

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Гикал Борис Николаевич

Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для
прикладных исследований и промышленного применения

Специальность: 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 2014

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

Степанов Альберт Владимирович доктор технических наук, главный специалист по циклотронной тематике, Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова

Голубев Александр Александрович доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ

Слепцов Владимир Владимирович доктор технических наук, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии», МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского

Ведущая организация:

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова, г.Гатчина, Ленинградская обл.

Защита состоится "____" _____ 2014 г. в "____" на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской обл. Адрес: ОИЯИ, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация

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

Автореферат разослан "____" _____ 20__ г.

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

В.А.Арефьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Результаты фундаментальных и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов низких и средних энергий, полученные в последнее время, убедительно свидетельствуют об актуальности и перспективности использования тяжелых ионов в наукоемких технологиях в промышленности.

Ведущие ядерно-физические центры мира осуществляют программные исследования механизмов взаимодействия тяжелых ионов с различными материалами, создающие достаточные предпосылки для разработки новых технологий промышленного использования тяжелых ионов. Однако широкое применение тяжелых ионов в производственных процессах требует создания специализированных ускорителей, отличающихся высокой надежностью, простотой в обслуживании, стабильностью параметров, большим временем непрерывной работы. Начиная с 1980-х годов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ведутся разработки ускорителей для производства трековых мембран и прикладных исследований.

В диссертационной работе приводятся основные принципы проектирования и параметры специализированных циклотронов, созданных в ЛЯР ОИЯИ для промышленного производства трековых мембран и прикладных исследований.

Диссертация выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в соответствии с Проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ и международного сотрудничества Объединенного института ядерных исследований. В неё вошел цикл работ, выполненных и опубликованных автором с 1982 г. и до настоящего времени.

Актуальность

Изучение фундаментальных физических процессов взаимодействия частиц с твердым телом является определяющей основой их практического использования для радиационно-ионной модификации материалов.

В физике тяжелых ионов сформировалось направление научно-прикладных исследований, в основе которого лежит изучение взаимодействия ускоренных тяжелых ионов с веществом. Получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий. Тяжелые ионы успешно используются для модификации полимеров – немембранные технологические применения в био- и медтехнике.

Исследования по модификации материалов тяжелыми ионами, а также производство трековых мембран, получили широкое развитие в крупнейших ядерно-физических центрах США, Франции, Германии, Японии и других стран. Большинство работ в этой области выполнены на мощных ускорителях, разработанных прежде всего для выполнения широкого спектра фундаментальных научных исследований.

В настоящее время особенно актуальна задача создания специализированных ускорителей тяжелых ионов, позволяющих внедрять наукоемкие технологии путем прямого применения ускорителей в технологических процессах. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ выполнена целевая программа по разработке специализированных циклотронов тяжелых ионов для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Современные достижения в развитии циклотронов тяжелых ионов и прежде всего в создании источников ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) позволили разработать концепцию проектирования циклотронов тяжелых ионов нового поколения для промышленного применения и исследований в области нанотехнологий. В диссертационной работе приводятся основные принципы проектирования и параметры специализированных циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110 с внешней инжекцией пучка из ЭЦР источника, созданных в ЛЯР ОИЯИ для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Цель работы:

Разработка физических принципов и технических решений для создания специализированных циклотронов тяжелых ионов нового поколения с системой аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР для исследований и промышленного применения в области нанотехнологий с использованием пучков ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон.

Разработка базовой конструкции системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон из внешнего источника, изготовление, монтаж и тестирование на циклотроне У-200.

Разработка и выполнение проекта глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 путем создания системы аксиальной инжекции пучка из внешнего сверхпроводящего источника ионов, реконструкции всех систем циклотрона в соответствии с новой концепцией, создание специализированного канала и установки для проведения исследований и облучения полимерной пленки с использованием пучков ионов от неона до вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.

Создание специализированных циклотронных комплексов ДЦ-60 и ДЦ-110 для производства трековых мембран и использования в области нанотехнологий.

Научная новизна и практическая ценность:

1. Разработана концепция нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР.
2. Впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ создана система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая стала концептуальным решением для разработки подобных систем на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР.
3. Разработан и выполнен проект глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона тяжелых ионов ИЦ-100. Произведен переход от внутреннего источника ионов типа PIG к системе внешней инжекции из ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон, которые используются для производства трековых мембран и исследований в области физики твердого тела.
4. Впервые разработан и создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с плавной вариацией энергии для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Разработан и применен комплексный метод для формирования магнитной системы изохронного циклотрона ДЦ-60. Разработана и создана магнитная система многофункционального изохронного циклотрона ДЦ-60 для ускорения ионов с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. Магнитная структура циклотрона позволяет за счет изменения магнитного поля плавно варьировать энергию ускоренных пучков ионов в пределах $\pm 25\%$ от номинальной. Циклотрон создан для Университета им. Л.Н.Гумилева в Астане. На циклотроне ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.
5. Впервые разработан и создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110, на котором получены пучки ускоренных ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Ускоритель способен облучать более 2 миллионов квадратных метров в год полимерной пленки для изготовления трековых мембран. ДЦ-110 входит в состав промышленного комплекса «БЕТА», созданного для

производства каскадных плазмаферезаторов крови на основе технологии трековых мембран.

Сведения о практическом применении

1. На циклотроне У-200 ЛЯР создана система аксиальной инжекции пучка, которая послужила базовой конструкцией при создании подобных систем на циклотронах У-400, МЦ-400, ИЦ-110, ДЦ-60 и ДЦ-110.
2. Выполнена глубокая модернизация циклического имплантатора ИЦ-100, на котором ведутся научно-прикладные исследования и облучение полимерной пленки в промышленных масштабах на пучках ионов от неона до висмута.
3. Разработанный в ЛЯР циклотронный комплекс ДЦ-60 установлен в научно-исследовательском центре МНИК при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г.Астана, Казахстан). На циклотроне ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.
4. Циклотронный комплекс ДЦ-110 установлен и запущен в эксплуатацию в НПК «БЕТА» (г. Дубна, Россия). Циклотрон используется на стадии облучения полимерной пленки в технологическом процессе производства плазмаферезаторов крови.

Апробация работы и публикации

Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ОИЯИ, в журналах ЖТЭФ, «Nucl. Phys.», «Письма в ЭЧАЯ», «Атомная энергия», ПТЭ, в трудах российских и международных конференций: 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, 11-е Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, ЕСРМ 2006, XIV научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», 18th International conference on cyclotrons and their applications, RUPAC 2012, 3-я международная научная конференция «Ядерная и радиационная физика», IX и X Международные семинары по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева и др.

Общее число публикаций по теме диссертации 69 из них в рецензируемых журналах – 19 в трудах российских и международных конференций – 27, получен один патент на изобретение.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции из внешних источников ионов типа ЭЦР.
2. Система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, созданная впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ на циклотроне У-200, которая стала базовым решением для проектов подобных систем на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР.
3. Разработка и выполнение проекта глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона ИЦ-100 для промышленного производства трековых мембран. На ускорителе создана система внешней инжекции из сверхпроводящего ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.
4. Создание и ввод в эксплуатацию специализированного циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-60 с вариацией энергии от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий.

5. Создание и ввод в эксплуатацию специализированного высокоинтенсивного циклотрона ДЦ-110 для производства трековых мембран, ускоряющего пучки ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Производительность комплекса по облучению полимерной пленки составляет более 2 миллионов квадратных метров в год.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (189 наименований). Объем диссертации составляет 257 страниц, включающих 281 рисунок и 66 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены научные и прикладные аспекты использования пучков тяжелых ионов в области нанотехнологий. Ионные треки экспериментально были обнаружены более 40 лет тому назад. Быстрые ионы с кинетической энергией в несколько МэВ/нуклон имеют высокую скорость выделения энергии по длине пробега иона в веществе - до нескольких МэВ/мкм. Это вызывает электронное возбуждение атомов и инициирует ряд специфических «эффектов» радиационного повреждения, например, формирование ионных треков, в области которых могут развиваться процессы: локального плавления, аморфизации, создания необычных фаз (фазы высокого давления), генерации ударных волн и разрушения материала.

Научные аспекты радиационного повреждения и формирования ионных треков в твердых телах

С помощью пучков тяжелых ионов удается изменять свойства поверхности материала и его слоев на глубине вплоть до нескольких десятков микрометров. Уже сегодня пучки тяжелых ионов широко используются в электронной промышленности для легирования полупроводниковых материалов. Таким путем можно внедрять атомы любого элемента в любой заданный материал и создавать аморфные и диэлектрические слои в полупроводниках.

В промышленных процессах используются тяжелые ионы как с низкой энергией 10-100 кэВ на заряд, так и ускоренные до энергий 1 - 4 МэВ/нуклон.

Практическое применение высокоэнергетичных тяжелых ионов сдерживается, прежде всего, малочисленностью соответствующих высокопроизводительных ускорителей, а также недостаточной изученностью физических процессов взаимодействия тяжелых ионов с твердыми телами.

Разработка и внедрение в практику новых «ядерных технологий», использующих высокоэнергетичные тяжелые ионы, идет по четырем основным направлениям:

- теоретические и экспериментальные исследования радиационного повреждения,
- изучение радиационных эффектов от единичных актов взаимодействия высокоэнергетичных ионов с твердым телом,
- радиационно-ионная и ионно-трековая модификация материалов применительно к нанотехнологиям,
- разработка и создание специализированных комплексов на базе ускорителей тяжелых ионов промышленного применения.

Для того чтобы успешно управлять изменениями свойств облучаемых материалов и находить пути к оптимизации этих изменений, прежде всего необходимо знать, как тяжелая частица отдает свою энергию, двигаясь в веществе.

Независимо от типа твердого тела (металл, полупроводник, диэлектрик, полимер) быстрая частица, попадая в него, вовлекается в непрерывный процесс взаимодействия с его атомами и электронами, передавая им свою энергию. При этом возможны три основных процесса взаимодействия:

- возбуждение электронов мишени и энергетическая релаксация в атомах мишени (т.н. неупругая часть потери энергии);
- прямой переход кинетической энергии к атомам вещества (упругая часть потери энергии);
- имплантация чужих атомов (стабильных или радиоактивных) внутрь материала (ионное легирование).

Изучение и понимание этих фундаментальных физических процессов взаимодействия частиц с твердым телом, как отдельно, так и в их синергетическом действии, является определяющей основой их практического использования для радиационно-ионной модификации материалов.

Особенности получения и свойства трековых мембран на основе различных полимеров

Мембраны на основе поликарбоната (ПК) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) являются в настоящее время коммерческими продуктами. Технология их производства хорошо отработана. Пучки ионов Кг с энергиями около 1 и 1,5 МэВ/нуклон могут считаться оптимальными для бомбардировки ПЭТФ пленок толщиной 10 и 20 мкм соответственно. Поликарбонат более чувствителен к радиационным воздействиям, вследствие чего для производства трековых мембран из ПК пленок могут применяться более легкие ионы, например Аг. Химическое травление облученных ионами ПЭТФ и ПК пленок проводят в растворах щелочи. Варьируя условия химической обработки, получают мембраны с диаметрами пор от ~ 0,01 до 10-12 мкм.

Для фильтрации агрессивных технологических сред были разработаны трековые мембраны из полипропилена и поливинилиденфторида. Эти полимеры отличаются высокой химической стойкостью, что позволяет использовать мембраны для очистки растворов крепких минеральных кислот и щелочей.

Выбор энергии ионов для облучения полимерной пленки

Размер и форма пор трековой мембраны полностью определяется химическим процессом обработки облученной тяжелыми ионами полимерной пленки. Однако сам процесс зависит от массы ионов пучка, используемого для облучения. Если не рассматривать подробности химического процесса, можно сформулировать основной принцип – чем тяжелее ионы, тем процесс обработки короче и качество получаемых фильтров лучше. В некоторых случаях могут быть использованы ионы Аг, для большинства задач достаточно использовать пучок ионов Кг, в некоторых случаях необходимо производить облучение ионами Хе, например, при производстве особых химически стойких трековых мембран.

Необходимая энергия ионов определяется толщиной полимерной пленки. Длина пробега иона в веществе должна быть не меньше толщины пленки. Однако нужно принимать во внимание, что в некоторых случаях используется облучение ионами под углом к поверхности, чтобы избежать проблемы сдвоенных пор. В этом случае нужно учитывать не толщину пленки, а реальную длину трека иона, пересекающего пленку.

В таблице 1 приведены значения минимальной энергии ионов для производства трековых мембран из пленки наиболее распространенных типовых толщин.

Таблица 1. Минимальная энергия ионов, необходимая для облучения полимерной пленки при производстве трековых мембран

Толщина пленки		12 мкм	19 мкм	21 мкм	30 мкм
Энергия ионов при перпендикулярном облучении (МэВ/нуклон)	Kr	0,7	1,4	1,6	2,7
	Xe	0,4	1,0	1,2	2,2
Энергия ионов при облучении под углом 15° (МэВ/нуклон)	Kr	0,75	1,45	1,66	2,8
	Xe	0,45	1,05	1,25	2,3
Энергия ионов при облучении под углом 30° (МэВ/нуклон)	Kr	1,0	1,8	2,0	3,2
	Xe	0,6	1,25	1,5	2,7

В 1-й главе приводится краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации полимеров. Анализируются тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов в мире.

Ускорители тяжелых ионов, работающие в научных центрах различных стран мира, как правило, укомплектованы каналами и установками для модификации материалов, в том числе специализированными установками для облучения полимерных пленок как первой стадии в технологии производства трековых мембран.

США. Тандем в Брукхейвенской национальной лаборатории (the tandem Van de Graaff accelerators) используется для промышленного облучения и тестирования материалов. Максимальные энергии ионов Со и I (часто используемых для облучения полимеров) составляют 270 и 370 МэВ соответственно.

