

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 621.384.633

**Карамышев
Олег Владимирович**

**Динамика низкоэнергетического пучка при инжекции в
циклические ускорители и накопители**

Специальность 01.04.20

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук
Глазов Алим Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Денисов Юрий Николаевич

кандидат физико-математических наук
Полозов Сергей Маркович

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

Защита состоится « ____ » июля _____ 2011 г. в « ____ » часов на
заседании диссертационного совета Д720.001.03 в Объединенном институте
ядерных исследований, расположенном по адресу: 141980, Моск. обл.,
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

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

Автореферат разослан « 31 » мая _____ 2011 г.

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

Ю. А. Батусов

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Ускорители заряженных частиц являются незаменимыми приборами для фундаментальных исследований и находят все более широкое применение в прикладных исследованиях, медицине и промышленности. Непрерывно развивающиеся и совершенствующиеся технологии, применяемые в ускорительной технике, позволяют создавать компактные и относительно недорогие установки, благодаря чему востребованность и экономическая обоснованность широкого практического применения ускорителей постоянно возрастает.

С развитием вычислительной техники все больше расчетно-теоретических исследований в ускорительной физике совершаются в ходе численного моделирования на компьютере. Высокая производительность современных компьютеров, в том числе персональных, позволяет моделировать самые сложные процессы, зная по каким законам физики они развиваются, а относительная дешевизна компьютерного моделирования создает возможность оптимизации той или иной системы ускорительной установки, проводя расчеты огромного количества различных вариантов моделей с целью выбора наиболее оптимальных, как по физическим задачам, так и с учетом экономических факторов.

Следует подчеркнуть, что создание ускорителя включает в себя целый комплекс расчетных, технических и конструкторских решений по выбору систем ускорителя и его параметров. Однако основополагающим при разработке ускорителя и его систем является определение базовых параметров, геометрии структуры, детальное вычисление электромагнитного поля в области, где происходит движение частиц, и адекватное моделирование динамики пучка с учетом различных эффектов, как, например, пространственного заряда пучка или потерь частиц на взаимодействие с остаточным газом.

Таким образом, неотъемлемой частью проектирования любого нового современного ускорителя и систем инжекции – вывода является изучение динамики частиц и оптимизация параметров соответствующих систем с учётом результатов, полученных из модельных расчетов.

Особенную актуальность работе придает тот факт, что ускорители, для которых рассматриваются системы инжекции – это в основном циклотроны, предназначенные для медицинских применений, в частности сверхпроводящий циклотрон С400 (ИВА, Бельгия) [1] будет ускорять ионы углерода до энергии 400 МэВ/н, достаточной для лечения онкологических заболеваний. В настоящее время все существующие для этой цели ускорители – это синхротроны, первый в мире медицинский циклотрон С400, производящий ускоренные ионы углерода нужной энергии, позволит существенно удешевить медицинский комплекс, сделав лечение ионами углерода более доступным.

Другие циклотроны, центральные области которых моделировались в работе, также предназначены для медицинских применений:

- циклотрон ЦИТРЕК [2] (Дубна, Россия) – первый в мире промышленный циклотрон, предназначенный для наработки трековых мембран, из которых изготавливают фильтры для плазмофереза,
- С235(ИВА, Бельгия) [3] – протонный циклотрон, новая версия которого разрабатывалась и в ближайшее время будет отлаживаться и запускаться в ОИЯИ, с тем чтобы в дальнейшем работать в медицинском центре в г. Димитровграде. Циклотрон С235 будет ускорять протоны, на пучках которых будут осуществлять лечение онкологических больных.

В свете выше изложенного выполнение расчетов динамики низкоэнергетического пучка для проектов инжекции в ускорительные комплексы различного назначения, а также оптимизация параметров систем

инъекции на основании полученных данных является актуальной задачей и основной целью диссертационной работы.

Научная новизна:

Разработана схема центра создаваемого уникального сверхпроводящего циклотрона С400 (ИВА, Бельгия). Выбраны параметры инфлектора, точное положение и геометрия электродов, диафрагм. В результате расчетная эффективность захвата в ускорение небанчиванного пучка ионов составила 12 % при ограничении на амплитуду радиальных колебаний 4 мм, что превосходит существующий показатель эффективности работающих сверхпроводящих циклотронов.

Определены границы применимости электростатического приближения при расчетах конфигурации ускоряющего электрического поля в центре циклотрона. Показано, что для создаваемого циклотрона С400 различие в кривых амплитуд напряжения, полученных в электростатическом приближении и в результате высокочастотного анализа, позволяет производить расчет центра до радиуса 5 см с точностью более 95 % в электростатическом приближении.

Впервые в численном эксперименте продемонстрирована возможность модулирования интенсивности пучка при помощи инфлектора, при изменении напряжения на электродах, что позволяет реализовать новый перспективный метод протонной терапии в циклотроне с внешней инъекцией на основе активного сканирования объекта облучения пучком переменной интенсивности с частотой до 1 кГц.

Впервые создана компьютерная модель спирального электростатического инфлектора, с очень большим параметром спиральности ($\text{tilt}=3$), способного инжектировать пучок в сверхпроводящий синхроциклотрон с величиной среднего поля в центре 4.5 Т.

Разработана структура и оптимизированы параметры линии инъекции пучка антипротонов с ультранизкой начальной энергией 150 эВ,

проводящей пучок низкой интенсивности без потерь из ловушки антипротонов в накопительное кольцо.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные в ней результаты будут использованы при изготовлении уникального сверхпроводящего циклотрона С400, работы по созданию которого начались осенью 2010 года, а пуск планируется осуществить не позднее 2017 года в рамках проекта Archade в медицинском центре г. Канн, Франция.

Ионы неона были успешно ускорены в циклотроне ЦИТРЕК. Ускорение ионов криптона на циклотроне ЦИТРЕК улучшит качество производимых на ускорителе трековых мембран и существенно расширит область их применения.

С учетом результатов расчетов динамики пучка антипротонов проектируется линия инжекции в кольцо AD-REC [4].

Модели и методики расчётов, созданные в настоящей работе, могут быть использованы в дальнейшем при разработке новых проектов ускорителей в широком диапазоне их возможного применения.

Достоверность.

Модели и результаты расчетов, изложенные в настоящей диссертации в связи с разработкой сверхпроводящего циклотрона С400, были составной частью международной экспертизы проекта С400. Проекту ускорителя была дана высокая оценка, он был одобрен и рекомендован к реализации.

Результаты расчетов траекторий пучка частиц в центре циклотрона С235 и ЦИТРЕК соответствуют экспериментальным данным, что подтверждает адекватность разработанных в диссертации моделей экспериментальным условиям и позволяет осуществлять ускорение новых сортов ионов. Ионы неона были успешно ускорены в циклотроне ЦИТРЕК.

Расчеты линии транспортировки из ловушки MUSASHI[5], проведенные по программам автора диссертации, показали качественное соответствие экспериментальных данных с расчетными предсказаниями.

Апробация работы.

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, были представлены на семинарах по ускорителям ЛЯП ОИЯИ, на Всероссийских и Международных конференциях и совещаниях:

19th International Conference on Cyclotrons and their Applications, CYCLOTRONS'10, Lanzhou, China, 2010.

XXII Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2010, Протвино, Россия, 2010.

Third workshop on accelerator science and technology, QUASAR and THz Groups, 2010, Germany.

Конференции молодых учёных и специалистов ОМУС 2011, Дубна, Россия.

Third DITANET School on Beam Diagnostics, Stockholm University, Stockholm, Sweden, 2011.

