazov et al, "Development of the compact cyclotron for explosives detection by nuclear resonance absorption of gamma rays in nitrogen", proceedings of RUPAC, 2004, p.138-140.
3. Y. Jongen, D. Vandeplassche, P. Cohilis, "High Intensity Cyclotrons for Radioisotope Production, or the ComeBack of the Positive Ions", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 115-119.
4. Y. Jongen et al, "The proton therapy system for the NPTC", 4<sup>th</sup> European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, Zurich, 1995
5. W. Kleeven, M. Abs, J. C. Amelia et al, "Self-extraction in a Compact High-Intensity H<sup>+</sup> Cyclotron at IBA", Proc. of EPAC 2000, Vienna, Austria.
6. G. Cianova, L. Calabretta et al, "New Design Issues of the EXCYT Project", Proc. of EPAC'96.
7. L. Calabretta, G. Cuttone, M. Re, D. Rifuggiato, M. Maggiore, "LNS Catania Project For Therapy and Radioisotope Production", Proc. of Cyclotrons'2004, Tokyo, Japan.
8. B. N. Gikal et al, "Project of the DC-60 Cyclotron with Smoothly Ion Energy Variation for Research Center at L. N. Gumilev Euroasia State University in Astana (Kazakhstan)", Proc. of the Cyclotrons'2004, Tokyo, Japan.
9. Chengjie Chu, Junqing Zhong, Tianjue Zhang et al, "Preliminary Structure Design of the Main Magnet for the 100 MeV Cyclotron", Proc. of the Cyclotrons'2004, Tokyo, Japan.
10. Y. Jongen et al, "Design Studies of the Compact Superconducting Cyclotron for Hadron Therapy", Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.

11. M. Schillo et al, "Compact Superconducting 250 MeV Proton Cyclotron for the PSI PROSCAN Therapy Project", Proc. of the 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Cycl. And Their Applications, East Lansing 2001, p. 37-39.
12. T. S. Duh, W. J. Lin, L. H. Chen, G. Ting, Y. K. Fu, "The current Status and Future Prospects of TR 30/15 H-/D- Cyclotron Facility at Iner in Taiwan", Proc. of the Cyclotrons'2004, Tokyo, Japan.
13. Y. Jongen, W. Kleeven, S. Zaremba, "New Cyclotron Developments at IBA", Proc. of the Cyclotrons'2004, Tokyo, Japan.
14. Seung Hwan Shin, "Design of a magnet and measurement of magnet field and study of central region design for 13 MeV PET cyclotron", APAC 2004, Gyeongju, March 2004.
15. Terry Jones, "Operation of PET Cyclotron for Medical Imaging", EPAC'96.
16. Jong-Seo Chai, Yu-Seok Kim, Tae Keun Yang et al, "Development and Status Report of Medical Cyclotron at KIRAMS", ", APAC 2004, Gyeongju, March 2004.
17. Y. S. Kim, Dong Hyun An, Jong Seo Chai et al, "New Design of the KIRAMS-13 Cyclotron for Regional Cyclotron Center", Proc. of APAC 2004, Gyeongju, Korea.
18. Cyclotron Data Sheets", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 769-771.
19. Cyclotron Data Sheets", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 771.
20. W. Beekman, A. Laisne, Y. Jongen, D. Vandeplassche, S. Zaremba, J. C. Amelia, G. Lannoye, "C235 IBA-SHI Protontherapy Cyclotron for the NPTC Project: Magnetic System Design and Construction", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 218.