Франция. На циклотронном комплексе GANIL для облучения полимерных пленок и производства трековых мембран в основном используется линия средних энергий (5-20 МэВ/нуклон). Энергия ионов достаточно высока, чтобы пучок мог выводиться из вакуумной камеры на воздух сквозь металлическую фольгу. Интенсивности пучков Ar, Kr и Xe составляют $10^{11} - 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Имеется специальный канал для проведения промышленных облучений. Вакуумная камера снабжена лентопротяжным механизмом, позволяющим обрабатывать полимерные пленки шириной до 50 см.

Бельгия. CYClotron of LOuvain la NEuve (CYCLONE) – компактная многоцелевая машина, используемая для фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в промышленном масштабе. Диапазон энергий ускоряемых тяжелых ионов составляет 0,6-27,5 МэВ/нуклон. Облучение полимеров, в частности поликарбонатных пленок для производства трековых мембран, производится ионами $^{40}\text{Ar}^{10+}$ с энергией 5,5 МэВ/нуклон.

Германия. В Институте Гана-Майтнер в Берлине создана ускорительная лаборатория для исследований в области физики твердого тела, а также тестирования и модификации материалов. Для прикладных целей используются, например, пучки Kr и Xe с энергиями от 1,5 до 6 МэВ/нуклон. Созданы специальный канал и камера для обработки полимерных пленок в промышленном масштабе.

В GSI (Дармштадт) на линейном ускорителе UNILAC в течение последних 20 лет проводятся интенсивные исследования воздействия пучков ускоренных ионов на материалы, в том числе исследования по трековым мембранам. Используется широкий спектр ионов (Xe, Au, Pb, U) со стандартной для данного ускорителя энергией около 11 МэВ/нуклон, хотя для подавляющего большинства прикладных задач достаточно существенно меньшей энергии. Для промышленных целей ускоритель практически не используется ввиду экономической нецелесообразности.

Россия. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ специализированный канал для облучения полимерных пленок на ускорителе У-300 был создан в середине 70-х годов. Для производства трековых мембран и для исследовательских задач использовались пучки ионов Хе с энергией 1 МэВ/нуклон. В течение последующих десятилетий ускорительный и аппаратный комплекс регулярно совершенствовался. В настоящее время облучение полимеров проводится на выведенном пучке циклотрона У-400.

Используются ионы более высокой энергии (например Kr, 2,5–5 МэВ/нуклон). Камера облучения обеспечивает возможность обработки полимерных пленок шириной до 60 см.

В ЛЯР разработан и создан специализированный ускоритель – циклический имплантатор ИЦ-100, который используется для промышленного производства трековых мембран и научно-прикладных исследований на пучках C, Ne, Ar, Kr, Xe, I, W, Bi с фиксированной энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.

В Дубне работает промышленный комплекс «АЛЬФА», построенный для производства плазмаферезаторов крови. Базовая установка – циклотрон ЦИТРЕК разработан в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Ускоряемые ионы – Ag с энергией 2,4 МэВ/нуклон.

Казахстан. В 2006 году в Астане был открыт Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс (МНИК). Специально для этого центра в ЛЯР ОИЯИ был разработан и создан циклотрон ДЦ-60, способный ускорять ионы от C до Xe с энергией 0,35 – 1,77 МэВ/нуклон. Циклотронный комплекс используется как для научных целей, так и для промышленного производства трековых мембран и продукции в области нанотехнологий.

Япония. Изохронный циклотрон AVF в Такасаки (JAERI) также является многоцелевой машиной, используемой в том числе и для исследований с полимерными материалами. Типичные пучки, используемые для облучения полимеров, – ионы Kr и Xe с энергиями в несколько МэВ/нуклон. На промышленном уровне данный ускоритель не используется.

Особое место в ряду ускорительных комплексов промышленного применения занимает проект циклотрона ДЦ-110, который создан для НПК «БЕТА» в Дубне (Россия). Высокоинтенсивные пучки Ar, Kr, Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон позволяют получать трековые мембраны с производительностью до 2 миллионов квадратных метров в год. Ускоритель разработан и создан в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, введен в эксплуатацию в 2012 г.

Тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов

Поколение циклотронов тяжелых ионов, которое активно стало развиваться в конце 50-х годов, было ориентировано на использование внутренних источников ионов пеннинговского типа (PIG). Развитие ионных источников привело к созданию в конце 70-х годов источника ионов нового типа – электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), разработанного для циклотрона. Интенсивности пучков многозарядных ионов ЭЦР источника в десятки и сотни раз превосходят интенсивности PIG источника. Однако использование ЭЦР источника на циклотроне требует создания системы внешней инжекции пучка в центр циклотрона. Такие системы были созданы на циклотронах научных центров в Гренобле (Франция), GANIL (Франция) и др. Впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ система аксиальной инжекции пучка была создана на циклотроне У-200 ЛЯР ОИЯИ в 1986 г. На ней были отработаны основные принципы построения таких систем для циклотронов тяжелых ионов. Полученные конструкторские и технические решения, экспериментальные результаты легли в основу создания подобных систем на других циклотронах ЛЯР.

Создание инжектора тяжелых ионов для циклотрона на базе ЭЦР источника и системы внешней инжекции пучка серьезным образом повлияло на принципы построения циклотронов, в том числе специально разработанных для прикладных задач и промышленного использования.

Во-первых, возможность ускорения ионов более высоким зарядом позволила снизить уровень среднего магнитного поля, создавать более экономичные магниты. Переход на ускорителе от источника типа PIG к ЭЦР источнику при той же магнитной структуре дал возможность ускорения более тяжелых ионов. Ярким примером служит

модернизация циклотрона ИЦ-100. Ускоритель был создан в 1986 году, на момент запуска имел внутренний источник типа PIG, который позволял получать ионы с массой до Ar с энергией до 1 МэВ/нуклон. После создания системы аксиальной инжекции из ЭЦР источника были получены ионы Kr, Xe, Bi, J, Mo.

Во-вторых, вынесение ионного источника за пределы вакуумной камеры ускорителя значительно снизило газовую нагрузку вакуумной системы циклотрона. Поток газа из пеннинговского источника составляет около 1 см³/мин, в то время как газоотделение с поверхности камеры циклотрона минимум на порядок меньше. Переход на систему внешней инжекции не только позволяет улучшить вакуум в камере циклотрона и тем самым снизить потери пучка в процессе ускорения из-за перезарядки на остаточном газе, но и делает обоснованным переход на новые вакуумные технологии: сифонные вводы движения, безмасляную систему откачки, применение криогенных насосов. Например, такой переход на циклотроне ИЦ-100 улучшил рабочий вакуум в камере циклотрона с $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ Торр.

В-третьих, новые технологии существенно изменили эксплуатационные свойства ускорителя. Снизилась вероятность пробоев с высоковольтных электродов и дуантов. В несколько раз увеличился срок службы изоляторов ввода высокочастотной мощности. Срок службы элементов центральной оптики стал практически не ограничен. В сумме ускоритель получил возможность работать целый год без профилактических работ внутри камеры циклотрона. Следует добавить, что ионный источник типа PIG при работе на тяжелых ионах требует ежедневной замены электродов, а ЭЦР источник может работать на газах в течение многих месяцев без профилактики.

В-четвертых, система аксиальной инжекции пучка дала возможность более эффективно использовать пучок за счет применения банчера, позволившего увеличить захват частиц в процесс ускорения до 30-70%. Система аксиальной инжекции позволила применить чоппер для быстрого прерывания процесса ускорения – менее 0,1 мс, что полезно во многих физических экспериментах. За счет использования системы обратной связи на один из элементов системы аксиальной инжекции появилась возможность стабилизации интенсивности пучка на мишени, что во многих случаях является технологическим требованием, например, при производстве трековых мембран.

Таким образом, циклотрон тяжелых ионов с ЭЦР источником и системой аксиальной инжекции приобрел свойства технологической машины промышленного применения и ускорителя с широкими возможностями для выполнения научно-прикладных исследований.

Развитие циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач в ЛЯР

Производство трековых мембран («ядерных фильтров») с использованием ускоренных тяжелых ионов было реализовано в середине 1970-х годов в Лаборатории ядерных реакций на циклотроне У-300. Большие возможности ускорителя позволили сформировать целое направление прикладных исследований, целью которых было создание технологий, применимых в промышленности. Поэтому была поставлена и решена задача создания ускорителей промышленного применения. Первый специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных работ на пучках тяжелых ионов был создан по инициативе академика Г.Н.Флорова в 1985 году. В 2001 году ИЦ-100 был остановлен для кардинальной реконструкции. На нем был установлен источник электронно-циклотронного резонанса со сверхпроводящей магнитной структурой и создана система аксиальной инжекции пучка. Достигнутые при этом параметры в полной мере показали преимущества новой концепции построения циклотронов. Диапазон ускоряемых ионов по массам до реконструкции (при использовании внутреннего источника ионов) составлял C–Ar, после реконструкции были получены пучки ионов Ne,

Ar, Fe, Kr, I, Xe, W. В настоящее время циклотрон обеспечивает выполнение широкого спектра прикладных задач, включая исследование радиационной стойкости материалов, получение и изучение наноструктурированных композиционных материалов, а также нано- и микропористых мембран.

В 2004–2006 гг. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создан специализированный ускорительный комплекс ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и коммерческого производства трековых мембран. Комплекс был спроектирован и построен для Междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г.Астана, Казахстан).

Циклотрон ДЦ-60 уже несколько лет успешно обеспечивает выполнение программы прикладных и научных исследований на пучках ускоренных ионов в широком диапазоне изменения масс от Li до Xe и энергий 0,35-1,77 МэВ/нуклон, а также экспериментов на канале низких энергий на пучках тяжелых ионов, получаемых из ЭЦР источника с напряжением экстракции до 25 кВ. Трековые мембраны, произведенные на пучках циклотрона ДЦ-60, отвечают самым высоким мировым стандартам.

Развиваемое в ЛЯР направление по созданию специализированных ускорителей (ИЦ-100, ДЦ-60) получило свое продолжение в проекте нового циклотрона ДЦ-110, разработанного для научно-промышленного комплекса «БЕТА», предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови на основе трековых мембран.

Ускорительный комплекс обеспечивает получение интенсивных пучков ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нукл., что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

Ускоритель создан на базе магнита с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$, которые имеют близкие отношения массы к заряду: 6,667, 6,615 и 6,600, что позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле с подстройкой B_0 или $F_{вч}$ в небольшом диапазоне. Такая концепция обеспечивает повышенную надежность и простоту управления комплексом.

Ускорительный комплекс введен в эксплуатацию в 2012 году. Весь цикл работ по разработке проекта и созданию оборудования циклотрона, включая запуск, был выполнен в течение 3 лет.

Типичная схема циклотрона тяжелых ионов для прикладных задач, разработанная в ЛЯР, приведена на рис.1.

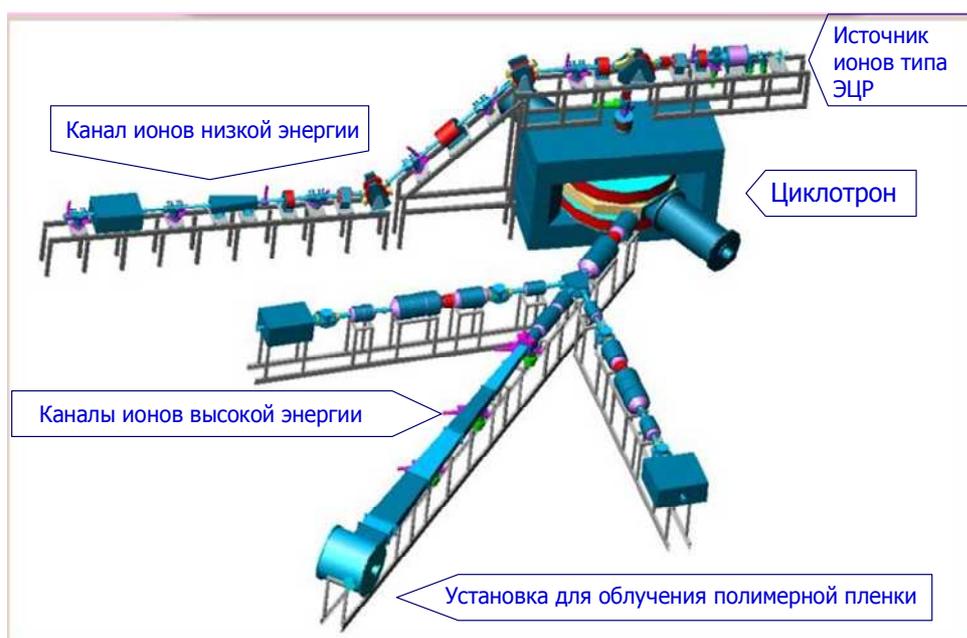


Рис.1. Типичная схема циклотрона тяжелых ионов ЛЯР для прикладных задач

Внешний источник ионов установлен сверху на магните циклотрона. Пучки ионов ЭЦР источника могут инжектироваться по каналу аксиальной инжекции в центр циклотрона для ускорения либо транспортироваться по каналу на физическую установку для проведения экспериментов на пучках ионов низкой энергии. Ускоритель может комплектоваться несколькими каналами пучков высокой энергии в зависимости от поставленных задач, в том числе специализированным каналом и установкой для облучения полимерной пленки.

Циклотронный комплекс тяжелых ионов для промышленного применения включает в себя не только ускоритель, но и инженерное оборудование, обеспечивающее работу циклотрона и установок.

Во **2-й главе** изложена концепция проектирования циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач и промышленного применения с системой аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника, разработанная в ЛЯР ОИЯИ. Показаны способы расчета и критерии выбора основных параметров систем циклотрона: канала инжекции пучка, магнитной структуры циклотрона, высокочастотной ускоряющей системы, системы вывода пучка из ускорителя, каналов транспортировки ускоренного пучка, требований к инженерным системам, обеспечивающих работу циклотрона.