Particle Accelerator Conference (PAC'11), New York, USA.

10th international conference on Low Energy Antiproton Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada, 2011.

Результаты, представленные в диссертации, получены самим автором, либо при его непосредственном участии.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- оригинальная конфигурация и компоновка элементов центральной инжекционной части создаваемого уникального сверхпроводящего циклотрона С400, предназначенного для лечения онкологических заболеваний пучками протонов и ионов углерода.
- метод модулирования интенсивности выведенного пучка при помощи инфлектора, за счет изменения напряжения на электродах, позволяющий реализовать новый перспективный метод протонной терапии на основе активного сканирования

объекта облучения пучком переменной интенсивности с частотой до 1 кГц.

- границы применимости электростатического приближения при проведении расчетов конфигурации ускоряющего электрического поля в центре циклотрона.
- параметры ускорения ионов криптона в циклотроне ЦИТРЕК с зарядностью ниже проектной.
- модель спирального электростатического инфлектора с очень большим параметром спиральности ($\text{tilt}=3$), позволяющего осуществить инжекцию пучка в сверхпроводящий синхроциклотрон с величиной среднего поля в центре 4.5 Т.
- по результатам расчетов динамики пучка антипротонов из ловушки MUSASHI по существующей линии транспортировки было доказано, что она не удовлетворяет требованиям к линии инжекции в кольцо AD-REC, показана необходимость замены существующей линии на новую, не допускающую увеличения эмиттанса пучка.
- новая компоновка и параметры линии инжекции пучка антипротонов с ультранизкой начальной энергией $150 \div 500$ эВ в кольцо AD-REC.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, содержит 123 страницы, 96 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 49 наименований.

Публикации.

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в реферируемых журналах.

В 2010 году за цикл публикаций по разработке проекта сверхпроводящего циклотрона С400, предназначенного для адронной терапии, в составе коллектива автор был удостоен премии ЛЯП ОИЯИ.

Содержание диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

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

В первой главе рассмотрены основы математического моделирования динамики заряженных частиц низкой энергии при инжекции в циклические ускорители и накопители. Представлено описание авторской программы, применяемой для расчетов.

Программа DYN [6,7] написана в пакете Matlab и состоит из ряда блоков (подпрограмм), предназначенных для решения различных задач проектирования систем ускорителя. В виде подсистем оформлены блоки задания начальных параметров, таких как координаты и скорости частиц, их энергия, фаза. Отдельными подсистемами оформлены также программы, рассчитывающие потери ионов на перезарядку на остаточном газе [8], имеется блок статистической обработки полученных результатов, осуществляющий расчёт эмиттансов пучка, частот бетатронных колебаний.

При расчетах динамики низкоэнергетического пучка очень важно использовать результаты численных расчетов электромагнитных полей, так как эффекты краевых полей вносят существенный вклад в движение заряженных частиц. Программа DYN может использовать результаты расчетов электромагнитного поля в OPERA, Comsol, CST Studio или ANSYS.

Вторая глава посвящена расчетам центральных областей циклотронов: протонного медицинского циклотрона C235 (IBA, Бельгия), сверхпроводящего медицинского ускорителя C400 (IBA, Бельгия), циклотрона ЦИТРЕК и сверхпроводящего синхроциклотрона с полем 4.5 Т.

Основной целью расчетов центра циклотрона C235 был анализ динамики пучка, который проводился с целью определения причин потерь ионов в процессе ускорения [3]. Также немаловажным являлась

возможность проверки метода расчета экспериментальными результатами движения пучка в реально работающем циклотроне. Была создана компьютерная модель центра циклотрона и проведен расчет движения пучка на протяжении первых оборотов. Сравнение положения затемнений на противодуантных рамках и дуантах, вызванных прохождением пучка на фотографии центра циклотрона, и расчетной траектории центральной частицы, убеждает в правильности расчета.

Большую часть второй главы составляют расчеты связанные с аксиальной инжекцией пучка в центр циклотрона С400 посредством спирального электростатического инфлектора.

В последние годы в рамках сотрудничества ИВА - ОИЯИ группой сотрудников ОИЯИ был разработан проект компактного сверхпроводящего изохронного циклотрона С400 [1, 9, 10] для адронной терапии (*Рис. 1*), который будет установлен в медицинском центре в Канне, Франция.

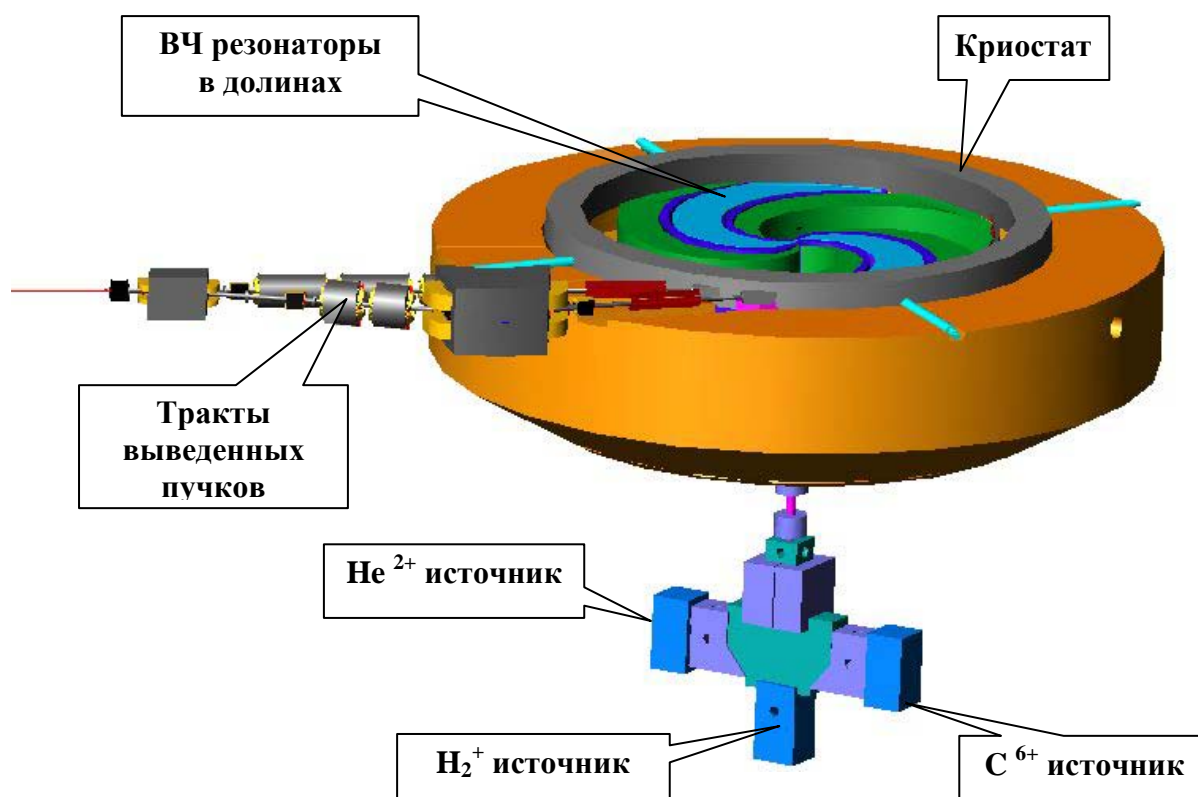


Рис. 1. Общий вид циклотрона С400

Циклотрон предназначен для ускорения пучков ионов с отношением заряда к массе равным 0.5. Предполагается ускорять $^{12}\text{C}^{6+}$ и $^4\text{He}^{2+}$ ионы до энергии 400 МэВ/нуклон, а также H_2^+ ионы до энергии 260 МэВ. Магнитная система циклотрона броневого типа имеет четырехсекторную структуру. Циклотрон имеет диаметр 6.9 м, его вес составляет 660 т.