21. W. Beekman, M. Schuwer, D. Vandeplassche, S. Zaremba, J. C. Amelia, G. Lannoeye, "C235 IBA-SHI Protontherapy Cyclotron for the NPTC Project: Progress Report of the Magnetic Field Mapping and Shimming", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 222.
22. D. Vandeplassche, S. Zaremba, W. Beekman, Y. Jongen, J. C. Amelia, G. Lannoeye, "C235 IBA-SHI Protontherapy Cyclotron for the NPTC Project: On Beam Dynamics Issues", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa, 1995, World Scientific Publisher, p. 454.
23. Y. Jongen, W. Kleeven, S. Zaremba, D. Vandeplassche, W. Beekman, V. S. Aleksandrov, G. A. Karamysheva, N. Yu. Kazarinov, I. N. Kian, S. A. Kostromin, N. A. Morozov, E. V. Samsonov, G. D. Shirkov, V. F. Shevtsov, E. M. Syresin, "Design Studies of the Compact Superconducting Cyclotron for Hadron Therapy", Proc. Of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.
24. А. Т. Василенко, А. А. Глазов, В. П. Джелепов, В. П. Дмитриевский, Ю. Н. Денисов, В. И. Замолотчиков, Н. Л. Заплатин, В. В. Калиниченко, В. В. Кольга, Д. Л. Новиков, Л. М. Онищенко, Н. И. Полумордвинова, Е. В. Самсонов, П. Т. Шишлянников. ОИЯИ, Е9-8443, Дубна, 1974.
25. В. П. Дмитриевский, В. В. Кольга, Н. И. Полумордвинова, Материалы рабочего совещания по циклотрону У-120М. ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971.
26. N. Hazewindus et al, "The Magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central Region", NIM, 118(1974), p.125
27. M. M. Gordon, "Computation of Closed Orbits and Basic Focusing Properties for Sector-focused Cyclotrons and the Design of "Cyclops", Particle Accelerators, 16(1984), p. 39-62
28. W. Joho, in Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Cyclotron Conference, Oxford, England, 1969, edited by R. W. McIlroy (Butterworths, London, 1971), p. 159
29. S. S. Tomic, E. V. Samsonov, "Analytical description of stripping foil extraction from isochronous cyclotrons", Phys Rev E.65.036504



30. 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
31. 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
32. Ю. Г. Аленицкий, С. А. Костромин, Н. Л. Заплатин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов Циклотрон для лучевой терапии С220p (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
33. 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'06. Edinburgh, 2006
34. 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
35. 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 2004, Novosibirsk, 2004
36. Y. Jongen, D. Vandeplassche, S. Zarembo, G. Karamysheva, N. Morozov, E. Samsonov Computer Modeling of Magnetic System for C400 Superconducting Cyclotron, EPAC'06. Edinburgh, 2006

## СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Yu. G. Alenitsky... S. A. Kostromin et al. Cyclotron for beam therapy application, RuPAC 2004, Dubna, 2004. p.162-164
2. Ю. Г. Аленицкий... С. А. Костромин и др. Циклотрон для лучевой терапии // Прикладная физика. 2005. № 5. С.50-54
3. Ю. Г. Аленицкий, С. А. Костромин и др. Циклотрон для лучевой терапии С220р (магнитная система) // Материалы 11-го международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 2005. С. 228-232
4. С. А. Костромин и др. 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
5. 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'06. Edinburgh, 2006
6. Y. Jongen... S. A. Kostromin et al. Design Studies of the Compact Superconducting Cyclotron for Hadron Therapy, EPAC'06. Edinburgh, 2006
7. Y. Jongen... S. A. Kostromin et al. Simulation of Ions Acceleration and Extraction in Cyclotron C400, EPAC'06. Edinburgh, 2006
8. Yu. G. Alenitsky, S.A. Kostromin et al, L.M. Onischenko, E.V. Samsonov Specialized Cyclotron for Beam Therapy Application, RuPAC 2006, Novosibirsk
9. Ю. Г. Аленицкий, С. А. Костромин и др. Протонный циклотрон для лучевой терапии, XX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 2007г., Алушта, Крым
10. Y. Jongen... S. Kostromin et al, Simulation of Two Beams Extraction from Superconducting Cyclotron C400, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy, 2007

11. Y. Jongen... S. Kostromin et al. Simulation of Extraction Magnetic Elements For C400 Superconducting Cyclotron, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy, 2007
12. Y. Jongen... S. Kostromin et al IBA C400 Cyclotron Project For Hadron Therapy, CYCLOTRONS 2007, Giardini Naxos, Italy, 2007
13. G. Karamysheva, S. Kostromin, Beam dynamics study in the C235 cyclotron for proton therapy// Письма в ЭЧАЯ, т. 6, вып. №1, 2009