Ионный источник

Ионный источник во многом определяет параметры систем циклотрона. При выборе источника ионов нужно учитывать не только его возможности по генерации интенсивных пучков ионов высокого заряда, но и эксплуатационные свойства. Для циклотронов, ускоряющих ионы от Ar до Xe до энергии 2-4 МэВ/нуклон, оптимальным образом подходят источники с частотой 14 или 18 ГГц. При выборе типа магнитной структуры (сверхпроводящие обмотки или медные) нужно учитывать преимущества и недостатки:

источник ионов с медными обмотками:

- более дешевый в производстве по сравнению со сверхпроводящим,
- простой, надежный и дешевый в эксплуатации и сервисном обслуживании,
- потребляет в 3-5 раз больше электроэнергии по сравнению со сверхпроводящим вариантом;

сверхпроводящий вариант:

- экономичный по электропотреблению,
- позволяет получать более интенсивные пучки тяжелых многозарядных ионов, поскольку есть возможность работы на более высоких частотах, однако:
- дорог в производстве и сервисном обслуживании,
- нужны 1-2 недели для выхода на рабочий температурный режим,
- требует надежную бесперебойную сеть электропитания.

В проектах циклотронов для прикладных задач и промышленного использования, разработанных в ЛЯР, используются источники ионов, работающих на частоте 14 и 18 ГГц. Источники ионов DECRIS-3, DECRIS-4, DECRIS-5 имеют медные обмотки катушек для создания магнитного поля, источники DECRIS-SC и DECRIS-SC2 построены с использованием сверхпроводящей технологии. Параметры пучков источников DECRIS приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры пучков источников DECRIS

Источник ионов	Частота	Потребляемая мощность	Интенсивность пучков	
DECRIS-3	14 ГГц	60 кВт	O ⁵⁺ - 660 мкА Ar ⁸⁺ - 600 мкА	Kr ⁹⁺ - 100 мкА Xe ¹⁸⁺ - 45 мкА
DECRIS-4	14 ГГц	60 кВт	O ⁵⁺ - 400 мкА Ar ⁸⁺ - 400 мкА	Kr ¹¹⁺ - 110 мкА Xe ²⁰⁺ - 25 мкА
DECRIS-SC (сверхпроводящий)	18 ГГц	20 кВт	Ar ⁸⁺ - 400 мкА	Kr ¹⁵⁺ - 110 мкА Xe ²³⁺ - 30 мкА
DECRIS-5	18 ГГц	150 кВт	Ar ⁸⁺ - 1200 мкА	Kr ¹⁵⁺ - 325 мкА Xe ²⁰⁺ - 220 мкА

Аксиальная инжекция пучка

Система внешней инжекции пучка для циклотронов тяжелых ионов имеет ряд преимуществ, главные из которых – возможность использования внешнего ЭЦР источника ионов, отсутствие натекания рабочего газа из ионного источника в камеру циклотрона, возможность многомесячной работы циклотрона без остановок на профилактические работы.

Вместе с тем при создании системы аксиальной инжекции требовалось решить ряд задач, обеспечивающих высокий коэффициент трансмиссии пучка по каналу инжекции и эффективный захват в ускорение.

Энергия инжекции

Повышение энергии инжекции пучка ионов в целом положительно сказывается на эффективности транспортировки пучка по каналу инжекции, поскольку это ведет к улучшению эмиттанса пучка из ионного источника, снижению влияния эффекта пространственного заряда. Это требование особенно важно для сильноточных инжекторов.

Максимальным напряжением инжекции, при котором обеспечивается надежная работа источников этого типа, является 25 кВ. Дальнейшее повышение напряжения инжекции возможно с использованием высоковольтной платформы, что для циклотронов тяжелых ионов промышленного применения экономически не обоснованно.

Минимальное напряжение инжекции определяется из расчетов динамики движения пучка в центре циклотрона, где должно быть обеспечено прохождение пучка вокруг конструктивных элементов центральной области. Нужно учитывать также эффект падения интенсивности пучка из ионного источника с уменьшением напряжения. Минимальным напряжением $U_{инж}$ для циклотрона тяжелых ионов можно принять 10 кВ.

Решая задачу выбора напряжения инжекции, нужно учитывать также технические возможности создания инфлектора, т.е. должны быть обеспечены пробойные зазоры в условиях ограниченного пространства. Кроме того, для сохранения геометрии центральной области при изменении отношения массы к заряду ускоряемых ионов следует соблюдать принцип “постоянной геометрии”. Для этого необходимо обеспечить выполнение соотношения $U_{инж} \cdot (A/Z) = const$, где A и Z – масса и заряд ионов.

Фокусирующие элементы

Требования к системе транспортировки определяет эмиттанс ионного пучка, который должен быть согласован с аксептансом системы. Эмиттанс пучка определяется типом ионного источника и составляет 120 – 220 п мм·мрад для ЭЦР источников.

Электростатические линзы имеют преимущество в том, что потребляют мало мощности. Вместе с тем есть проблемы с загрязнением изоляторов, поскольку тяжелые

ионы производят распыление материала бомбардируемых поверхностей.

Магнитные линзы типа соленоида осуществляют фокусировку продольным полем, поэтому действие на пучок относительно слабое, что приводит к необходимости создания сильных полей и потреблению большой электрической мощности. Характерное поле на оси линзы ~ 2-5 кГс, потребление мощности 2-7 кВт.

Магнитные квадрупольные линзы имеют маломощные источники питания, но их число в два раза больше по сравнению с соленоидами, нужно учитывать эффект вращения осей пучка (x; y) в продольном магнитном поле в аксиальном канале магнита. Настройка режима транспортировки имеет более сложный алгоритм.

Анализирующий магнит

Анализирующий магнит, установленный в системе аксиальной инъекции пучка, выполняет две функции: поворот пучка на 90° из горизонтальной в вертикальную часть канала и сепарацию ионов по зарядам.

В магните используется краевая фокусировка, которая обеспечивает симметричный фокус пучка после магнита, что полезно для улучшения разрешения пучков разного заряда.

Из технических решений следует отметить необходимость использования камеры анализирующего магнита с большой апертурой. Интенсивная бомбардировка стенок вакуумной камеры потерянными ионами при сепарации вызывает стимулированную десорбцию газа с поверхности и распыление материала камеры. Для снижения потерь пучка из-за перезарядки на остаточном газе камера должна иметь хорошую вакуумную проводимость для эффективной откачки. Для снижения распыления материала камеру целесообразно изготовить или плакировать слабо распыляемыми материалами – такими как титан, молибден, вольфрам, алюминий.

Инфлектор

Для поворота пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона используется инфлектор. В настоящее время получил наибольшее распространение спиральный инфлектор. Он компактный, имеет низкое напряжение на электродах (0,3-0,5 напряжения инъекции), хорошие оптические свойства. Сложная геометрия электродов рассчитывается с использованием специализированных компьютерных программ, изготовление может быть выполнено на станках ЧПУ.

Система группировки пучка

Фазовый аксептанс циклотрона составляет примерно 20-30°, это означает, что при равномерной плотности пучка по времени в ускорение может быть захвачено от 5 до 8% пучка. Система внешней инъекции позволяет произвести компрессию частиц в нужный диапазон фаз за счет использования системы группировки пучка.

Для получения максимального коэффициента захвата банчер должен увеличивать скорость ионов пропорционально их фазе для того, чтобы после прохождения участка дрейфа все частицы на входе в первый ускоряющий зазор дуанта находились в одной фазе. Это свойство банчера требует пилообразной формы напряжения. Современные возможности позволяют получить форму напряжения на банчере близкой к пилообразной. Однако электроды линейного банчера можно разместить только вне аксиального канала магнита, поскольку генератор пилообразного напряжения должен располагаться непосредственно около электродов банчера. При больших токах инжектируемого пучка расположение линейного банчера на расстоянии в несколько метров от центра циклотрона значительно снижает его положительные свойства из-за дебанчирующих эффектов в канале инъекции и прежде всего эффекта пространственного заряда. Поэтому часто используют синусоидальный банчер, который можно расположить в аксиальном канале

на расстоянии около 500 мм от центра, он работает эффективно при интенсивности пучка в несколько десятков мкА.

В ЛЯР разработана и внедрена система двойной банчировки пучка для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка высокой интенсивности. В системе с двойной банчировкой линейный банчер располагается вне аксиального канала полюса магнита. Его назначение – сгруппировать инжектируемые ионы в 180° интервал фаз в зоне расположения синусоидального банчера, который эффективно работает в этом диапазоне фаз.

Впервые такая система была применена на циклотроне У-400 для получения интенсивного пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{5+}$. Захват пучка в ускорение при низкой интенсивности пучка 2-3 мкА достигал 65 %, при интенсивности пучка 70-80 мкА – 25-30%. В более коротком канале инжекции на циклотроне ДЦ-110 коэффициент захвата в ускорение около 35% был получен при интенсивности инжектируемого пучка ~ 100 мкА. Такие коэффициенты невозможно было получить при использовании одного из банчеров.

Принципиальная схема аксиальной инжекции пучка для циклотронов тяжелых ионов, разработанная в ЛЯР, приведена на рис. 2.

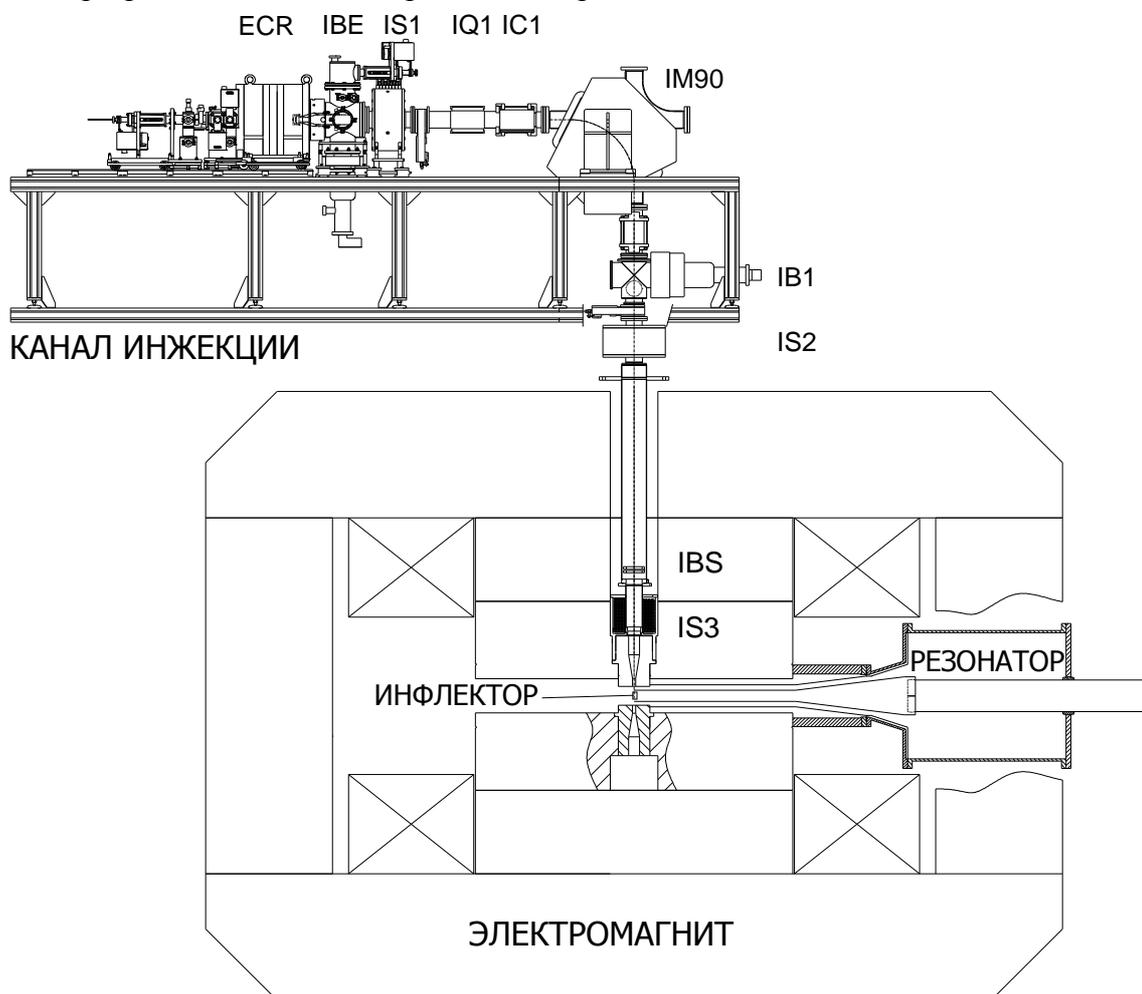


Рис. 2. Принципиальная схема системы аксиальной инжекции пучка циклотрона тяжелых ионов

Магнитная структура циклотронов

Магнитные системы циклотронов тяжелых ионов, разработанных в ЛЯР, построены на базе Ш-образных магнитов. Такой тип магнитов дает свободный доступ к вакуумной камере циклотрона и обслуживанию узлов ускорителя. Магнитная структура

циклотрона создается с использованием секторов с прямыми границами, обеспечивает достаточную фокусировку в процессе ускорения и наиболее проста в производстве.

Процесс оптимизации магнитных структур циклотронов ЛЯР сочетает аналитический, численный и экспериментальный подходы к моделированию и формированию магнитной структуры изохронного циклотрона.

На первом этапе оптимизация осуществляется на основе эмпирических закономерностей, полученных расчетным и экспериментальным путем при создании циклотронов У200, У400, МЦ400, ИЦ100, ДЦ-72, У400Р. Полученные закономерности объединены в аналитический программный блок, позволяющий проводить оценку размеров магнитопровода, параметров обмотки возбуждения и корректирующих обмоток, геометрии элементов рабочего зазора.