$^{12}\text{C}^{6+}$, $^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ ионы получают с помощью ЭЦР источников, расположенных ниже циклотрона. Пучок инжектируется в центр циклотрона при помощи спирального инфлектора.

Ускоряющая высокочастотная система [11,12] циклотрона С400 состоит из двух связанных резонаторов, размещенных в противоположных долинах магнита.

Вывод протонов будет производиться обдиркой ионов молекулярного водорода H_2^+ на фольге. Вывод пучка ионов углерода будет осуществляться посредством одного электростатического дефлектора, который расположен в долине между секторами. Пучки протонов и ионов углерода будут выводиться по отдельным каналам, соединяясь на расстоянии примерно 6 м от центра циклотрона.

Работа автора диссертации по циклотрону С400 заключалась в основном в адаптации программы, разработке методики и моделировании динамики пучка при прохождении центральной области циклотрона.

Расчеты центра циклотрона особенно важны при разработке ускорителя с внешней инжекцией пучка. Основу подобных расчетов составляет моделирование инфлектора и геометрии центрального района, включающую геометрию “носиков” дуантов, корпуса инфлектора и диафрагм фазовой селекции.

При проектировании центра сверхпроводящего циклотрона С400 выдвигались высокие требования, как к эффективности центра, так и к качеству пучка на выходе из центральной области.

В первую очередь необходимо было обеспечить хорошую центрированность пучка и небольшую амплитуду радиальных бетатронных

колебаний ($<4\text{мм}$). Ограничение на амплитуду радиальных колебаний связано с тем, что в процессе ускорения до энергии 400 МэВ/н , пучок пересекает ряд резонансов (в частности резонанс $3Q_r=4$), прохождение через которые может привести к потерям пучка. С необходимостью хорошей центрированности пучка связана возможность осуществления модулирования интенсивности пучка при помощи инфлектора для реализации нового перспективного метода протонной терапии в циклотроне с внешней инжекцией на основе активного сканирования объекта облучения пучком переменной интенсивности.

Высокая эффективность центра позволит отказаться от использования банчера, что, безусловно, важно, так как в медицинском ускорителе необходимо минимизировать количество настраиваемых параметров и стоимость установки.

Таким образом, для уникального медицинского ускорителя, с рекордной для компактных циклотронов энергией ускоренного пучка ионов, необходимо было спроектировать центр циклотрона, отвечающий целому ряду высоких требований.

Для инжектирования пучка в точку, определенную из расчета равновесной орбиты, была создана модель инфлектора и разработана геометрическая модель центральной области (см. *Рис.2*).

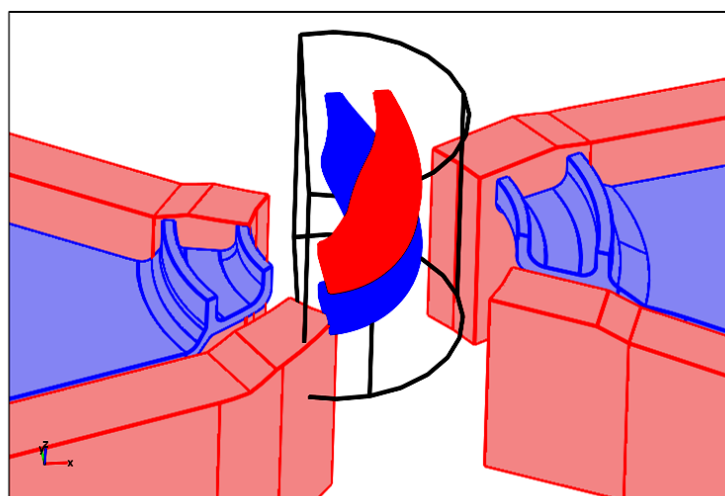


Рис. 2. Модель центра циклотрона с инфлектором в заземленном корпусе

Как правило, аксиальная фокусировка в центре не может быть обеспечена только азимутальной вариацией магнитного поля. Для обеспечения аксиальной фокусировки в центре циклотронов создают бамп, отрицательный радиальный градиент среднего поля должен фокусировать пучок по вертикали. Величина бампа в циклотроне С400 составляет около 200 Гс. На радиусе ~ 8 см бамп заканчивается, и среднее поле формируется равным изохронному.

В центре особенно важна электрическая фокусировка, как правило, она “работает” первые 2-3 оборота. Для того чтобы электрическая (аксиальная) фокусировка оказывала свое действие частицы должны попадать в ускоряющий зазор в нужной фазе. Таким образом, если рассматривать непрерывный, то есть небанчируемый (несгруппированный) пучок, то уже первый зазор будет отбирать частицы в нужном фазовом диапазоне, так как частицы с “неправильными” фазами будут потеряны.

Результаты расчетов непрерывного пучка показали, что при использовании двух диафрагм эффективность инъекции небанчируемого пучка достигнет 12 % (при условии, что амплитуды радиальных колебаний не превышают 4мм), что соответствует фазовой протяженности захваченного в ускорение пучка - 43° ВЧ. Такой пучок будет ускоряться в дальнейшем без потерь. При использовании банчера эффективность инъекции будет увеличена в 2-3 раза, и составит не менее 25%.

Обычно эффективность центра циклотрона (без банчера) не превышает 10%, например, в циклотроне ДЦ 60 (ЛЯР, ОИЯИ) эффективность центра составила 5% [13], в сверхпроводящем циклотроне LNS К-800 (Катанья, Италия) – 9% [14]. Эффективность центра циклотрона зависит от многих обстоятельств, например, от интенсивности ускоряемого пучка, от требования на амплитуду радиальных колебаний, от уровня среднего поля, поэтому сравнивать эффективности центральных областей разных циклотронов не всегда корректно. Правильнее сравнивать циклотроны одного класса. Проект компактного сверхпроводящего циклотрона С400

уникален, в мире разрабатывается еще один аналогичный проект в Корее KIRAMS-430 [15], однако он находится на более ранней ступени проработки.

Следует отметить, если в расчете применялась не карта магнитного поля с отрицательным радиальным градиентом среднего поля, а постоянное на любом радиусе и азимуте магнитное поле с индукцией 2.45 Т, то количество ионов, захваченных в процесс ускорения, не менялось. Из чего можно сделать вывод: ни отрицательный радиальный градиент, ни азимутальная вариация магнитного поля не оказывает заметного влияния на аксиальную фокусировку пучка. Магнитное поле с бампом обеспечивает смещение фазы ионов с запаздывающей на 30-35°ВЧ на первом обороте на 0° в конце центральной области ($R=8$ см), где действие электрической фокусировки заканчивается и начинается изохронный режим ускорения. Именно для обеспечения сдвига фазы и полезен в центре циклотрона бамп магнитного поля высотой примерно 200 Гс.

Главная цель проведения численных расчетов высокочастотных резонаторов связана с решением конструктивных задач, а именно, определение геометрии резонатора, обеспечивающей необходимую частоту, оценка прочности конструкции, выбор требований к системе охлаждения. Однако, моделирование резонатора нужно осуществлять также для получения карты электрического поля, необходимой для последующих расчетов динамики пучка. Только используя карту ускоряющего поля, можно рассчитывать на высокую точность расчетов динамики пучка. Обычно карта ускоряющего поля в центре циклотрона рассчитывается в электростатическом приближении. Очевидно, что это приближение приемлемо, при условии постоянства амплитуды напряжения на ускоряющем электроде вдоль радиуса (разумеется, только в моделируемом центре). Насколько это приближение соответствует действительности, можно узнать, осуществляя численные расчеты резонатора, используя два подхода:

- электростатическое приближение,
- высокочастотный расчет.

Геометрическая модель (см. *Рис. 3*) резонатора сверхпроводящего циклотрона С400 была разработана в CST MICROWAVE STUDIO [16]. Следует отметить, что расчеты ВЧ резонаторов требуют больших ресурсов компьютера, поэтому часто приходится упрощать модель, например, не прорисовывать важные при расчетах центра ограничители (посты). Расчеты в электростатическом приближении позволяют задавать только часть резонатора, приходящуюся на центр, поэтому существенно экономят ресурсы компьютера, проще говоря, расчет идет быстрее, что позволяет усложнить модель, в частности задать точную геометрию “носиков” дуантов. Для сравнения обоих подходов был проведен высокочастотный и электростатический расчет одной и той же модели резонатора. По результатам расчета были построены зависимости ускоряющего напряжения от радиуса. Графики представлены на *Рис. 4*, где сплошная линия получена из электростатического расчета, а штриховая – из высокочастотного.

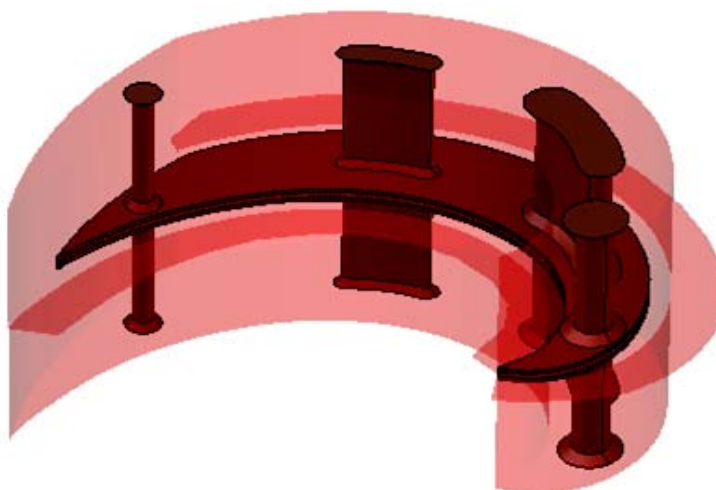


Рис. 3. Компьютерная модель резонатора

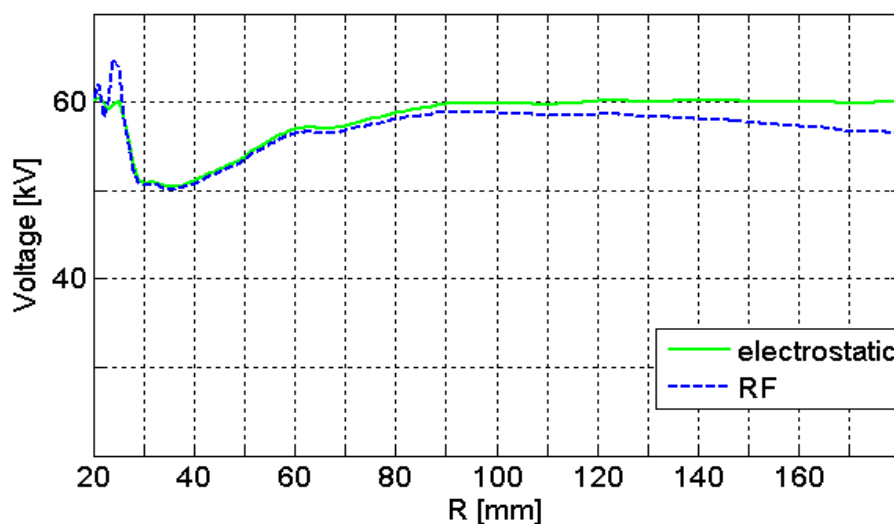


Рис. 4. Зависимость напряжения ускоряющего поля от радиуса

На рисунке практически не заметно разницы в величине напряжения вплоть до радиуса $R = 5-6$ см, то есть, проводя расчеты «малого центра», а это обычно R меньше 6-8 см лучше использовать электростатическое приближение, однако при переходе на большие радиусы, для расчетов ускоряющего электрического поля необходим высокочастотный анализ.

Задача модулирования интенсивности пучка циклотрона с внешней инъекцией можно решать изменением фазы напряжения на банчере, однако в связи с невысокими требованиями к интенсивности пучка для лечения онкологических заболеваний, применение банчера циклотроне С400 может оказаться излишним, поэтому была проанализирована возможность использования для этой цели изменения напряжения на инфлекторе. Расчеты показали, для того чтобы уменьшить интенсивность пучка до нуля требуется уменьшение напряжения на 12%. При этом отсутствовали потери на нижнем электроде инфлектора. Можно добиться такого же результата, увеличивая напряжение, но для этого потребуются существенно большее изменение напряжения – 40 %, что очевидно нежелательно.

Уменьшение напряжения приводит не только к изменению вертикального движения пучка, но и радиального. Однако, как показали расчеты, изменение радиального движения вызывает в сформированном центре циклотрона изменение амплитуды радиальных колебаний менее чем на 1 мм.

Оценка эффективности центра циклотрона ЦИТРЕК

Для сравнительной оценки качества формирования центра циклотрона С400 автором был проведен анализ эффективности центра циклотрона ЦИТРЕК, являющегося базовой установкой облучательного комплекса «Альфа».

Комплекс «Альфа», предназначенный для облучения полимерных пленок, используемых в производстве трековых мембран, необходимых для производства разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения, был разработан и изготовлен в Объединённом институте ядерных исследований для ЗАО Холдинговая компания «Трекпор Технолоджи».

Циклотрон ЦИТРЕК был спроектирован и создан 10 лет назад с использованием методов и программ того времени.

Автором была создана точная модель центра циклотрона (*Рис.5*) и произведен расчет инъекции непрерывного несгруппированного пучка ионов (beam train), аналогично расчету в циклотроне С400.