Результаты оптимизации первого этапа являются исходными параметрами для последующего численного моделирования трехмерных магнитных структур. На последнем этапе производятся измерение магнитного поля на циклотроне и корректировка в случае необходимости. Компьютерное моделирование магнитной структуры сопровождается расчетами динамики пучков при ускорении в нескольких рабочих режимах.

Особо стоит отметить задачу по компенсации влияния пассивного магнитного канала, используемого для фокусировки пучка в системе вывода пучков из циклотрона. Установка магнитного канала вносит несимметричность в распределение магнитного поля. С одной стороны, это приводит к изменению радиального распределения среднего магнитного поля, с другой – к появлению первой гармоники азимутального распределения поля.

На финальной стадии расчетов в компьютерную модель электромагнита циклотрона вносятся данные измерений магнитных свойств стали, применяемой в производстве элементов магнитопровода, и проводится анализ деформации элементов магнитной структуры, вызванной действием пондеромоторной силы.

Измерение магнитного поля производится при отсутствии магнитного канала, поскольку система магнитных измерений не может быть смонтирована при установленных в рабочее положение каналах. Таким образом, рабочее поле циклотрона является суперпозицией сформированного и измеренного поля при отсутствии магнитного канала и расчетного вклада магнитного поля от магнитного канала. Метод комбинированного формирования поля был применен на ускорителях ЛЯР и показал хорошие результаты. Параметры полученных пучков соответствуют расчету.

Высокочастотная ускоряющая система

Дуанты располагаются между секторами, поэтому их угловая протяженность зависит от узловой протяженности сектора и находится в диапазоне 40–50°.

Для получения ускоряющего напряжения на дуантах циклотрона создается резонансная система, состоящая из следующих узлов:

- два расположенных диаметрально противоположно четвертьволновых коаксиальных резонатора – стальные баки, плакированные внутри бескислородной медью, и медные штоки, переходящие в дуанты;
- закорачивающая медная пластина с прижимными шарообразными контактами, которая используется для изменения частоты резонаторов;
- петля связи, передающая высокочастотную мощность от генератора в резонансную систему;
- триммера точной подстройки резонансной частоты;
- пикап-электроды и измерительные петли для измерения напряжения на дуантах.

Резонансная ускоряющая система может быть выполнена в 2 вариантах:

1. автономные резонаторы,
2. связанные в центре четвертьволновые резонаторы.

Резонансная система, состоящая из двух четвертьволновых резонаторов, соединенных в центре перемычкой, практически представляет собой один полуволновой резонатор. В этом случае можно производить ввод мощности через одну петлю связи и иметь один элемент автоматической подстройки частоты. Главное преимущество такой системы – более простая система управления, в результате не требуется система фазирования напряжения на дуантах. Однако перемычка в центре циклотрона требует пространства для установки, что не всегда возможно, в этом случае используются независимые резонаторы.

Расчет резонансной системы производился с помощью программы “CyclReso”, разработанной в ЛЯР ОИЯИ. Эта программа позволяет производить предварительные расчеты параметров резонаторов ускорителей. Программа рассчитывает параметры резонаторов “классического” вида, когда коаксиальный четвертьволновый резонатор нагружен плоским дуантом, расположенным в долине циклотрона.

У циклотронов тяжелых ионов для снижения потерь частиц в процессе ускорения необходимо иметь вакуум в камере циклотрона $\sim 10^{-7}$ Торр. Для снижения газоотделения с поверхности резонаторов применена технология изготовления резонаторов из нержавеющей стали и плакированных внутри бескислородной медью методом диффузионной сварки или другим способом.

Для циклотронов, имеющих вариацию частоты ускоряющей системы, применяются подвижные закорачивающие пластины с шариковыми контактами. Такая конструкция позволяет производить движение закорачивающей пластины при полной мощности ВЧ-генератора. Для циклотронов, которые работают на фиксированной частоте, применение закорачивающей пластины с шариковыми контактами нецелесообразно из-за стоимости изготовления. В таких случаях можно использовать более простую конструкцию контактов, выполненных в виде коротких тонких медных пластин, соединяющих подвижную пластину с внутренней стенкой резонатора. Такая конструкция позволяет варьировать частоту в пределах 1-2% от номинальной, что достаточно для оперативной подстройки в рабочем режиме.

Триммер автоматической подстройки частоты предназначен для поддержания резонанса при изменении температурного режима резонатора. Диапазон подстройки триммера составляет 0,3 – 1% от рабочей частоты резонатора.

Система вывода пучка из циклотрона

Вывод пучка ионов из циклотрона производится двумя основными методами:

1. метод перезарядки ионов на тонкой фольге,
2. электростатический вывод.

Вывод пучка методом перезарядки эффективно работает для легких ионов и ионов высокой энергии. Поскольку циклотроны тяжелых ионов промышленного применения должны производить пучки ионов с массой до Хе и энергией 1-2,5 МэВ/нуклон, то метод вывода пучка с использованием перезарядных фольг является неэффективным, из-за разброса по зарядам и малого времени жизни фольги. В циклотронах тяжелых ионов с энергией 1-2,5 МэВ/нуклон целесообразно использовать систему вывода пучка с помощью электростатического дефлектора. Она имеет более высокий коэффициент вывода по сравнению с системой вывода методом перезарядки. Система электростатического вывода пучка должна включать в себя пассивный фокусирующий канал для согласования эмиттанса пучка с аксептансом канала транспортировки. Влияние «железа», расположенного в магнитном канале, должно учитываться при формировании магнитного поля циклотрона. Эффективность вывода пучка, экспериментально полученная на циклотронах ИЦ-100, ДЦ-60, ДЦ-110, составляет 60-70%.

Вакуумная система циклотрона

Процесс оптимизации вакуумной системы циклотрона заключается в нахождении компромисса между требованием к снижению потерь пучка из-за перезарядки на остаточном газе и техническими возможностями и стоимостью создания вакуумной системы.

Вакуумная система циклотрона состоит из трех подсистем, каждая из которых имеет свои требования к уровню вакуума и технологии подготовки внутренних поверхностей.

1. *Вакуумная подсистема ионного источника и канала аксиальной инжекции пучка.* Особенности: ионы имеют низкую энергию, высокое сечение перезарядки, длина канала примерно 5-10 м.
2. *Вакуумная подсистема камеры циклотрона.* Особенности: ионы набирают энергию от энергии инжекции до максимальной на радиусе вывода, сечение падает с ростом энергии ионов, это нужно учитывать при расчетах.
3. *Вакуумная подсистема каналов транспортировки ускоренных пучков.* Особенности: ускоренные и выведенные ионы в каналах транспортировки имеют низкое сечение перезарядки, основное требование к вакууму, как правило, сводится к снижению натекания газа из ионопровода в вакуумную камеру циклотрона, которое не влияет на давление в камере.

На базе экспериментальных данных и теоретических моделей в Лаборатории ядерных реакций разработаны программы GENAP и VACLOS, позволяющие оценивать потери ионов из-за перезарядки на остаточном газе и получать исходные данные для проектирования вакуумных систем циклотронов тяжелых ионов. Для ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110 в таблице 3 приведено давление в вакуумных объемах циклотронов, при котором вакуумные потери пучка Хе не превышают 10-15%.

Таблица 3. Необходимое давление в вакуумных объемах ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110

	ИЦ-100	ДЦ-60	ДЦ-110
Энергия ускоренных ионов, МэВ/нуклон	1-1,2	0,35-1,77	2,5
Система аксиальной инжекции пучка, Торр	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Камера циклотрона, Торр	$2 \cdot 10^{-7}$	$(1-2) \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Канал транспортировки пучка ускоренных ионов, Торр	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3-4 \cdot 10^{-6}$

Выходы нейтронов и гамма-квантов из конструкционных металлов при облучении тяжелыми ионами с энергией до 2,5 МэВ/нуклон

Чтобы определить исходные данные для расчета биологической защиты, был проведен анализ выхода нейтронов и гамма-квантов при взаимодействии ускоренных ионов с различными материалами. Анализ базируется на экспериментальных данных, полученных на циклотронах ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110 и опубликованных в литературе, и расчетах, выполненных с использованием программ LISE⁺⁺ и «NRV Project».

Для проектирования наиболее интересны результаты выходов нейтронов при взаимодействии тяжелых ионов с конструкционными материалами: алюминием, медью, нержавеющей сталью. В таблице 4 приводятся экспериментальные данные, полученные на ДЦ-110 для ионов $^{40}\text{Ar}^{+6}$, $^{86}\text{Kr}^{+13}$, $^{132}\text{Xe}^{+20}$ при энергии 2,5 МэВ/нуклон. Общая ошибка измерения оценивается $\pm 30\%$.

Таблица 4. Выходы нейтронов (нейтрон/ион) из толстой мишени

Мишень/ион пучка	$^{40}\text{Ar}^{+6}$	$^{86}\text{Kr}^{+13}$	$^{132}\text{Xe}^{+20}$
Ве	$(9,3 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	$(3,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-6}$	$(2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$
С	$(2,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$(1,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$(3,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-8}$
Al	$(7,5 \pm 2,5) \cdot 10^{-6}$	$(7,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$	$(2,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$
Cu	$(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$
Нерж. сталь (12X18Н10Т)	$(2,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-6}$	-	-

В 3-й главе представлен проект глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 – первого в мире специализированного ускорителя тяжелых ионов, созданного для промышленного производства трековых мембран. ИЦ-100 был разработан в 1985 году в ЛЯР ОИЯИ. Циклотрон предназначался для ускорения ионов от углерода ($^{12}\text{C}^{+2}$) до аргона ($^{40}\text{Ar}^{+7}$) с фиксированной энергией около 1,2 МэВ/нуклон при ускорении на 4-й гармонике высокочастотной системы и около 0,6 МэВ/нуклон при ускорении на 6-й гармонике ВЧ. На ускорителе использовался внутренний источник ионов типа PIG, который полностью определял массовый диапазон ускоряемых ионов.

Целью проекта модернизации комплекса ИЦ-100 было расширение диапазона ускоряемых ионов в сторону более тяжелых масс, повышение интенсивности пучков.

В ходе реконструкции на циклотроне ИЦ-100 созданы и установлены:

- внешний сверхпроводящий источник ионов,
- высокоэффективная система аксиальной инжекции пучка,
- электростатическая система вывода,
- специализированный канал и установка для облучения полимерной пленки,
- система вакуумной откачки на основе турбомолекулярных и криогенных насосов,
- новая система управления на базе микропроцессорной техники с подсистемами автоматического контроля и поддержания оптимального режима облучения.

На циклотронном комплексе ИЦ-100 после проведенной модернизации были получены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W с энергией около 1-1,2 МэВ/нуклон.

Циклотрон ИЦ-100 разработан для ускорения многозарядных ионов с отношением массы к заряду (A/Z) в диапазоне $5,3 \div 6,0$. Для получения тяжелых ионов в заданном диапазоне A/Z был создан сверхпроводящий ЭЦР источник ионов с уровнем аксиального магнитного поля до 3 Тл и частотой СВЧ нагрева плазмы 18 ГГц.

Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ИЦ-100 приведена на рисунке 3. Основными ионно-оптическими элементами канала являются фокусирующие соленоиды, корректирующая квадрупольная линза Q, анализирующий магнит АМ и корректирующие дипольные магниты.

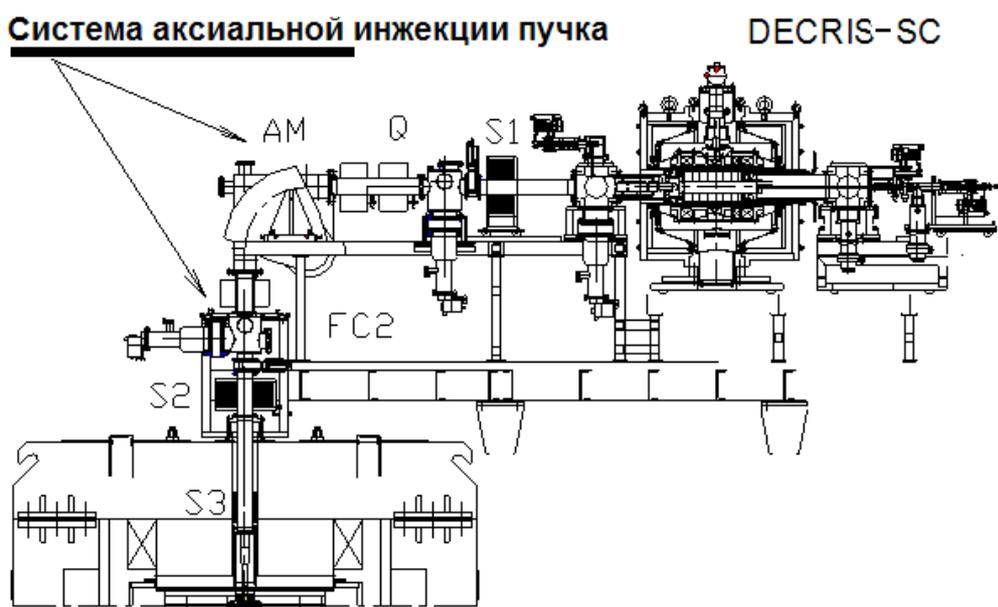


Рис. 3. Канал аксиальной инжекции. Общая длина канала – 5222 мм.

DECRISS-SC – сверхпроводящий ЭЦР-источник, АМ – анализирующий магнит, S1, S2, S3 – фокусирующие соленоиды, Q – корректирующая квадрупольная линза, FC2 – цилиндр Фарадея. Банчер расположен внутри блока диагностики FC2

Инжектируемый пучок ионов из аксиального канала поворачивается в медианную плоскость циклотрона с помощью спирального инфлектора.

Система банчировки с использованием синусоидального банчера на первой гармонике высокочастотной ускоряющей системы позволяет увеличить плотность частиц в диапазоне фаз, ускоряемых в циклотроне, и тем самым увеличить эффективность захвата примерно в три раза. Из конструктивных соображений банчер размещён в блоке диагностики канала аксиальной инжекции пучка на расстоянии 1800 мм от медианной плоскости.