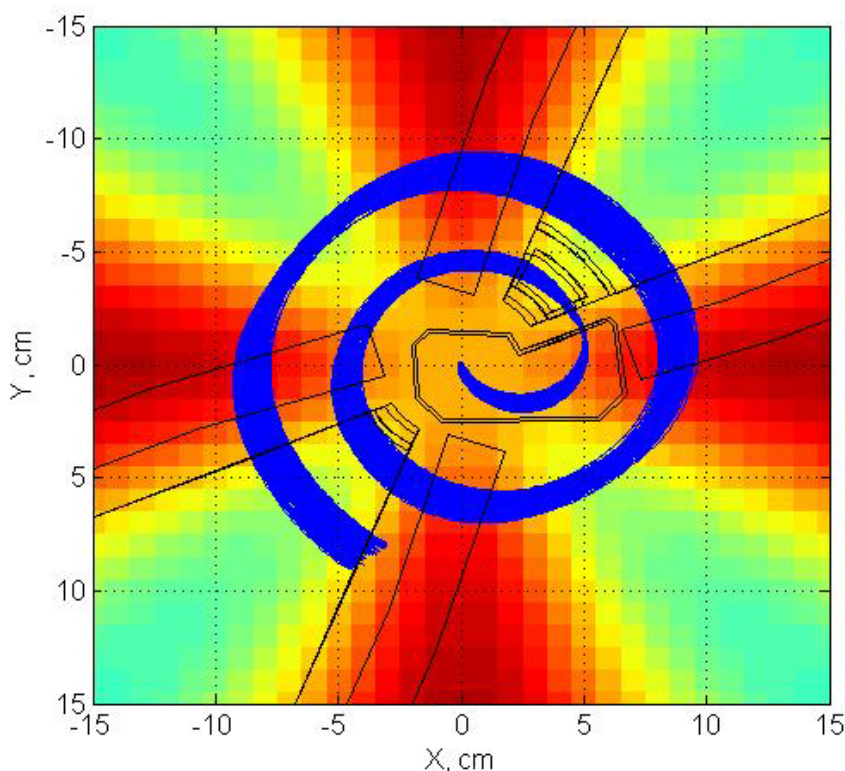


Рис. 5. Траектории пучка ионов аргона в центре циклотрона ЦИТРЕК

Расчетная эффективность центра циклотрона ЦИТРЕК составила около 5 %, что подтверждается экспериментальными данными: интенсивность пучка в линии инжекции и интенсивность пучка на радиусе 10 см, соответствуют коэффициенту прохождения пучка около 5 % [2]. Расчетная эффективность центра С400 существенно выше, а именно 12 %, причем при ограничении на амплитуду радиальных колебаний – 4 мм. Более низкая эффективность центра ЦИТРЕК объясняется, прежде всего существенно большими вертикальными потерями.

Вертикальные потери в циклотроне ЦИТРЕК большие по двум причинам. Первая заключается в том, что пучок в ЦИТРЕКе долгое время дрейфует после вылета из инфлектора в зоне, где полностью отсутствует вертикальная фокусировка, прежде чем попадет в ускоряющий зазор. Такая геометрия центра позволяет не заниматься оптимизацией формы носиков дуантов и делает центр циклотрона простым. Однако для уменьшения вертикальных потерь необходимо приближать ускоряющий зазор к выходу из инфлектора, а далее находить оптимальную геометрию носиков дуантов для заданного распределения среднего магнитного поля, как было сделано для циклотрона С400. Вторая причина кроется в неоптимальности изменения магнитного поля в центре циклотрона вдоль радиуса. Растущее вплоть до 8 см среднее поле затрудняет создание сдвига фазы, способствующего усилению электрической фокусировки.

Так как в циклотроне ЦИТРЕК не используются диафрагмы фазовой селекции, сравнение эффективностей центров С400 и ЦИТРЕК не совсем корректно: В ЦИТРЕК амплитуда радиальных колебаний не ограничена столь жестко, как в С400 (< 4 мм).

Тем более очевидна правильность выбранной для формирования центра С400 стратегии, заключающейся в минимизации дрейфа пучка до первого ускоряющего зазора, в выборе оптимальной формы и положения носиков дуантов для заданного распределения магнитного поля.

Изначально циклотрон ЦИТРЕК проектировался для ускорения ионов криптона с $A/Z = 4.94$. Однако работающий в настоящее время ЭЦР источник не вырабатывает криптон нужной зарядности, поэтому ускоритель работает с аргоном $A/Z = 4.99$.

Для различных применений важно иметь различные ускоренные ионы, например, ионы неона и криптона. Используя созданную модель центра циклотрона, автор проанализировал возможность ускорения ионов неона и криптона с зарядностью ниже проектной, а именно, $9+$ и $12+$.

Расчеты показали, что в циклотроне ЦИТРЕК наиболее перспективно ускорение Kr_{84}^{+12} на 6 кратности ускоряющего поля, что возможно при условии изменения среднего магнитного поля в 0.93 раза и неизменной частоте ускоряющего напряжения - 18.25 МГц. Конечная энергия составит 1.04 МэВ/н, что достаточно для ряда возможных применений.

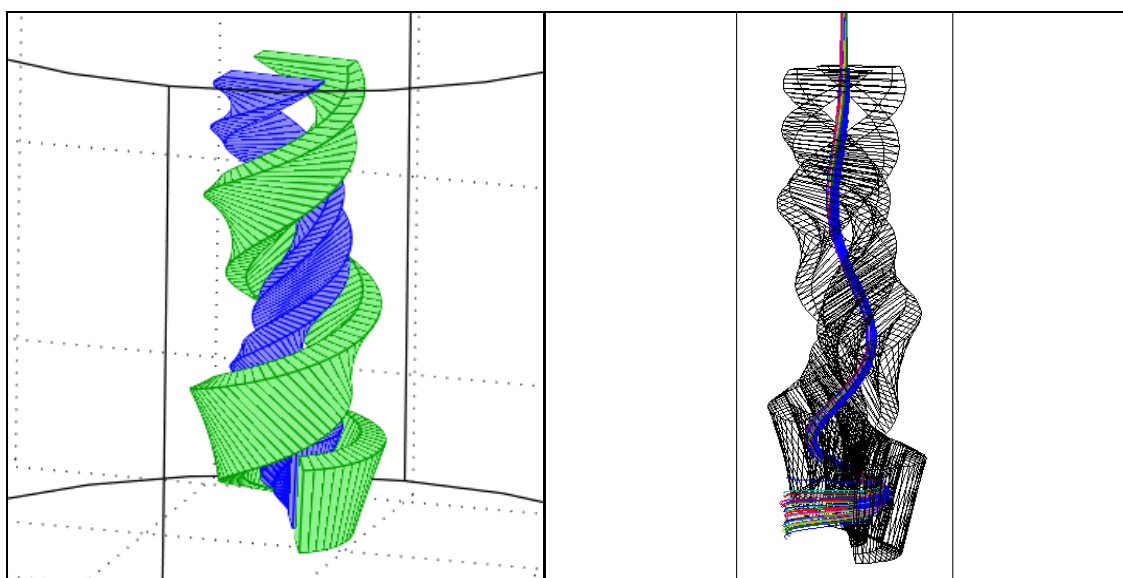
Ионы неона были успешно ускорены в циклотроне ЦИТРЕК при расчетных параметрах.

Расчет аксиальной инжекции пучка в центр сверхпроводящего синхроциклотрона

Для медицинских применений очень важным качеством ускорителя является компактность, поэтому в настоящее время в мире наблюдается растущий интерес к созданию сверхпроводящих синхроциклотронов с высоким средним полем. В рамках Итальянского Исследовательского Фонда TERA разрабатывается проект CYCLINAC [17], предназначенный для лечения онкологических больных, как ускоренными протонами, так и ионами углерода. Предлагается двухступенчатая схема ускорения. В качестве первой ступени предполагается использовать сверхпроводящий синхроциклотрон на энергию 230 МэВ/н. Далее пучок ионов углерода доускоряется в линейном ускорителе до энергии 430 МэВ/н. Среднее поле синхроциклотрона будет равно 4.5 Т [18]. Вопрос инжекции в центр такого ускорителя остается нерешенным. Авторами [18] предлагается использовать для инжекции спиральный инфлектор с большим параметром $\text{tilt} = 3 \div 5$,

однако конкретных расчетов, доказывающих реалистичность подобного инфлектора не приводится.

Автором диссертации были проведены расчеты подобного инфлектора. На Рис. 6. показана компьютерная модель инфлектора, способного инжектировать пучок в синхроциклотрон с величиной среднего поля в центре 4.5 Т. Параметры инфлектора: напряженность поля 12кВ, высота, или электрический радиус 41.6 мм, tilt параметр 3, расстояние между электродами 6 мм. Энергия инжектируемого пучка ионов углерода с $A/Z=2$ равна 25кэВ/Z.



**Рис. 6. а) Компьютерная модель инфлектора.
б) траектории пучка в инфлекторе**

Необходимость столь сложной конструкции инфлектора (*Рис.6*) связана с очень маленьким радиусом ($<8\text{мм}$), на который нужно инжектировать пучок. Расчет траекторий пучка в таком инфлекторе показал, что аксиальная инжекция в синхроциклотрон с магнитным полем 4.5Т реальна, однако, учитывая маленькие размеры центра, его конструкция также будет непростой задачей.

Третья глава посвящена инжекции пучка низкоэнергетических антипротонов в электростатическое кольцо AD-REC.

Создание кольца, замедляющего антипротоны AD (antiproton decelerator) [4] в ЦЕРНе, открыло широкие возможности для изучения

свойств, как самих антипротонов, так и их взаимодействия с веществом и антивеществом при низких энергиях. Накопительное кольцо AD-REC (RECYCLER), которое будет установлено на линии ловушки антипротонов MUSASHI [5] (Monoenergetic Ultra-Slow Antiproton Source for High-precision Investigation) в CERN-AD, позволит перейти к изучению антипротонов при ультранизких энергиях.

Накопительное кольцо AD-REC предназначено для проведения экспериментов с антипротонами, имеющими энергию от 3 до 30 кэВ. Кольцо будет состоять из электростатических элементов. Для измерений сечений взаимодействия антипротонов с газовыми мишенями в кольце будет установлен так называемый микроскоп реакций RM (Reaction Microscope).

Ловушка MUSASHI предназначена для накопления и охлаждения антипротонов. Ловушка представляет собой сверхпроводящий соленоид с продольным магнитным полем $2.5 \div 5$ Т. Пучок антипротонов из ловушки проводится по линии транспортировки к газовой мишени для проведения экспериментов.

В рамках международного сотрудничества с МПИК (Хайдельберг, Германия) [19] необходимо было разработать проект линии инжекции низкоэнергетических антипротонов из ловушки MUSASHI в кольцо AD-REC. Первоначально была поставлена задача - транспортировать пучок на выходе из линии имеющейся линии в кольцо AD-REC.

Так как новая линия инжекции должна была стать продолжением работающей линии транспортировки, прежде всего, необходимо было определить целесообразность использования этой линии, для этой цели были проведены расчеты динамики пучка и оценено качество пучка на выходе.

После тщательного изучения параметров работающей линии транспортировки и проведения ряда расчетов, стало очевидно, что в процессе движения пучка эмиттанс его увеличивается в десятки раз, что

совершенно недопустимо для поставленной задачи, так как необходимо не только сохранить максимальное число антипротонов, но и осуществить инъекцию пучка с достаточно малым эмиттансом – не более $15 \div 30$ п мм мрад.

Следует заметить, что такое сильное ухудшение качества пучка связано, прежде всего, с перефокусировкой пучка, которая была создана, для того чтобы пучок мог проходить через области очень маленьких апертур (до 4 мм). В линии в трех местах расположены диафрагмы переменного диаметра с целью осуществления дифференциальной откачки, таким образом удастся улучшить вакуум от 10^{-6} Торр в зоне газовой мишени до 10^{-13} Торр в самой ловушке. Пучок низкой энергии в линии транспортировки занимает всю апертуру, движение его не параксиально, в результате абберации и нелинейности приводят к существенному росту эмиттанса.

Расчеты доказали необходимость демонтажа имеющейся линии и замены её на новую, не увеличивающую эмиттанс пучка.

Новая линия инъекции в кольцо AD-REC

Таким образом, начало новой линии инъекции сместилось к выходу из ловушки MUSASHI.

В линии инъекции также как и в кольце AD-REC будут полностью отсутствовать магнитные элементы. Основные требования к линии инъекции:

1. Провести пучок антипротонов от MRT MUSASHI к кольцу AD-REC с минимально возможными потерями, так как количество антипротонов, выводимое из ловушки, составляет всего $5 \cdot 10^5$.
2. Начальная энергия пучка находится в диапазоне $150 \div 500$ эВ.
3. Энергия инъекции в кольцо AD-REC должна быть варьируема от 3 кэВ до 30 кэВ.

4. Необходимо инжектировать пучок согласованно со структурой кольца, причем пучок должен быть сфокусирован на мишени с минимально возможным размером, то есть эмиттанс инжектируемого пучка должен быть не более $15\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад} \div 30\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, а разброс по энергии $1 \div 3\%$ для диапазона энергий инъекции $3 \div 30$ кэВ, соответственно.

Для сохранения качества пучка из ловушки MUSASHI при транспортировке к кольцу AD-REC необходимо, прежде всего, ускорить пучок до планируемой в кольце энергии, далее сформировать пучок так, чтобы можно было инжектировать его согласованно со структурой кольца. Поэтому рассматриваемую линию можно условно разделить на две секции – ускоряющую и согласующую (см *Рис. 7*).

Электростатическое кольцо будет работать с пучком антипротонов, выведенным из MUSASHI посредством быстрого вывода. До настоящего времени быстрый вывод осуществляли при энергии 150 эВ.

Ускоряющая секция будет состоять из двух частей, разделенных трубкой дрейфа. Первая часть, состоящая из 5 электродов, будет ускорять пучок антипротонов от энергии $150 \div 500$ эВ до $400 \div 1300$ эВ, обеспечивая при этом фокусировку, которая позволит пучку дрейфовать внутри трубки. Когда пучок будет находиться внутри трубки дрейфа, напряжение на ней переключится на отрицательное, таким образом, при вылете из неё пучок продолжит ускорение до проектных $3 \div 30$ кэВ. 6 электродов во второй части ускоряющей секции выполняют также две функции: ускорят и сфокусируют пучок.

При необходимости изменить начальную энергию пучка нужно будет менять напряжение на ускоряющих электродах, как первой, так и второй части ускоряющей секции. Если нужно поменять только конечное значение энергии пучка, достаточно изменить напряжение на электродах второй части ускоряющей секции.