Были проведены исследование и оптимизация процесса ускорения в циклотроне, полученное распределение интенсивности ионов $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{86}\text{Kr}^{15+}$ и $^{132}\text{Xe}^{23+}$ по радиусу приведено на рисунке 4. В центральной области циклотрона между первым ускоряющим зазором и вплоть до радиуса ~ 150 мм происходит фазовая сепарация пучка. Экспериментально полученный фазовый захват пучка в режим ускорения составляет около 10%, что соответствует фазовому акцептансу циклотрона $\sim 35^\circ$. При включении банчера эффективность захвата пучка увеличивается почти в три раза. Экспериментально измеренные зависимости интенсивности ускоренного пучка различных ионов на выводном радиусе как функция давления в вакуумной камере циклотрона в сравнении с расчетом приведены на рис. 5.

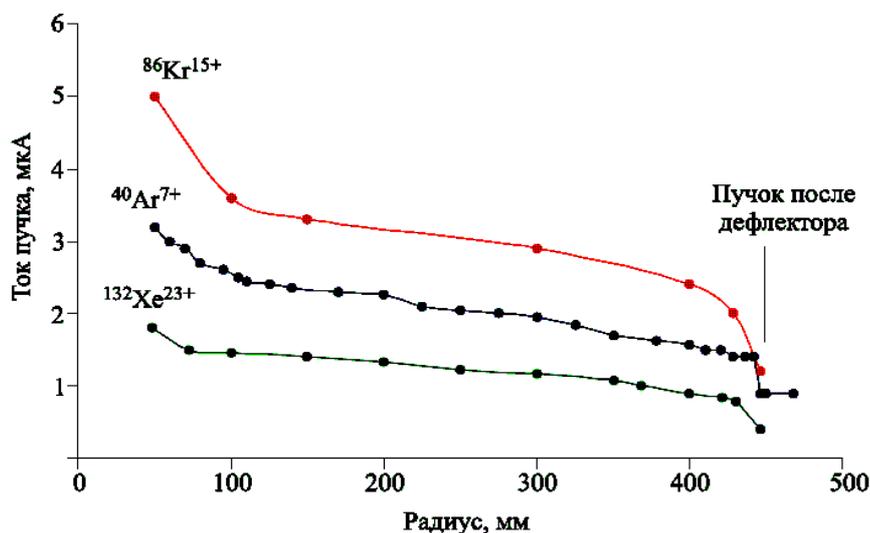


Рис. 4. Распределение тока пучка по радиусу при ускорении различных ионов в циклотроне ИЦ-100. Спад интенсивности в центре циклотрона определяется фазовой селекцией на первых оборотах

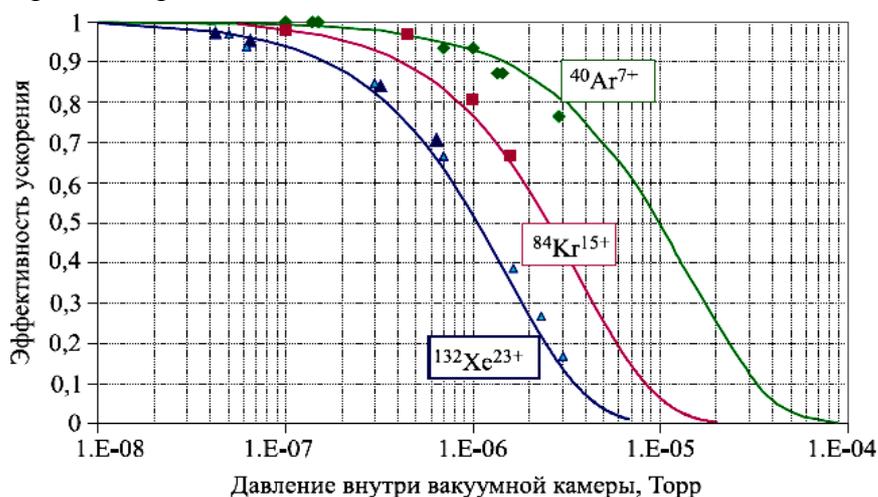


Рис. 5. Потери ионов при ускорении в циклотроне ИЦ-100 в зависимости от давления в вакуумной камере. Кривые – результаты расчетов. Знаки – данные измерений

Система вывода ИЦ-100 состоит из электростатического дефлектора и двух пассивных фокусирующих магнитных каналов. Рабочее напряжение на дефлекторе составляет 50 кВ при зазоре между потенциальным и заземленным электродами в 10 мм. После настройки системы вывода эффективность прохождения ионов через дефлектор составила ~70%, через магнитные каналы ~70%, что близко к расчетным значениям.

Ускоритель ИЦ-100 оборудован одним каналом с установкой для облучения полимерной пленки. Канал транспортировки пучка оснащен фокусирующими линзами и системой сканирования пучка, которая обеспечивает равномерное облучение поверхности мишени шириной 600 мм, высотой 300 мм. Система сканирования состоит из двух магнитов, один из которых разворачивает пучок по линейному закону по горизонтали с частотой 100 Гц, а другой – по вертикали с частотой 210 Гц.

Облучение полимерной пленки производится в вакуумной камере установки облучения. Скорость перемотки пленки может варьироваться от 0,02 до 1 м/с.

Основные параметры модернизированного ускорительного комплекса ИЦ-100 и интенсивности пучков ускоренных и выведенных ионов приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5. Сравнение проектных и реализованных параметров ИЦ-100

№	Параметр	Проектные значения	Реализовано в эксплуатации
1	Ускоряемые ионы	Ar, Kr, Xe	$^{22}\text{Ne}^{+4}$, $^{40}\text{Ar}^{+7}$, $^{56}\text{Fe}^{+10}$, $^{86}\text{Kr}^{+15}$, $^{127}\text{I}^{+22}$, $^{132}\text{Xe}^{+23}$, $^{132}\text{Xe}^{+24}$, $^{182}\text{W}^{+32}$, $^{184}\text{W}^{+31}$, $^{184}\text{W}^{+32}$
2	Диапазон ускоряемых ионов (A/Z)	5,3-6,0	5,5-5,95
3	Гармоника ускорения	4	4
4	Энергия ионов	1-1,2 МэВ/нукл.	0,9-1,2 МэВ/нукл.
5	Среднее магнитное поле	1,88-2,01 Тл	1,78-1,93 Тл
6	Частота ВЧ системы	20,4-20,9 МГц	19,8-20,6 МГц
7	Энергия инъекции	12,5 кВ	14-15 кВ
8	Вакуум в канале инъекции	$5 \cdot 10^{-7}$ Торр	$1,5 \cdot 10^{-7}$ Торр
9	Рабочий вакуум в циклотроне	$5 \cdot 10^{-7}$ Торр	$5 \cdot 10^{-8}$ Торр
10	Напряжение на дуанте	50 кВ	45-55 кВ
11	Эффективность транспортировки пучка по каналу инъекции	0,8	0,5-0,8
12	Эмиттанс пучка из ЭЦР источника после сепарации	250π мм·мрад (4 RMS)	~ 250π мм·мрад (оценка) (4 RMS)
13	Акцептанс канала инъекции	225π мм·мрад	~ 220π мм·мрад (оценка)
14	Однородность облучения полимерной пленки	± 10%	± 10%

Таблица 6. Интенсивности пучков ионов, ускоренных и выведенных на ИЦ-100

Элемент	Ион	A/Z	Ток пучка на мишени в проведенных экспериментах	Максимальный полученный ток пучка
Неон	$^{22}\text{Ne}^{+4}$	5,5	0,7 мкА	
Аргон	$^{40}\text{Ar}^{+7}$	5,714	2,5 мкА	
Железо	$^{56}\text{Fe}^{+10}$	5,6	0,5 мкА	
Криптон	$^{86}\text{Kr}^{+15}$	5,733	3,5 мкА	3,5 мкА
Йод	$^{127}\text{I}^{+22}$	5,773	0,25 мкА	
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{+23}$	5,739	3,7 мкА	3,7 мкА
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{+24}$	5,5	0,6 мкА	
Вольфрам	$^{182}\text{W}^{+32}$	5,6875	0,015 мкА	0,015 мкА
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{+31}$	5,9355	0,035 мкА	0,035 мкА
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{+32}$	5,75	0,017 мкА	0,017 мкА

В 4-й главе дано описание специализированного комплекса ДЦ-60, разработанного и созданного в ЛЯР ОИЯИ для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (Астана, Казахстан).

Циклотрон ДЦ-60 (рис. 6) предназначен для ускорения интенсивных пучков тяжелых ионов от лития до ксенона с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон.

На циклотроне установлен источник ионов электронно-циклотронного резонанса с рабочей частотой 14 ГГц, созданы система аксиальной инжекции и канал пучков ионов низкой энергии от 10 до 25 кВ·заряд, получаемых из источника ионов.

Электромагнит циклотрона ДЦ-60 имеет Ш-образную форму. Магнитная структура состоит из 4 пар секторов. Для обеспечения изохронизма угловая протяженность секторов увеличивается с ростом радиуса от 36° до 50° . Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами. В зазоре магнита между секторами и полюсом расположены по две сборки азимутальных гармонических катушек и шесть пар радиальных корректирующих катушек. Изохронное магнитное поле циклотрона ДЦ-60 было сформировано профилем секторов на уровне 1,45 Тл для ускорения ионов с $A/Z=7$. При изменении среднего магнитного поля в рабочем диапазоне 1,25-1,65 Тл или изменении A/Z для создания изохронных условий ускорения требуется использование системы токовой коррекции.

Высокочастотная ускоряющая система состоит из двух четвертьволновых резонаторов, двух дуантов, соединенных в центре перемычкой. Изменение частоты осуществляется путем перемещения закорачивающих пластин внутри резонансных баков. Питание ускоряющей системы производится от одного ВЧ генератора.

Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором и фокусирующим магнитным каналом. Система транспортировки ускоренных пучков состоит из канала для облучения полимерных пленок и двух каналов для прикладных исследований, оборудованных физическими установками. Основные параметры ДЦ-60 приведены в таблице 7.



Рис.6. Фотография ДЦ-60. Вверху – ЭЦР источник, линия инжекции и канал ионов низких энергий. Внизу – каналы транспортировки ускоренных пучков и канал трековых мембран

Таблица 7. Основные параметры циклотрона ДЦ-60

Ускоряемые ионы	от Li до Xe
Диапазон ускоряемых ионов	$A/Z = 6-12$
Энергия ионов, МэВ/нуклон	0,35 -1,77
Рабочий вакуум в камере циклотрона	$8 \cdot 10^{-8}$ Торр
Магнит	
Диаметр полюса магнита, мм	1620
Вес магнита, т	103,5
Количество секторов	4
Среднее магнитное поле, Тл	1,25 -1,65
Угловая протяженность сектора (спиральность)	$36^{\circ}-50^{\circ}$ (0°)
Поле между секторами / в долине, Тл	1,92 / 1
Частота радиальных/вертикальных колебаний ν_r / ν_z	1,016 / 0,36
Мощность системы питания магнита, кВт	45
Радиальные корректирующие катушки	6 пар
Азимутальные корректирующие катушки	2 секции по 2 пары
ВЧ система	
Частота, МГц / гармоника ускорения	11-17,4 / 4 и 6
Амплитуда напряжения на дуантах, кВ	65
Мощность генератора, кВт	20
ЭЦР источник	
Частота СВЧ генератора, ГГц / мощность, Вт	14,3 / 1000
Напряжение инъекции, кВ	11-25
Эмиттанс пучка после сепарации в АМ, мм·мрад	$120-140\pi$ (RMS)
Канал инъекции	аксиальный
Магнит АМ90, поле, кГс / межполюсный зазор, мм	1,4 / 100
Поле в соленоидах IS1/ IS2 / IS3 (B_{max}), кГс	4,4 / 1,9 / 2,1
Акцептанс канала, мм·мрад	160π
Спиральный инфлектор	два типа для 4 и 6 гармоники
Магнитный радиус – вариант А / вариант В, мм	29 ($A/Z = 6-8$) / 35 ($A/Z = 8-12$)
Напряжение на электродах, кВ	$\pm 7,5$ (вариант А) / ± 5 (вариант В)
Электростатический дефлектор	
Максимальное напряжение / зазор	60 кВ / 10 мм
Магнитный канал	пассивный
Азимутальная протяженность / градиент, кГс/см	28° / 3,5-4

Энергия ускоренных частиц варьируется от 0,35 до 0,8 МэВ/нуклон при ускорении на 6-й гармонике и от 0,75 до 1,77 МэВ/нуклон при ускорении на 4-й гармонике. На рис.7 представлена рабочая диаграмма, которая связывает среднее магнитное поле, энергию ускоренного пучка, частоту обращения ионов и кратность частоты ускоряющего ВЧ поля. Наклонные линии с цифрами от 6 до 12, помещенными в квадратные рамки, показывают соотношение между полем, частотой обращения ионов и энергией ускоренного пучка. В циклотроне ДЦ-60 изохронный рост магнитного поля варьируется от 6 до 26 Гс в зависимости от энергии ускоренного иона (линии, обозначенные на диаграмме цифрами $0,0005 \div 0,0025T$). Рабочая диаграмма разбита на две области, соответствующие режимам ускорения на 4-й и на 6-й гармониках ускоряющей системы.

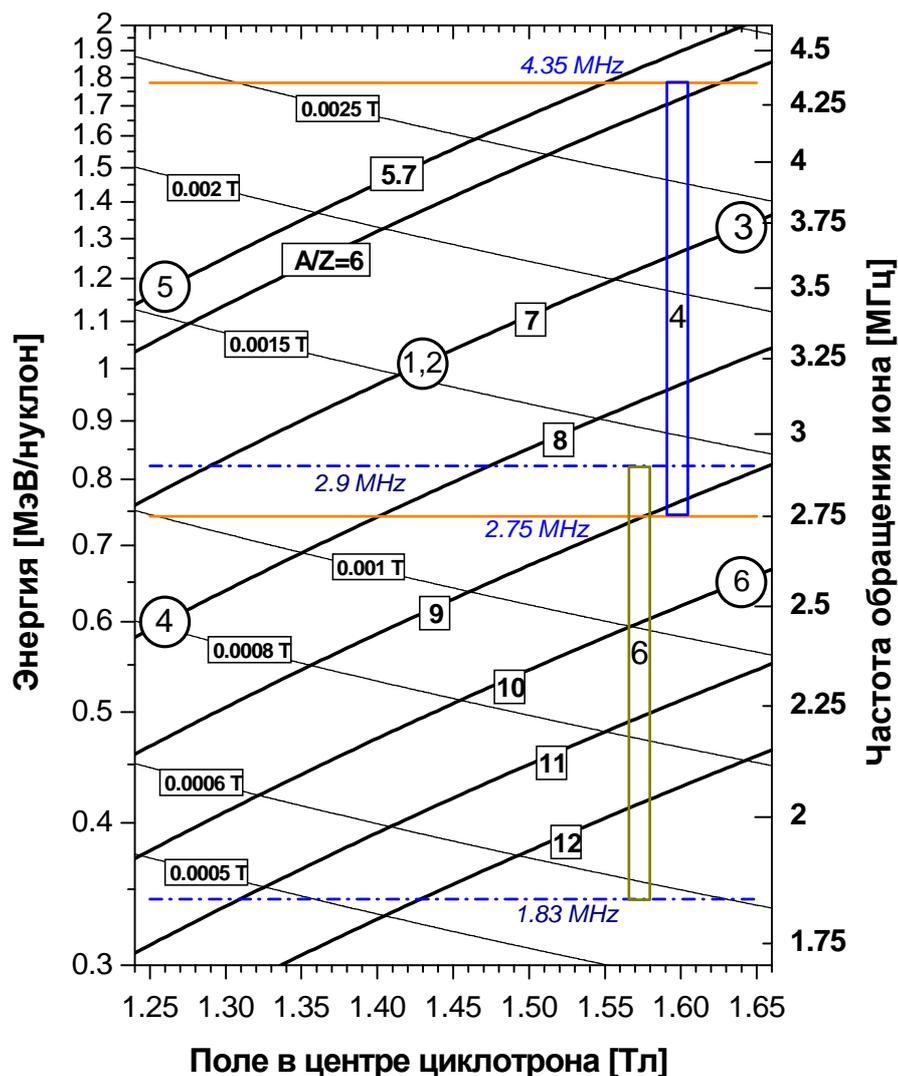


Рис.7. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60

На циклотроне ДЦ-60 была выполнена программа исследований режимов ускорения во всем рабочем диапазоне и получены проектные параметры ускоренных и выведенных пучков ионов. Положение рабочих тестовых режимов отмечено на диаграмме цифрами от 1 до 7. В таблице 8 представлены параметры режимов ДЦ-60 и интенсивности пучков, полученных в процессе ускорения и вывода.

Пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$, $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{40}\text{Ar}^{4+}$ с $A/Z=7$ на среднем уровне поля $B=1,42$ Тл был получен на конечном радиусе с высоким коэффициентом трансмиссии более 90% без использования системы коррекции магнитного поля. В других режимах для получения оптимального режима ускорения потребовалось включение корректирующих катушек. Эффективность ускорения внутри циклотрона ДЦ-60, измеренная на разных уровнях магнитного поля во всем диапазоне ускоряемых ионов, составила 94-97%. На рисунке 8 представлена зависимость тока пучка от радиуса ускорения. На радиусах до 350 мм наблюдается разделение орбит пучка. Для всех ионов были сняты резонансные зависимости тока пучка от уровня магнитного поля на различных радиусах ускорения внутри циклотрона и на первом цилиндре Фарадея в канале транспортировки пучка. На рисунке 9 показаны резонансные кривые для пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Симметричное положение резонансных кривых и отсутствие каких-либо заметных потерь в процессе ускорения свидетельствует о высоком качестве формирования магнитного поля циклотрона ДЦ-60 с помощью секторных накладок.

Таблица 8. Параметры режимов и интенсивности пучков, полученных в процессе ускорения и вывода на циклотроне ДЦ-60

Номер на диаграмме	1		2		3	4	5	6	7
Ион	$^{84}\text{Kr}^{12+}$		$^{14}\text{N}^{2+}$		$^{14}\text{N}^{2+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{40}\text{Ar}^{4+}$	$^{40}\text{Ar}^{7+}$	$^{40}\text{Ar}^{4+}$
A/Z	7		7		7	8	10	5,7	10
B, Тл	1,42		1,42		1,64	1,25	1,42	1,25	1,64
E, МэВ/нуклон	1,05		1,05		1,4	0,6	0,5	1,2	0,65
Частота ВЧ, МГц	12,67		12,67		14,42	14,42	13,2	13,6	15,2
Гармоника	4		4		4	6	6	4	6
Инфлектор	“А”		“А”		“А”	“В”	“В”	“А”	“А”
Банчер	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Ток инжекции, мкА	18	18	74	74	31	24	44	42	37
Ток пучка после фазовой селекции, (R≈200 мм), мкА	1	2,7	3,91	10,6	1,6	0,8	1	1,95	1,45
Эффективность захвата в режим ускорения, %	5,5	15	5,3	14,3	5,2	3,3	2,3	4,7	3,9
Ток пучка на радиусе вывода, (R≈700 мм), мкА	0,94	2,5	3,75	10,3	1,5	0,75	0,98	1,85	1,4
Эффективность ускорения, %	94	93	96	97	94	94	98	95	96,5
Ток выведенного пучка, мкА	-	1,7	-	-	0,9	-	-	-	-
Коэффициент вывода, %	-	68	-	-	62	-	-	-	-

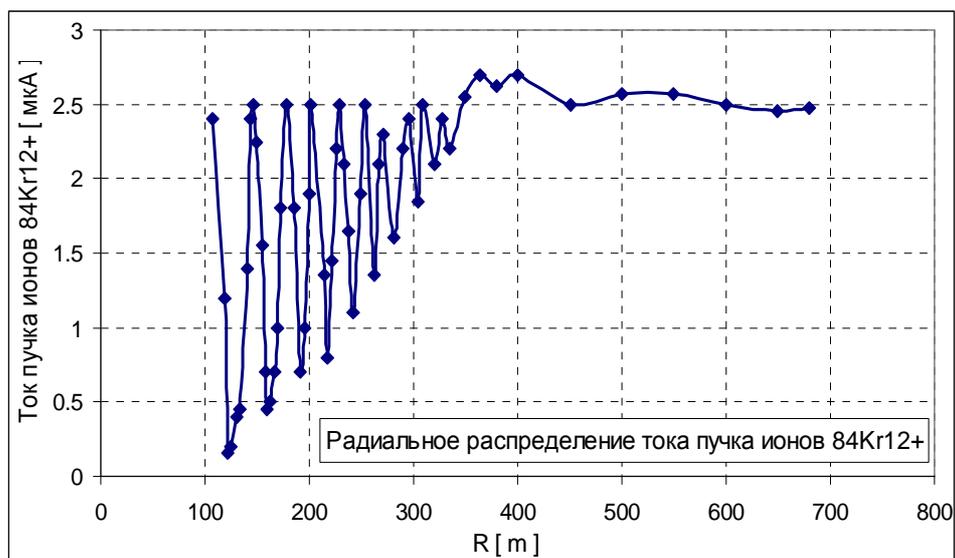


Рис. 8. Радиальная зависимость тока пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Радиальные корректирующие катушки не использовались

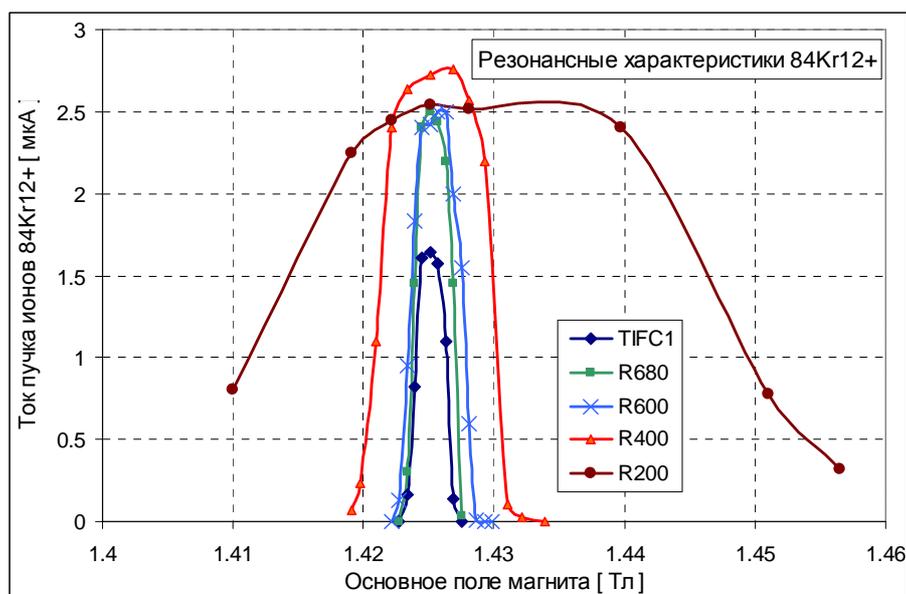


Рис. 9. Резонансные кривые, зависимость тока пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$ на различных радиусах и с цилиндра Фарадея в канале транспортировки от магнитного поля циклотрона

Эффективность захвата несгруппированного пучка в режим ускорения составляет около 5-6% при ускорении на 4-й гармонике ВЧ и около 3-4% при ускорении на 6-й гармонике ВЧ, что соответствует фазовому акцептансу циклотрона 20-30° ВЧ. С включенным банчером коэффициент захвата в режим ускорения улучшается в три раза и составляет 15%.

В результате экспериментального исследования параметров пучков на циклотроне ДЦ-60 было показано, что циклотронный комплекс ДЦ-60 позволяет ускорять, выводить и транспортировать к физическим установкам пучки ионов во всем рабочем диапазоне изменения отношения массы к заряду ионов и вариации уровня магнитного поля. Параметры пучков, ускоренных на циклотроне ДЦ-60 в период пусконаладочных работ, приведены в таблице 9.

Контрольное облучение пленки ионами криптона полностью удовлетворяет условиям промышленного производства полимерных пленок для получения трековых мембран. Высокая интенсивность пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$ позволяет применять систему стабилизации тока пучка на мишени с большой глубиной регулировки. Вакуумная система технологической камеры и канала транспортировки обеспечивает требуемую скорость откатки при перематке пленки.

Таблица 9. Параметры пучков, ускоренных на циклотроне ДЦ-60

Ион	A/Z	E/A, МэВ/нуклон	B, Тл	F _{вч} , МГц	Гармоника	I, мкА	
						в центре,	на выводе
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,05	1,42	12,67	4	10,5	10
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,32	1,64	14,42	4	1,6	1,4
$^{20}\text{Ne}^{3+}$	6,67	1,03	1,4	13,1	4	2,2	2
$^{22}\text{Ne}^{2+}$	11	0,38	1,4	11,65	6	1,9	1,7
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	10	0,5	1,42	13,2	6	1,5	1,3
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	10	0,65	1,64	15	6	1,5	1,3
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,58	1,25	14,42	6	1	0,6
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,98	1,63	12,4	4	0,6	0,5
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,67	1,06	1,4	12,8	4	2	1,9
$^{40}\text{Ar}^{7+}$	5,71	1,14	1,25	13,6	4	1,9	1,8
$^{84}\text{Kr}^{12+}$	7	1,05	1,42	12,67	4	2,7	2,5

5-я глава посвящена проекту нового циклотрона ДЦ-110, который является продолжением развиваемого в ЛЯР направления по созданию специализированных ускорителей для промышленного применения и прикладных исследований. Циклотрон ДЦ-110 разработан для научно-промышленного комплекса «БЕТА», предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови с использованием трековых мембран. В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60, У-400, У-400М, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач.

Циклотронный комплекс ДЦ-110 включает в себя компактный циклотрон тяжелых ионов, инжектор многозарядных ионов на базе ионного источника типа ЭЦР и все инженерные системы, обеспечивающие полный цикл облучения полимерной пленки – первой стадии технологии изготовления трековых мембран. ДЦ-110 производит интенсивные пучки ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

На циклотроне ДЦ-110 не предусматриваются вариация энергии ионов и изменение отношения массы к заряду ускоряемых частиц. Такая концепция обеспечивает повышенную надежность и простоту управления комплексом.

Ускоритель укомплектован одним каналом облучения полимерной пленки. Предусмотрена возможность установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала для увеличения производительности оборудования за счет одновременного облучения пленки на одном канале и подготовки установки на другом.

Для получения пучков ионов с энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран магнит циклотрона с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$, которые имеют близкие отношения массы к заряду: 6,667, 6,615 и 6,600. Это позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле с подстройкой B_0 или $F_{\text{вч}}$ в небольшом диапазоне. На основе анализа динамики движения пучка выбран вариант высокочастотной системы, работающей на 2-й гармонике, поскольку захват в ускорение и эффективность работы системы банчеров в этом случае лучше.

На циклотроне ДЦ-110 для получения необходимой интенсивности пучков $^{84}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$ разработан источник ионов электронно-циклотронного резонанса DECRIS-5, работающий на частоте 18 ГГц в «теплом» варианте магнитной системы с медными обмотками. Основные параметры источника DECRIS-5 перечислены в таблице 10.