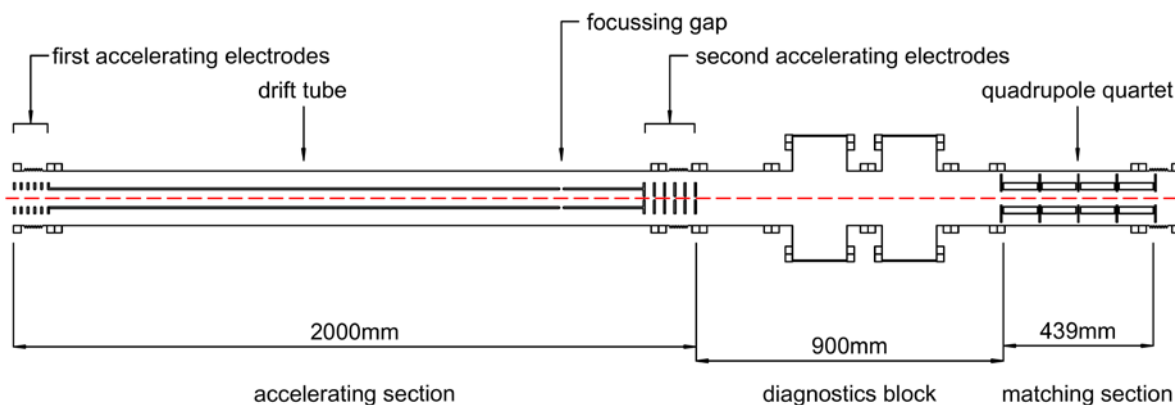
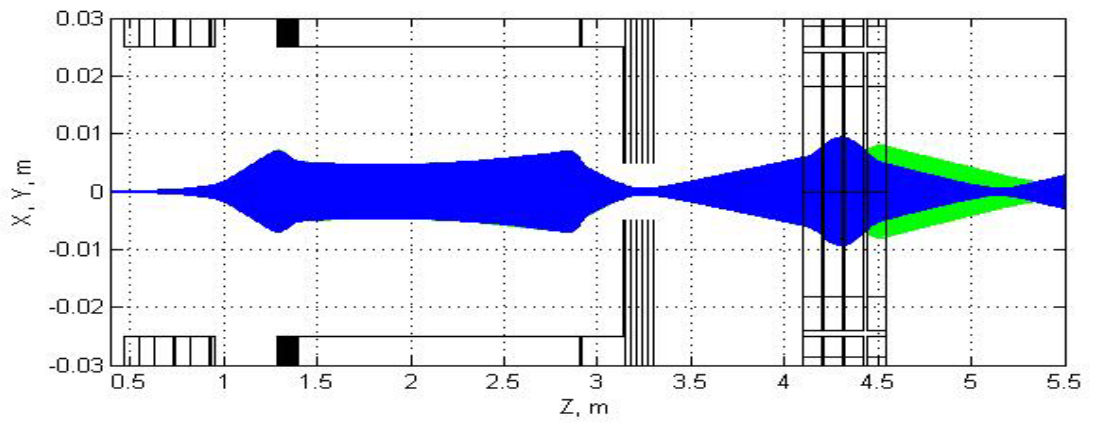


Рис. 7. Схема линии инжекции

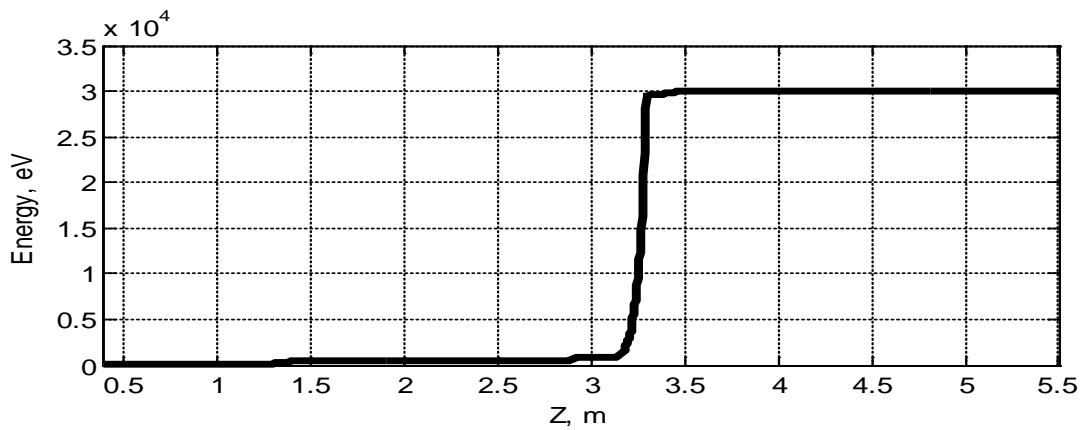
Согласующая секция будет состоять из четырех электростатических квадруполь. В компьютерной модели секции эквипотенциальные поверхности электродов имеют гиперболическую форму.

Для обеспечения наибольшей достоверности результатов были проведены расчеты динамики пучка антипротонов от центра MUSASHI. Для этой цели нам были предоставлены японскими коллегами карты магнитного поля ловушки MUSASHI и точная геометрия вытягивающих электродов.

Начальные параметры пучка выбирались исходя из информации работы [5]. Результаты моделирования динамики пучка в линии инжекции представлены на **Рис. 8**. Энергия пучка в первой части ускоряющей секции была увеличена до 400 эВ, во второй части – до 30 кэВ.



a)



б)

Рис. 8. а) Траектории частиц от выхода из ловушки до инжекции в кольцо (синим и зеленым показаны проекции на взаимно перпендикулярные оси)

б) Энергия частиц в процессе движения по линии инжекции

Квадруполи позволяют инжектировать пучок согласованно со структурой кольца AD-REC (см. **Рис.9**), которое будет работать в различных режимах.

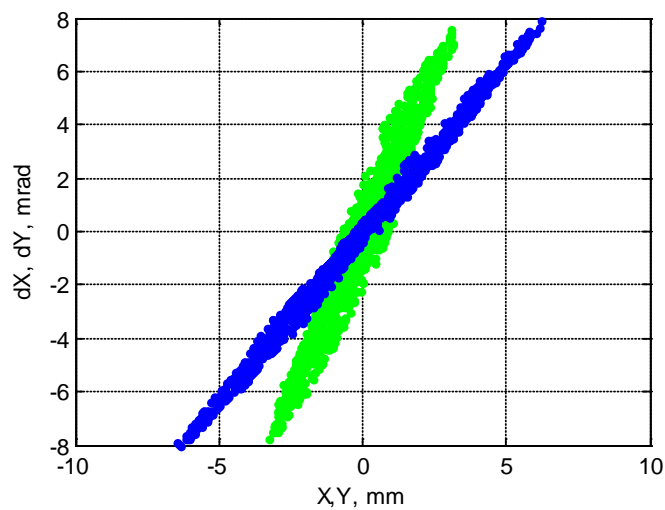


Рис. 9: Распределение пучка на фазовой плоскости в точке инжекции в кольцо AD-REC. $E=30$ кэВ

Так как количество антипротонов из ловушки MUSASHI очень ограничено, наладку кольца AD-REC необходимо будет осуществлять на пучке H⁺ ионов, поэтому была предусмотрена возможность установки в линии инжекции секции, включающей в себя источник и некоторые дополнительные компоненты, такие как линза Энзеля, два стирера, цилиндр Фарадея и систему откачки.

Заключение

В соответствии с целью диссертационной работы были выполнены расчеты динамики низкоэнергетического пучка для проектов инжекции в ускорительные комплексы различного назначения по разработанным автором программам и методикам.

Основные результаты работы:

1. Разработаны методики и создан комплекс программ с широкими возможностями для проведения расчетов по динамике низкоэнергетического пучка в линиях транспортировки и при инжекции в циклические ускорители и накопители.
2. Предложены оригинальная конфигурация и компоновка элементов центра сверхпроводящего циклотрона С400, предназначенного для лечения онкологических заболеваний пучками протонов и ионов углерода. Выбраны параметры инфлектора, положение и геометрия электродов, диафрагм. Расчетная эффективность захвата в ускорение небанчируемого пучка ионов -12 % при ограничении на амплитуду радиальных колебаний 4 мм, что превосходит существующий показатель эффективности работающих сверхпроводящих циклотронов.
3. Впервые показано, что для циклотрона С400 различие в кривых напряжения, полученных в электростатическом приближении и в результате высокочастотного анализа, позволяет производить расчет центра до радиуса 5 см с точностью более 95 % в электростатическом приближении. Таким образом, определены границы применимости

электростатического приближения расчетов конфигураций ускоряющего электрического поля в центре циклотрона С400.