Таблица 10. Основные параметры источника DECRIS-5

Частота СВЧ	18 ГГц
Мощность СВЧ генератора	≤ 2000 Вт
Количество обмоток магнитной системы аксиального поля	3
Магнитное поле со стороны инжекции	2,2 Тл
Магнитное поле со стороны экстракции	1,35 Тл
Радиальное магнитное поле	1,15 Тл
Структура гексаполя (NdFeB)	36 секторов
Внутренний диаметр плазменной камеры	80 мм
Длина плазменной камеры	300 мм
Максимальное напряжение экстракции	25 кВ
Рабочее напряжение экстракции	20 кВ
Максимальное потребление мощности	160 кВт

После монтажа ЭЦР источника и системы аксиальной инжекции была проведена комплексная наладка всех систем источника и канала аксиальной инжекции. Исследована возможность получения максимальной интенсивности пучков ионов Ar, Kr, Xe, результаты приведены в таблице 11.

Для транспортирования пучка ионов ЭЦР источника в центр циклотрона создана система аксиальной инжекции пучка (рис. 10), в состав которой входят: IS1, IS2, IS3 - фокусирующие линзы; ICM1, ICM2 - корректирующие элементы; IM90 - анализирующий магнит; диагностические элементы для измерения параметров инжектируемого пучка; IBN1- линейный банчер, расположенный в 2450 мм от медианной плоскости; IBN2 - синусоидальный банчер, расположенный в 800 мм от медианной плоскости; вакуумные средства откачки на базе турбомолекулярных насосов и криогенных насосов; электростатический инфлектор, расположенный в центре циклотрона, для поворота инжектируемого пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона. Напряжение инжекции 20 кВ выбрано, исходя из оптимальных условий динамики движения пучка в центре циклотрона.

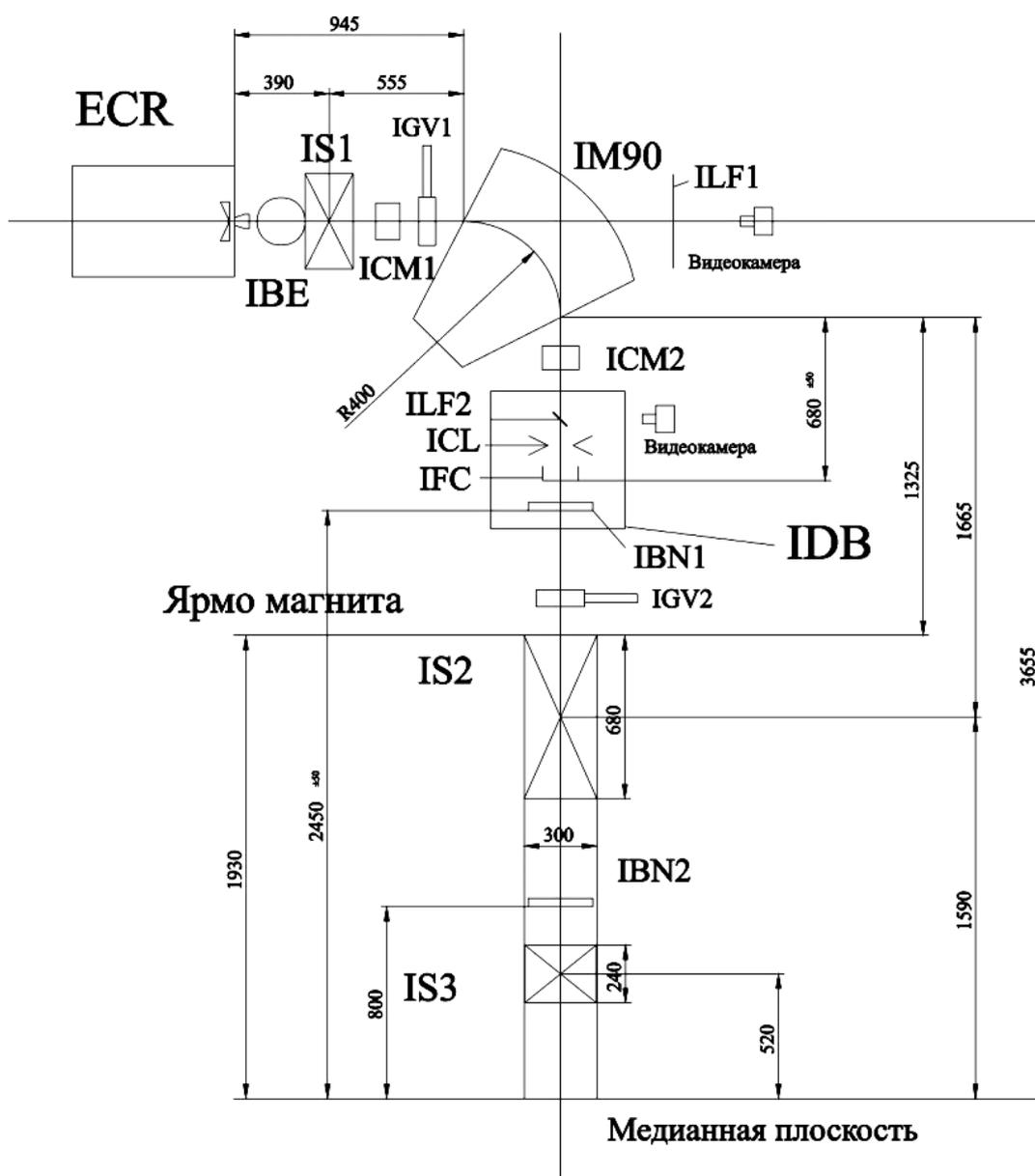


Рис. 10. Схема системы аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110

Таблица 11. Максимальные интенсивности пучков ионов источника DECRIS-5 в мкА

Ион	Заряд						
	8+	9+	11+	15+	18+	19+	20+
Ar	1200	750	300				
Kr				325	182	120	70
Xe							220

Магнитная структура ДЦ-110 не предусматривает использования радиальных корректирующих катушек, магнитное поле сформировано с помощью железных масс. Для коррекции первой гармоники в долинах циклотрона установлены 2 сборки азимутальных корректирующих катушек. При формировании магнитного поля учитывалось влияние фокусирующего магнитного канала, входящего в систему вывода. Для подавления нечетных гармоник магнитного поля в циклотроне центрально симметрично фокусирующему магнитному каналу установлен компенсирующий канал, по конструкции идентичный основному. Основные параметры магнита ДЦ-110 приведены в таблице 12.

Таблица 12. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-110

Размер магнитопровода Д×Ш×В, мм	4940×2075×2840
Диаметр полюса, мм	2000
Межполюсной зазор, мм	218
Количество пар секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность)	52° (0°)
Высота сектора, мм	65,5
Зазор между секторами, мм	42
Зазор между сектором и полюсом, мм	24,5
Зазор между центральными пробками, мм	112
Количество радиальных корректирующих катушек	0
Количество сборок азимутальных корректирующих катушек	2
Масса электромагнита, т	250
Магнитное поле в центре, Тл	1,67
Флаттер	0,117
Частота бетатронных колебаний $- v_r / v_z$	0,34 / 1,015

В изохронном циклотроне ДЦ-110 для получения ускоряющего напряжения на дуантах применяется резонансная система, состоящая из следующих узлов:

- два диаметрально противоположно расположенных четвертьволновых коаксиальных резонатора - баки из нержавеющей стали, плакированные внутри бескислородной медью,
- два дуанта угловой протяженностью 40°,
- две сборки антидуантов, расположенных в долинах циклотрона.

Резонаторы циклотрона укомплектованы узлами ввода мощности и подстройки частоты:

- петля связи для ввода высокочастотной мощности в резонатор,
- механизм ручного перемещения закорачивающей пластины,
- триммер автоматической подстройки резонансной частоты,
- юстировочный механизм,
- пикап-электроды для измерения напряжения на дуантах.

Основные характеристики высокочастотной системы приведены в таблице 13.

Таблица 13. Общие характеристики ВЧ системы

Резонансная частота резонаторов в холодном режиме	7,494 – 7,806 МГц
Гармоника ускорения	2
Напряжение на дуанте	55 кВ
Расчетная ВЧ мощность возбуждения одного резонатора	4,3 кВт
Максимальная плотность тока на штоке	32 А/см
Диапазон подстройки частоты триммером АПЧ	100 кГц (0,1%)
Максимальная мощность ВЧ генератора	20 кВт

Оптимальным решением для вывода пучка тяжелых ионов из циклотрона ДЦ-110 является электростатическая система на базе дефлектора с напряженностью электрического поля 50-60 кВ/см. Дефлектор располагается в долине. Расстояние между пластинами 10 мм. Септум и потенциальная пластина охлаждаются водой.

Для фокусировки пучка в процессе вывода в камере циклотрона используется пассивный магнитный канал.

Циклотронный комплекс ДЦ-110 (рис. 11) комплектуется одним каналом для транспортировки пучков ускоренных ионов, с возможностью установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала. Элементы канала обеспечивают равномерное облучение тяжелыми ионами поверхности движущейся пленки шириной до 600 мм.

Ионно-оптическая система канала облучения полимерных материалов состоит из трех квадрупольных линз, трех корректирующих магнитов и системы сканирования пучков. Горизонтальная система сканирования пучков тяжелых ионов создана на базе магнита, питающегося пилообразным током, вертикальное сканирование осуществляется электростатическим дефлектором с пилообразным напряжением.

Мишень в канале облучения полимерных материалов находится на расстоянии около 10 м от системы сканирования, размер максимальной области облучения в позиции мишени 300×700 мм. Расчетный диаметр пучка ионов на мишени при выключенной системе сканирования - около Ø80 мм.

Рабочие частоты генераторов развертки:

- горизонтальная частота сканирования с использованием магнита $f_x \approx 100$ Гц,
- вертикальная частота сканирования с использованием электростатики $f_y \approx 2000$ Гц.



Рис.11. Циклотрон ДЦ-110 и канал транспортировки пучка



Рис.12. Установка для облучения полимерной пленки

Канал циклотрона ДЦ-110 комплектуется специализированной установкой (рис.12), предназначенной для облучения тяжелыми ионами полимерной пленки, перемещающейся в зоне облучения со скоростью от 0,05 до 1,0 м/с. Полимерные пленки могут быть полиэтилентерефталатные, поликарбонатные, полиимидные или другие, аналогичные по механическим свойствам, имеющие модуль упругости 2-5 ГПа и прочность на разрыв не ниже 100 МПа. Ширина пленок может варьироваться в пределах от 200 до 600 мм, толщина – от 10 до 30 мкм. Однородность распределения частиц в зоне облучения не хуже $\pm 10\%$.

Вакуумная система ускорительного комплекса

Требования к вакуумной системе определяются главным образом потерями ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

В вакуумную систему циклотронного комплекса входят:

- система откачки камеры циклотрона и два высокочастотных резонатора общим объемом ~3500 литров; средства откачки: 2 криогенных и 8 турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 13300 литров в секунду,
- система откачки канала аксиальной инъекции пучка и ионного источника (2 криогенных и 3 турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 2050 л/с),
- система откачки канала транспортировки пучка: 8 турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 3650 л/с,
- система откачки установки облучения пленки: 3 турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 1500 л/с и 2 криогенные панели Policold с суммарной скоростью откачки 70 000 л/с по водяным парам.

В таблице 14 показан проектный и полученный вакуум в циклотроне ДЦ-110. По мере вакуумной тренировки объемов циклотрона ожидается улучшение вакуума.

Таблица 14. Проектный и полученный вакуум в циклотроне ДЦ-110 (в Торр).

	Проектный	Полученный
Канал инъекции	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Камера циклотрона	$(1-2) \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$ (в статическом режиме) $2,7 \cdot 10^{-7}$ (в рабочем режиме, с пучком)
Канал ионов высокой энергии	$5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$ (в статическом режиме)

На начальном этапе пусконаладочных работ были изучены резонансные характеристики, чтобы найти оптимальный уровень магнитного поля, при котором

фазовые потери при ускорении пучка ионов минимальны. В результате исследований было принято решение использовать режим ускорения при фиксированном магнитном поле. Небольшое отличие в отношении массы к заряду ускоряемых ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$ (6,667, 6,615 и 6,600) в этом случае компенсируется подстройкой частоты ускоряющей системы (таблица 15).

Таблица 15. Оптимальные значения частоты ВЧ системы и магнитного поля при ускорении ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$

Ион	(A/Z)	Магнитное поле, Тл	Оптимальная частота ВЧ системы ($F_{\text{ВЧ}}$), МГц	Отличие частоты ΔF , кГц
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	1,6612	7,653	23
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	1,6612	7,712	-18
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,600	1,6612	7,730	0

Режим ускорения, указанный в таблице 9, не требует перестройки каких-либо параметров систем ускорителя при изменении типа ускоряемых ионов, за исключением подстройки частоты резонансной системы.

В процессе исследования режима ускорения были измерены зависимости интенсивности пучков на конечном радиусе циклотрона от давления в камере ускорителя. Из анализа данных установлено, что потери пучка при ускорении из-за перезарядки на остаточном газе при давлении $1,7 \cdot 10^{-7}$ Торр составляют для $^{40}\text{Ar}^{6+}$ 18%, для $^{86}\text{Kr}^{13+}$ – 27%, для $^{132}\text{Xe}^{20+}$ – 44%. Фазовые и апертурные потери оцениваются на уровне 10 %.

Фазовый акцептанс циклотрона ДЦ-110 составляет примерно 30° , для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка используется система банчировки пучка. В системе аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110 установлены два банчера – линейный, расположенный на расстоянии 2450 мм от медианной плоскости, и синусоидальный, расположенный на расстоянии 800 мм от медианной плоскости. В системе с двойной банчировкой линейный банчер используется для группировки инжектируемых ионов в 180° -й интервал фаз в зоне расположения синусоидального банчера, который эффективно работает в таком диапазоне фаз.

Исследования показали, что созданная система банчировки эффективно работает при интенсивности инжектируемого пучка вплоть до 100 мкА. Эффективность захвата пучка в ускорение составляет 34–38%. Полученный коэффициент захвата до 48% при низкой интенсивности инжектированного пучка – 6 мкА связан не только со снижением влияния пространственного заряда в пучке, но и с уменьшением эмиттанса пучка при низкой интенсивности из ионного источника, поскольку снижение интенсивности осуществлялось за счет уменьшения СВЧ мощности, подаваемой в разрядную камеру источника.

Таблица 16. Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение при разной комбинации включения банчеров

I инж, мкА	Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение в %			
	без банч.	Lin–вкл.	Sin–вкл.	Sin+Lin – вкл.
6	9,3	23,2	25,8	48,2
18,4	8,7	15,6	25,0	38,0
49	9,1	15,7	25,7	36,7
103	8,7	14,1	24,8	34,0

В результате выполнения программы пусконаладочных работ ускорены ионы аргона, криптона и ксенона. Энергия ионов и интенсивность пучков соответствуют проектным параметрам (таблица 17).

Таблица 17. Параметры пучков ионов, полученных на циклотроне ДЦ-110

Ион	Отношение массы к заряду	Интенсивность пучка из ЭЦР источника, мкА	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка, мкА		Энергия ионов, МэВ/нукл.
			Проектная	Полученная	
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	94	6	13	2,5
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	150	13	14,5	2,5
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	190	10	10,9	2,5

Для тестового облучения пленки был использован пучок ионов криптона. Оптические элементы канала транспортировки пучка (квадрупольные линзы и корректирующие магниты) позволяют транспортировать пучок на установку облучения полимерной пленки без потери интенсивности. Система сканирования пучка обеспечила однородное облучение пленки шириной 600 мм. В тестовом облучении получены трековые мембраны с плотностью $1,32 \cdot 10^8$ пор/см² и $6,16 \cdot 10^7$ пор/см². Неоднородность плотности облучения по ширине и по длине пленки получена в пределах $\pm 10\%$.

Работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-110 были начаты в августе 2009 года. В 2012 году выполнен монтаж и наладка оборудования циклотрона в здании научно-промышленного комплекса «БЕТА», получены пучки ускоренных ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$ с проектной энергией 2,5 МэВ/нуклон и проектной интенсивностью 13, 14,5 и 10,5 мкА соответственно. Ускорительный комплекс ДЦ-110 способен обеспечить производство 2 млн. кв. м трековых мембран в год, что существенно превышает возможности известных ускорительных центров.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработана концепция проектирования нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции из внешних источников ионов типа ЭЦР.
2. Впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ создана система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая стала базовым решением для проектов подобных систем на циклотронах ЛЯР.
3. Разработан и выполнен проект глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона ИЦ-100 для промышленного производства трековых мембран. На ускорителе создана система внешней инжекции пучка из ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1–1,2 МэВ/нуклон.
4. Создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с вариацией энергии от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий.
5. Создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран, ускоряющий пучки ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Производительность комплекса по облучению полимерной пленки составляет более 2 миллионов квадратных метров в год.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

1. Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Д.И.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200 // 10 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т.2. С. 143-146.

2. O.Borisov, B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, I.Kalagin. Optimization of the axial injection system for U400 cyclotron (linear buncher) // Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria. – P.1468-1470.
3. А.Н.Сисакян, М.Г.Иткис, С.Н.Дмитриев, Б.Н.Гикал, В.Ф.Реутов, К.К.Кадыржанов, В.С.Школьник, А.А.Арзуманов. Перспективы развития фундаментальных и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов низких и средних энергий // Материалы 3-й международной научной конференции «Ядерная и радиационная физика», 4-7 июня 2001, Алматы, Казахстан, Тезисы. – Алматы: Институт ядерной физики НЯЦ РК, 2001.- С.40-41.
4. B.N.Gikal, M.G.Itkis, S.N.Dmitriev, G.G.Gulbekian, J.Franko, K.K.Kadyrzhanov, A.A.Arzumanov, A.N.Borisenko, S.N.Lissukhin. The project of a specialized accelerator DC-60 designed for the interdisciplinary laboratory complex, L.N.Gumilev Euroasia state university // Proceeding 3rd International Conference “Nuclear and radiation physics” 4-7 June 2001, Almaty, Kazakstan. 2001. - P.9-28.
5. S.N.Dmitriev, P.Apel, G.Gulbekian, B.Gikal, O.Ivanov, V.Reutov, V.Skuratov. Accelerated heavy ions for research in life sciences: Production of membranes, nanostructures, and surface modification // First coordination Meeting: Perspectives of life sciences research at nuclear centres. Riviera, Zlatny Piasatsi (Golden Sands), Bulgaria 21-27 September 2003. Abstracts, Dubna, 2003. P.42-44.
6. B.N.Gikal, V.Bashevoy, V.V.Bekhterev, S.L.Bogomolov, O.N.Borisov, S.N.Dmitriev, A.Efremov, G.Gulbekian, M.G.Itkis, I.A.Ivanenko, I.Kalagin, V.I.Kazacha, N.Yu.Kazarinov, I.V.Kolesov, V.Melnikov, V.Mironov, A.Tikhomirov, V.Zarubin. Project of DC-60 Cyclotron with Smooth Ion Energy Variation for Research Center in L.N.Gumilev Euroasia State University in Astana (Kazakhstan) // The 17th International conference on cyclotrons and their applications, Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004, Tokyo, Japan. P.44.
7. B.Gikal, V.Bashevoy, V.Bekhterev, S.Bogomolov, O.Borisov, S.Dmitriev, A.Efremov, G.Gylbekian, I.Ivanenko, V.Kazacha, N.Kazarinov, I.Kolesov, V.Melnikov, V.Mironov, R.Oganessian, A.Tikhomirov. Upgrading of the DC-40 cyclotron // The 17th International conference on cyclotrons and their applications. Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004, Tokyo, Japan. P.39.
8. B.N.Gikal, S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, A.A.Efremov, G.G.Gulbekyan, I.A.Ivanenko, M.G.Itkis, V.I.Kazacga, N.Yu.Kazarinov, I.V.Kolesov, V.B.Zarubin. DC-60 heavy ions cyclotron for modification of metal surfaces, nano-technology and solid states physics // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2005. С.215-218.
9. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, T.Belyakova, O.Plyasov, V.Kukhtin, E.Lamzin, M.Larionov, B.Maximov, S.Sytchevsky. Effect of actual magnetic properties of steel on field quality in DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября 2005. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2005. – С.224-227.
10. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, A.Alexeev, T.Belyakova, V.Belyakov, V.Kukhtin, E.Lamzin, A.Malkov, F.Skornyakov, S.Sytchevsky. Effect of deformations caused by the ponderomotive force of magnet system quality in cyclotron DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября 2005. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2005. – С.219-223.

11. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, И.А.Иваненко, Т.Ф.Белякова, В.П.Кухтин, Е.А.Ламзин, С.Е.Сычевский. Формирование магнитного поля в циклотроне DC-60 на основе методов математического моделирования // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.257-259.
12. B.N.Gikal, S.N.Dmitriev, S.L.Bogomolov, V.V.Bekhterev, O.N.Borisov, A.A.Efremov, G.G.Gylbekyan, I.A.Ivanenko, M.G.Itkis, N.Yu.Kazarinov, V.I.Kazacha, I.V.Kolesov, V.N.Melnikov, A.V.Tikhomirov, V.B.Zarubin, K.K.Katyrjanov, K.A.Kuterbekov, A.N.Borisenko, S.N.Lysukhin. Commissioning of DC-60 cyclotron of scientific research centre // XXXV European Cyclotron Progress Meeting. ECPM 2006. Nice, France, November 2-4, 2006. P.23.
13. Б.Н.Гикал, М.В.Хабаров, О.А.Чернышев, А.В.Тихомиров. Вакуумная система циклотронного комплекса DC-60 // XIV научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника» Сочи, Россия, октябрь 2007. С.27-31.
14. А.В.Тихомиров, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян. Моделирование эффективности трансмиссии ускоряемых ионов для проектирования вакуумной системы циклотрона DC-60 // XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» Сочи, Россия, октябрь 2007. С.32-36.
15. O.Borisov, B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, V.Melnikov, E.Samsonov, V.Seleznev, A.Sidorov, A.Tikhomirov. Beam extraction system from DC60 cyclotron // 18th International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Messina, Italy, 30th September – 5th October 2007. Messina, 2007. P.24-26.
16. B.Gikal, S.Dmitriev, G.Gulbekian, P.Apel, V. Bashevoi, S.Bogomolov, O.Borisov, V.Buzmakov A.Cherevatenko, A.Efremov, I.Ivanenko, O.Ivanov, N.Kazarinov, M.Khabarov, I.Kolesov, V.Mironov, A. Papash, S.Pashchenko, V.Skuratov, A.Tikhomirov, N.Jazvitsky. Cyclotron complex IC-100 based facility for scientific and applied research // 18th International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Messina, Italy, 30th September – 5th October 2007. Messina, 2007. - P.27-29.
17. П.Ю.Апель, И.В.Блонская, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Т.И.Мамонова, О.Л.Орелович, В.А.Скуратов, С.Н.Дмитриев. Трековые мембраны с микро- и нанопорами // Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий», Обнинск, 16-18 октября 2007. С13-15.
18. Б.Н.Гикал, П.Ю.Апель, С.Н.Дмитриев. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий», Обнинск, 16-18 октября 2007. – с.23-25.
19. С.Н.Дмитриев, П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, В.Ф.Реутов, В.А.Скуратов. Наноструктурная модификация материалов при помощи пучков ускоренных ионов // Rusnnanotech 08, Тезисы докладов Международного форума по нанотехнологиям, Москва, 3-5 декабря 2008. С. 52-54.
20. B.N.Gikal. FLNR Heavy ion cyclotrons for investigation in the field of condensed matter physics industrial applications // Proceedings of RUPAC2012, Sant-Petersburg, Russia, 2012. P. 172-175.

Патент на изобретение:

1. Б.Н.Гикал, Ю.Г.Тетерев, А.В.Тихомиров. Способ изготовления и установки на пучок ускоренных ионов графитовой фольги. Патент на изобретение №: 2073282, МПК: H01J H05H, 1997 г.

Список научных работ, представляющих основные результаты диссертации, опубликованных в рецензируемых изданиях.

1. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, Ф.И.Иваненко. Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400 // ЖТЭФ, 1984, т.54, в.7. С.1288-1293.
2. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, and R.W.Lougheed. Heavy Element Research at Dubna // Nucl. Phys. A 734, 2004. С.109-123.
3. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, Г.С.Казача, Н.И.Лебедев, А.А.Макаров, В.А.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Рабцун, А.А.Фатеев. Система сканирования пучка тяжелых ионов // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т.2, №3(126). С.97-101.
4. S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, M.G.Itkis, V.V.Kalagin, Yu.Ts.Oganessian, V.A.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // Beam Dynamics Newsletter, No.37, August 2005. P.44-51.
5. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, И.В.Калагин, И.В.Колесов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // Атомная энергия, 2007, т.103, вып.6, С.357-364.
6. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, В.В.Башевой, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, В.А.Скуратов, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, А.П.Череватенко, Н.Ю.Язвickий. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №1(143). С. 59-85.
7. Б.Н.Гикал, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, О.А.Чернышов. Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов DC-60 // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №4(146). С. 655-674.
8. V.Aleksandrov, A.Fateev, B.Gikal. Lens without poles: conceptual design and possibilities of use in the channel of scanning of cyclotron beams // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.60-63.
9. П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев. Микро - и нанопористые структуры, получаемые в полимерах при помощи пучков ускоренных тяжелых ионов // Ядерная физика и нанотехнологии. Дубна ОИЯИ. 2008. С.73-86.
10. Ю.Г.Тетерев, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Г.А.Кононенко, В.И.Миронов. Монитор контроля плотности потока тяжелых ионов при получении пленочных полимерных материалов, основанный на регистрации протонов отдачи // ПТЭ, 2009, №2, С. 9-13.

11. V.Gikal, S.Dmitriev, P.Apel, S.Bogomolov, O.Borisov, V.Buzmakov, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, O.Ivanov, M.Itkis, N.Kazarinov, I.Kalagin, I.Kolesov, A.Papash, S.Paschenko, A.Tikhomirov, and M.Khabarov. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.160-165.
12. Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, Б.Н.Гикал, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Веровочкин, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, С.В.Пашенко, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й.Франко, М.В.Хабаров, К.К.Кадыржанов, А.Ж.Тулешев. Ускорительный комплекс ДЦ-350 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, №4(160). С.424-445.
13. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й.Франко. Проект циклотрона тяжелых ионов DC-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 891-896.
14. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.И.Лебедев, А.А.Фатеев. Система сканирования пучка тяжелых ионов ускорителя ДЦ-110 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 886-890.
15. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, В.А.Веровочкин, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, Г.Н.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, В.М.Кононов, А.А.Королев, В.А.Костырев, А.М.Ломовцев, В.Н.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Пашенко, В.А.Соколов, Н.Ф.Осипов, А.В.Тихомиров, А.А.Фатеев, М.В.Хабаров. Разработка, создание и запуск циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран. Препринт ОИЯИ Р9-2013-120. Дубна, 2013. - 23 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.233-253.
16. E.V.Samsonov, B.N.Gikal, O.N.Borisov and I.A.Ivanenko. Numerical simulation of ions acceleration and extraction in DC-110 cyclotron. Preprint JINR E9-2013-121. Dubna, 2013. 15 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11, № 2. С.264-277.
17. Б.Н.Гикал, В.И.Миронов, Ю.Г.Тетерев, В.Ю.Щеголев. Выходы нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами энергией 2,5 МэВ/нуклон. Препринт ОИЯИ Р9-2013-126. Дубна, 2013. -10 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.293-301.
18. Б.Н.Гикал, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Миронов, Е.В.Самсонов. Коррекция вертикального смещения выведенного пучка при пусконаладочных испытаниях циклотрона ДЦ-110. Препринт ОИЯИ Р9-2013-125. Дубна, 2013. 11 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11. № 2. С.254-263.