4. Впервые в численном эксперименте продемонстрирована возможность модулирования интенсивности пучка при помощи инфлектора, уменьшая напряжение на 12 % на электродах, что позволяет реализовать новый перспективный метод протонной терапии на основе активного сканирования с требуемой частотой до 1 кГц в циклотроне с внешней инъекцией.
5. Ионы неона были успешно ускорены в циклотроне ЦИТРЕК с рассчитанными параметрами. Рассчитаны параметры ускорения ионов криптона в циклотроне ЦИТРЕК с зарядностью ниже проектной. Ускорение таких ионов улучшит качество производимых на ускорителе трековых мембран и существенно расширит область их применения.
6. Рассчитана эффективность центра циклотрона ЦИТРЕК при ускорении ионов аргона. Она составляет около 5 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (измеренные интенсивности пучка в линии инъекции и на радиусе 10 см соответствуют коэффициенту прохождения около 5 %).
7. Впервые рассчитаны параметры спирального электростатического инфлектора с очень большим коэффициентом спиральности ($\text{tilt}=3$), позволяющего инжектировать пучок в сверхпроводящий синхроциклотрон с величиной среднего поля в центре 4.5 Т.
8. По результатам расчетов динамики пучка антипротонов из ловушки MUSASHI по существующей линии транспортировки было доказано, что она не удовлетворяет требованиям к линии инъекции в кольцо AD-REC, показана необходимость замены существующей линии на новую, не допускающую увеличения эмиттанса пучка.
9. Разработана структура и оптимизированы параметры новой линии инъекции пучка антипротонов с ультранизкой начальной энергией 150 ÷ 500 эВ из ловушки MUSASHI, ускоряющей пучок до 3 ÷ 30 кэВ и

проводящей пучок низкой интенсивности с необходимыми параметрами в кольцо AD-REC.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [A1] *Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Лепкина О.Е.* Расчеты динамики пучка в циклотронах в системе MATLAB // Сообщения ОИЯИ. P9-2008-53. 2008. 6 с.
- [A2] *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* COMPACT SUPERCONDUCTING CYCLOTRON C400 FOR HADRON THERAPY // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 624, Issue 1, P. 47-53.
- [A3] *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* RF cavity design for superconducting C400 cyclotron // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. V. 8. No 4. P. 386–390.
- [A4] *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* Central region design of the cyclotron C400 for hadron therapy // Proc. of RuPAC XXII. Joint Accelerator Conferences Website. 2010. P. 221.
- [A5] *Alenitsky Y., ... Karamyshev O. et al.* Dubna Project of Cyclotron C250 for Proton Therapy Application // Proc. of RuPAC XXII. Joint Accelerator Conferences Website. 2010. P. 371.
- [A6] *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* IBA-JINR 400 MeV/u superconducting cyclotron for hadron therapy // Proc. of CYCLOTRONS-2010. Lanzhou. China.
- [A7] *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* RF cavity simulations for superconducting C400 cyclotron // Proc. of CYCLOTRONS-2010. Lanzhou. China.
- [A8] *Artikova S., ... Karamyshev O. et al.* Developments at the Interface between Accelerator Sciences and Atomic Physics within the QUASAR Group // Max-Planck-Institut für Kernphysik Progress report 2009-2010. ISBN 1868-9175. Bernold Feuerstein. Gertrud Hönes. Gernot Vogt. P. 154–156.

- [A9] **Карамышев О.** Компьютерное моделирование динамики низкоэнергетического пучка при инжекции в циклические ускорители // Тезисы докладов XV научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. 14-19 февраля, 2011. Дубна. 2011.
- [A10] **Karamyshev O., Papash A., Welsch C.P.** Design of an Antiproton Recycler Ring // Proc. of PAC-2011. New York. USA.
- [A11] **Карамышев О.В.** Программа для расчета динамики пучка при инжекции в циклические ускорители // Сообщения ОИЯИ. P9-2011-21. 2011. 13 с.
- [A12] **Карамышев О.В., Карамышева Г.А., Скрипка Г.М.** Потери ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона // Сообщения ОИЯИ. P9-2011-34. 2011. 10 с. Направлено в журнал “Прикладная Физика”.
- [A13] **Karamyshev O., Karamysheva G., Papash A., Siggel-King M., Welsch C.P.** COMPUTER SIMULATION OF THE INJECTION BEAM LINE FOR THE AD-RECYCLING RING // Proc. of Third DITANET School on Beam Diagnostics, Stockholm university. Stockholm. Sweden. 2011.
- [A14] **Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Костромин С.А.** и др. Динамика пучка в циклотроне С235-V3 для протонной терапии // Журнал Технической Физики. 2011. Т. 81.
- [A15] **Welsh C.P., ... Karamyshev O. et al.** Ultra-Low energy Storage Ring at FLAIR // Proc. of 10th international conference on Low Energy Antiproton Physics. TRIUMF. Vancouver. Canada. 2011.

Цитируемая литература.

1. *Jongen Y., ... Karamyshev O. et al.* COMPACT SUPERCONDUCTING CYCLOTRON C400 FOR HADRON THERAPY // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 624, Issue 1, P. 47-53.

2. *Денисов Ю.Н. и др.* Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2. № 3(126). С. 34–38.

-
3. Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Костромин С.А. и др. Динамика пучка в циклотроне С235-V3 для протонной терапии // ЖТФ. Т. 81. 2011.
 4. Baird S. et al. The Antiproton Decelerator: AD // Proc. of Part. Conf. (1997).
 5. Kuroda N. et al. Development of MUSASHI, a mono-energetic ultra-slow antiproton beam source // Proc. of IPAC 2010. Kyoto. Japan. P. 4188–4190.
 6. Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Лепкина О.Е. Расчеты динамики пучка в циклотронах в системе MATLAB // Сообщения ОИЯИ. P9-2008-53. 2008. 6 с.
 7. Карамышев О.В. Программа для расчета динамики пучка при инжекции в циклические ускорители // Сообщения ОИЯИ. P9-2011-21. 2011. 13 с.
 8. Карамышев О.В., Карамышева Г.А., Скрипка Г.М. Потери ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона // Сообщения ОИЯИ. P9-2011-34. 2011. 10 с. Направлено в журнал “Прикладная Физика”.
 9. Jongen Y. et al. Current Status of the IBA C400 Cyclotron Project for Hadron Therapy // Proc. of EPAC 2008. Genoa. Italy 2008.
 10. Jongen Y., ... Karamyshev O. et al. IBA-JINR 400 MeV/u superconducting cyclotron for hadron therapy // Proc. of CYCLOTRONS-2010.
 11. Jongen Y., ... Karamyshev O. et al. RF cavity design for superconducting C400 cyclotron // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. V. 8. No 4. P. 386–390.
 12. Jongen Y., ... Karamyshev O. et al. RF cavity simulations for superconducting C400 cyclotron // Proc. of CYCLOTRONS-2010.
 13. Гикал Б. и др. Циклотронный комплекс ДЦ 60 // Сообщение ОИЯИ, P9-2007-104. 2007. 18 с.

-
14. *Calabretta L. and Rifuggiato D.* STATUS AND FUTURE PLANS AT LNS CATANIA // Proc. of Cyclotrons and Their Applications 2001. Sixteenth International Conference.
 15. *An D.H. et al.* Simulation of Injection System of the KIRAMS-430 Superconducting Cyclotron // Proc. of Cyclotrons and Their Applications 2010. China.
 16. CST STUDIO SUITE <http://www.cst.com>
 17. *Amaldi U. et al.*, “High Frequency Linacs for Hadrontherapy”, RAST, Vol. 2 (2009), 111-131.
 18. *Garonna A.* Synchrocyclotron preliminary design for a dual hadrontherapy center // Proc. of IPAC’10. Kyoto. Japan. 2010. P. 552–554.
 19. <http://www.quasar-group.org>